

흡기계 능동소음제어를 위한 적응형 필터 알고리즘의 개발

Design of a New VSS-Adaptive Filter for a Potential Application of Active Noise Control to Intake System

김 의 열*·김 병 현*·김 호 욱**·이 상 권†

Eui-Youl Kim, Byung-Hyun Kim, Ho-Wuk Kim and Sang-Kwon Lee

(2011년 10월 31일 접수 ; 2011년 12월 28일 심사완료)

Key Words : Active Noise Control(능동소음제어), Variable Step Size(가변스텝사이즈), Modified LMS Algorithm(수정 LMS 알고리즘)

ABSTRACT

The filtered-x LMS(FX-LMS) algorithm has been applied to the active noise control(ANC) system in an acoustic duct. This algorithm is designed based on the FIR(finite impulse response) filter, but it has a slow convergence problem because of a large number of zero coefficients. In order to improve the convergence performance, the step size of the LMS algorithm was modified from fixed to variable. However, this algorithm is still not suitable for the ANC system of a short acoustic duct since the reference signal is affected by the backward acoustic wave propagated from a secondary source. Therefore, the recursive filtered-u LMS algorithm(FU-LMS) based on infinite impulse response(IIR) is developed by considering the backward acoustic propagation. This algorithm, unfortunately, generally has a stability problem. The stability problem was improved by using an error smoothing filter. In this paper, the recursive LMS algorithm with variable step size and smoothing error filter is designed. This recursive LMS algorithm, called FU-VSSLMS algorithm, uses an IIR filter. With fast convergence and good stability, this algorithm is suitable for the ANC system in a short acoustic duct such as the intake system of an automotive. This algorithm is applied to the ANC system of a short acoustic duct. The disturbance signals used as primary noise source are a sinusoidal signal embedded in white noise and the chirp signal of which the instantaneous frequency is variable. Test results demonstrate that the FU-VSSLMS algorithm has superior convergence performance to the FX-LMS algorithm and FX-LMS algorithm. It is successfully applied to the ANC system in a short duct.

1. 서 론

소음 제어를 하기 위한 방법으로 수동소음제어

또는 능동소음제어 기법들이 널리 사용된다. 관심 주파수 영역이 저주파인 경우 파장의 길이가 수동형 소음 제어 장치의 크기에 대해 상대적으로 길어지는 물리적 한계로 인해 적절한 소음제어 특성을 얻는 것이 어렵다. 이와 같은 경우에 대안으로 능동소음제어 기법이 적용되며 적응형 알고리즘이 소음제어 성능을 결정하는 중요한 인자로 작용한다.

Fig. 1은 적응형 알고리즘의 블록다이어그램을 보

† 교신저자; 정회원, 인하대학교 기계공학과
E-mail : sangkwon@inha.ac.kr
Tel : (032)860-7305, Fax : (032)868-1716

* 정회원, 인하대학교 기계공학과

** 인하대학교 기계공학과

여주고 있다. 동적 시스템의 모델링은 구성이 단순하고 외부 외란에 강건한 최소자승법(LMS, least mean square) 알고리즘이 주로 사용되고 있다⁽¹⁻⁶⁾. 동적 시스템의 모델링은 매우 많은 수의 zero 계수를 사용하는 FIR 필터를 사용하거나 또는 상대적으로 적은 수의 zero와 pole 계수를 사용하는 IIR 필터를 사용하는 것에 의해 수행될 수 있다⁽¹⁾. 이 연구에서는 자동차의 흡기 또는 배기관과 같이 길이가 짧은 덕트에 IIR 필터에 기반을 두는 최소자승법 알고리즘을 적용하였다⁽⁷⁾. 덕트의 길이가 짧은 경우에는 소음 저감용 제어 스피커와 참조 마이크로폰 센서 사이에 거리가 매우 가깝기 때문에 제어 스피커에 의한 참조 마이크로폰 센서에 대한 음향학적 피드백이 존재한다. Fig. 2와 같이 IIR 필터에 기반을 두는 적응형 알고리즘을 사용하여 동적 시스템 모델링을 수행하였고 zero와 pole을 가지는 전달함수를 얻을 수 있다^(6,7). 반면에 FIR 필터에 기반을 두는 경우 zero만을 가지는 전달함수를 얻게 되며 Fig. 2의 블록 다이어그램에 비해 단순한 구성을 가진다.

FIR 필터에 기반을 두는 적응형 알고리즘의 경우 매우 많은 수의 zero를 사용하는 까닭에 연산 부하가 증가되어 시스템의 수렴 속도가 상당히 느리고 음향학적 피드백 현상으로 인해 시스템의 안정성 또한 좋지 않다. 이와 같은 이유로 인해 이 연구에서는 IIR 필터에 기반을 두는 최소자승법 알고리즘이 사용되었다. Chirp 신호와 같이 선형적으로 빠르게 주파수 성분이 변화하는 경우에 빠른 수렴 속도와 시스템의 안정성을 유지하기 위해 FIR 필터 보다는 IIR 필터에 기반을 두는 적응형 알고리즘을 사용하는 것이 적절하다. 스텝 사이즈의 크기는 시스템의 수렴 속도와 안정성을 결정하는 중요한 변수이다.

이 논문에서는 recursive VSSLMS라는 새로운 형태의 알고리즘을 제안하였다. 기존 LMS 또는 recursive LMS 알고리즘에 비해 보다 빠른 수렴 속도와 시스템 안전성 확보를 목적으로 에러 신호 보정 필터(SHARF)⁽⁸⁾와 가변 스텝 사이즈⁽¹⁾를 사용한다. 그리고 오차 경로에 대한 전달함수 모델은 소음 저감용 제어 스피커, 제어 시스템, 에러 마이크로폰 그리고 연산 시스템 사이에 음향학적 전달 특성을 나타내며 길이가 짧은 음향 덕트에서 능동제어

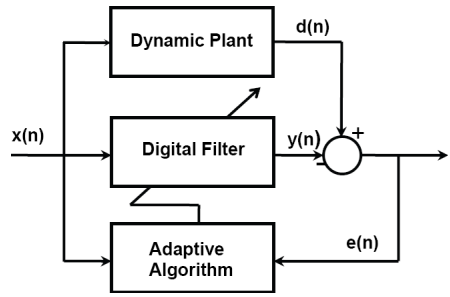


Fig. 1 Application of adaptive algorithm to the system identification of dynamic plant

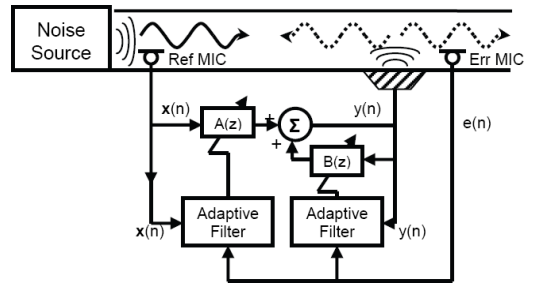


Fig. 2 Block diagram of a feedforward ANC system in a short duct

시스템의 빠른 적응 성능을 유도하기 위해 실험에 앞서 측정되어야 한다. 이와 같이 오차 경로를 고려하는 수정된 적응형 알고리즘을 FU-VSSLMS라고 하며 길이가 짧은 음향 덕트의 소음제어를 위해 제안되었다. 그리고 제안된 알고리즘의 성능 검증을 위해 FX-LMS 알고리즘과 FU-LMS 알고리즘이 시뮬레이션과 실험을 통해 비교 평가 분석되었다. 입력 소음은 두 가지 경우에 대해 고려하였다. 고정된 순음 성분의 소음과 선형적으로 주파수 성분이 변화하는 chirp 신호를 광대역 소음과 함께 입력하고 알고리즘의 차이에 따른 수렴 속도와 안전성을 비교하였다.

2. 적응형 알고리즘

2.1 LMS 알고리즘

LMS 알고리즘은 능동소음제어에 널리 사용되는 적응형 알고리즘으로서 구조가 단순하고 연산 부담이 적은 것이 장점이며 적응형 필터 계수는 steepest descent법을 사용하여 능동적으로 변경된다. LMS 알고리즘의 가장 기본적인 형태는 식 (1)과 같이 나

타낼 수 있다⁽¹⁾.

$$\mathbf{w}[n+1] = \mathbf{w}[n] - \mu e[n] \mathbf{x}[n] \quad (1)$$

여기에서 \mathbf{w} 는 FIR 필터의 계수를 의미하고 $e[n]$ 은 에러 신호 그리고 μ 는 스텝 사이즈를 나타낸다. 이 중 스텝 사이즈는 적응형 알고리즘의 안정성과 수렴 속도 특성을 결정하는 중요한 인자로서 작용한다. 만약 스텝 사이즈의 크기가 크다면 수렴 속도를 빠르게 되지만 특성 에러값 이하로 수렴될 수 없으며 시스템의 전체적인 안정성이 저하될 수 있다. 따라서 빠른 수렴 속도와 함께 높은 안정성을 가지는 최적화된 스텝 사이즈 크기를 선정하는 것이 중요하다. 이 연구에서 다루는 LMS 알고리즘의 수렴 속도를 개선하기 위한 방법으로 가변 스텝 사이즈 μ 를 사용하는 방법이 있다. 이와 같은 알고리즘을 VSSLMS 알고리즘이라 부르며 다음과 같은 수식 관계를 가지고 있다⁽²⁻⁶⁾.

$$\mathbf{w}[n+1] = \mathbf{w}[n] - \mu[n+1]e[n] \mathbf{x}[n] \quad (2a)$$

$$\mu[n+1] = \alpha \mu[n] + \beta e^2[n] \quad (2b)$$

$$\mu[n] = \begin{cases} \mu_{\max}, & \mu[n] > \mu_{\max} \\ \mu_{\min}, & \mu[n] < \mu_{\min} \\ \mu[n], & \text{else} \end{cases} \quad (2c)$$

식(2b)에서 α 와 β 는 VSSLMS 알고리즘의 중요한 변수이다. 가변 스텝 사이즈의 크기 μ 는 시스템 안정성과 직접 연관되어 있으며 이를 유지하기 위해 적절한 경계 범위 내에서 조정하여 사용한다. 여기에서는 μ_{\min} 과 μ_{\max} 사이에서 앞서 주어진 수식 관계에 따라 크기 μ 가 결정되는 구조를 가진다. 그리고 능동소음제어 시스템의 주변 환경에 대한 오차 경로 모델이 포함되어 FU-VSSLMS 알고리즘 형태로 사용이 된다.

2.2 FU-VSSLMS 알고리즘

적응형 FIR 필터의 계수를 갱신하기 위해 기본적으로 LMS 알고리즘이 사용된다. 이 연구에서 다루는 길이가 짧은 음향 덕트의 경우 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 적응형 IIR 필터가 참조 신호와 제어 스피커 사이에 음향학적 피드백 현상을 상쇄하기 위해 필요하다. IIR 필터의 계수는 두 개의 recursive LMS 알

고리즘을 사용하여 pole과 zero의 개수를 지속적으로 갱신한다⁽⁸⁾.

$$y[n] = \sum_{p=0}^P b_p x[n-p] + \sum_{q=1}^Q a_q y[n-q] \quad (3)$$

$$= \mathbf{x}[n] \mathbf{b} + \mathbf{y}[n-1] \mathbf{a}$$

여기에서 \mathbf{x} 는 입력 벡터 행렬을 의미하고 \mathbf{y} 는 출력 벡터 행렬이다. 그리고 \mathbf{a} 와 \mathbf{b} 는 pole과 zero의 계수 벡터를 나타낸다. 이와 같은 계수는 두 개의 LMS 알고리즘을 사용하여 그 값이 갱신되며 다음과 같은 수식에 의해 계산이 수행된다.

$$\mathbf{a}[n+1] = \mathbf{a}[n] - 2\mu_1 e[n] \mathbf{y}[n-1] \quad (4a)$$

$$\mathbf{b}[n+1] = \mathbf{b}[n] - 2\mu_2 e[n] \mathbf{x}[n] \quad (4b)$$

IIR 필터에 기반하는 적응형 알고리즘 사용시 이전의 출력 $y[n-1]$ 이 현재 출력 $y[n]$ 에 직접적으로 연관되어 있기 때문에 시스템의 전반적인 안정성이 떨어질 수 있다. IIR 필터에 기반하는 FU-VSSLMS 알고리즘을 활용하기 위해서 IIR 필터의 pole과 zero의 계수는 스텝 사이즈 μ_k 와 SHARF(simple hyper-stable adaptive recursive filter)를 사용하여 지속적으로 계수 정보를 업데이트 한다. SHARF 알고리즘은 Synder에 의해서 제안된 필터 알고리즘이며 관련된 수식은 다음과 같다⁽⁸⁾.

$$\mathbf{a}[n+1] = \mathbf{a}[n] - \mu_1[n+1] \varepsilon[n] \mathbf{y}[n-1] \quad (5a)$$

$$\mathbf{b}[n+1] = \mathbf{b}[n] - \mu_2[n+1] \varepsilon[n] \mathbf{x}[n] \quad (5b)$$

가변 스텝 사이즈 μ_k 는 식(6)에 의해 갱신 과정이 수행이 된다.

$$\mu_k[n+1] = \alpha_k \mu_k[n] + \varepsilon_k^2[n] \quad (6)$$

여기에서 k 는 1과 2이다. 그리고 식(6)에서 에러라는 또한 SHARF 알고리즘에 의해서 갱신된다.

$$\varepsilon_k[n] = \gamma e[n] - \sum_{r=1}^R a_r e[n-r] \quad (7)$$

여기에서 a_r 은 SHARF 알고리즘의 계수를 의미한다. 가변 스텝 사이즈의 크기를 의미하는 μ_k 는 다음과 같은 범위 내에서 적절히 조정된다.

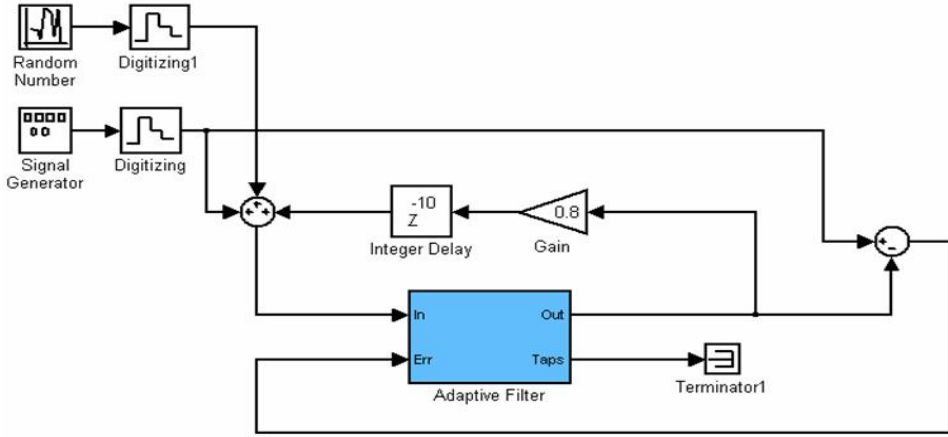


Fig. 3 MATLAB/Simulink model for the comparison of the performance of adaptive algorithms

$$\mu_k[n] = \begin{cases} \mu_{k,\max}, & \mu_k[n] > \mu_{k,\max} \\ \mu_{k,\min}, & \mu_k[n] < \mu_{k,\min} \\ \mu_k[n], & \text{else} \end{cases} \quad (8)$$

식 (5)에서 FU-VSSLMS 알고리즘의 안정성 문제를 극복하기 위해서 SPR(strict positive real)을 사용하여 제안된 알고리즘이 만족할 수 있도록 하였다. 이에 대한 수식적 조건은 다음과 같다⁽⁹⁾.

$$\text{Re}[G(z)] > 0, \quad z = e^{j\Omega} \quad (6a)$$

$$G(z) = \frac{1 - \sum_{r=1}^R a_r z^{-r}}{1 - \sum_{q=1}^Q a_q z^{-q}} \quad (6b)$$

여기에서 $G(z)$ 는 여러 신호의 필터링을 통해 얻을 수 있는 보상 전달 함수이며 주파수 축면에서 표현할 수 있다. 여기에서 a_r 은 SHARF의 계수를 의미하고 a_q 는 식 (3)의 IIR 필터에서 pole의 계수를 의미한다.

3. 시뮬레이션

FU-VSSLMS 알고리즘의 수렴 성능을 검증하기 위해 MATLAB/Simulink를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 2는 feedforward 형태의 능동소음 제어 시스템의 블록 다이어그램을 보여준다. 우선, 광대역 소음에 150 Hz의 순음 성분을 가지는 소음

에 대해 알고리즘이 적용되었다. 여기에서 수행되는 시뮬레이션에서는 오차 경로에 의한 영향이 고려되지 않았으며 LMS 알고리즘, recursive LMS 알고리즘, 그리고 recursive VSSLMS 알고리즘이 차례대로 적용되었다. 여기에서 음향학적 피드백 현상을 상쇄하기 위해 recursive LMS 알고리즘이 사용되었다. 그리고 가변 스텝 사이즈의 성능은 recursive VSSLMS 알고리즘을 사용하여 검증하였다.

각각의 알고리즘에 의한 수렴 성능을 비교하기 위한 판단 기준 값으로 MSE(mean square error)가 사용되었다. Fig. 3과 Fig. 4는 시뮬레이션 MATLAB/Simulink 모델과 결과를 보여준다. 이 결과는 VSSLMS 알고리즘을 사용하는 경우에 가장 빠른 수렴 성능을 가짐을 보여준다. 시뮬레이션에 사용된 각각의 알고리즘에 사용된 변수는 Table 1에서 확인할 수 있다. 제안된 recursive VSSLMS 알고리즘의 안전성을 검증하기 위해 식 (9)의 보상전달함수 $G(z)$ 를 사용하였고 Fig. 5의 결과를 통해 제안된 적응형 알고리즘의 안정성이 좋음을 확인할 수 있다.

4. 실험

4.1 실험 장치의 구성

제안된 알고리즘의 실험적 검증을 위해 1 m 길이의 아크릴 원형 덕트를 사용하였다. 전반적인 실험 장치의 구성은 Fig. 6과 같으며 원형 덕트의 단면 크기가 상당히 작기 때문에 덕트 내부의 음향 전파 특성은 차단 주파수 이하의 평면파로 가정하였다.

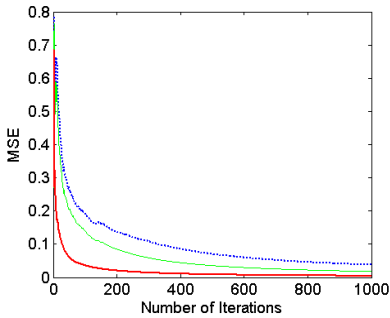


Fig. 4 MSE(mean square error) for the error signal at downstream which is obtained by the simulation work. The adaptive algorithm is LMS algorithm(· · ·), recursive LMS algorithm(—), and recursive VSSLMS algorithm(—)

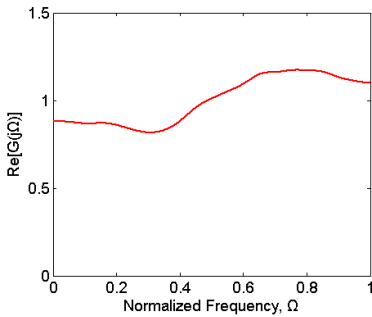


Fig. 5 Verification of SPR(strict positive real) for FUVSSLMS algorithm used for the ANC after 100,000 iterations

Table 1 Parameters of adaptive algorithm for ANC simulation

LMS	μ					
	0.015					
Recursive LMS	μ_1	μ_2				
	0.03	0.004				
Recursive VSSLMS	α	γ	$\mu_{1,max}$	$\mu_{1,min}$	$\mu_{2,max}$	$\mu_{2,min}$
	0.97	0.75	0.004	1e-5	0.03	1e-5

이와 같은 가정에 근거하여 덕트의 길이 방향에 대한 모드 특성만 존재하며 첫 번째 차단 주파수는 능동소음제어 시스템이 적용되는 관심 주파수 범위 보다 높게 위치한다. 검증 실험에 적용된 능동제어 시스템은 하나의 참조 마이크로폰 센서와 제어 스피커 그리고 에러 마이크로폰 센서로 구성되어 있다.

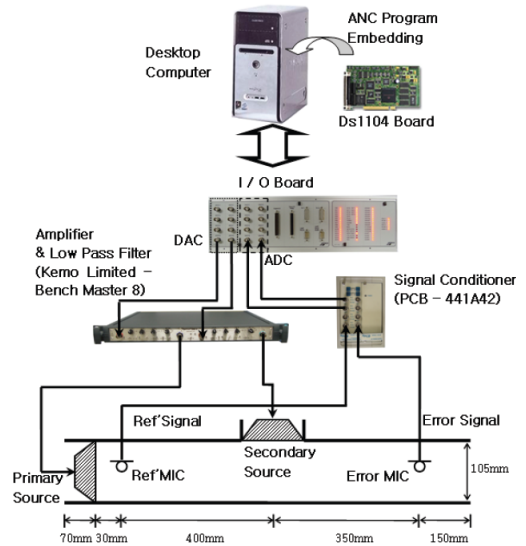


Fig. 6 Setup of equipment for the ANC in a short acoustic duct

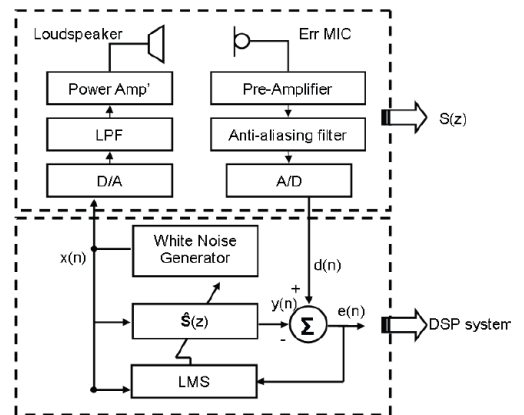


Fig. 7 Experimental scheme for the estimation of transfer function $S(z)$ of the secondary path

그리고 덕트 내부에 입력되는 소음으로 광대역 소음을 포함하고 있는 순음 성분의 신호와 시간에 따라 선형적으로 주파수 성분이 변화하는 chirp 신호가 사용되었다. 참조 마이크로폰 센서는 Fig. 6과 같이 입력 스피커로부터 약 3 cm 떨어진 위치에 설치되어 있으며 소음 저감용 제어 스피커는 40 cm 그리고 에러 신호 측정용 마이크로폰 센서는 75 cm 떨어진 위치에 각각 설치되어 있다.

능동소음제어 시스템에 적용되는 최소자승법 알고리즘은 MATLAB/Simulink를 사용하여 작성되었으며 dSPACE사의 소프트웨어를 사용하여 DSP 보드에

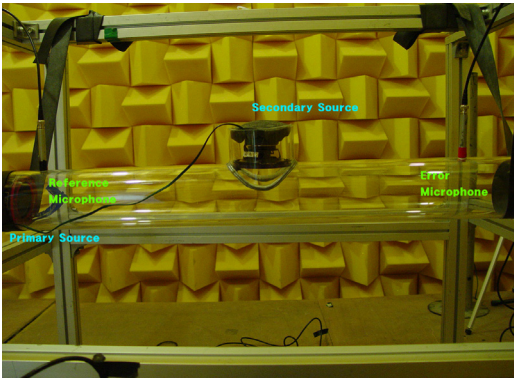


Fig. 8 Pictorial illustration of experiment for the ANC in a short acoustic duct

임베디드 되었다. 참조 센서와 에러 센서에 의해 측정된 소음 신호는 신호 증폭기를 사용하여 증폭 후에 A/D 컨버터를 통해 디지털 신호로 변환하였다. 제어 스피커에 의해 생성되는 출력 신호는 DSP 보드에 임베디드되어 있는 최소자승법 알고리즘에 의해 제어가 된다. 덕트 내부의 외란 신호는 덕트 입구단에 설치된 스피커를 통해 덕트 내부에 입력된다. 제어 시스템의 신호는 저역 통과 필터를 사용하여 필터링을 수행한 후에 스피커에 전달되는 형태를 취하고 있다.

4.2 오차 경로 모델링

이 실험에서 사용되는 능동소음제어 시스템은 크게 제어용 스피커와 에러 마이크로폰 그리고 적응형 제어 알고리즘으로 구성되어 있다. 입력 스피커와 에러 마이크로폰 센서 사이에 음향 전파 경로는 주요 전달 경로라 하고 제어 스피커를 통해 입력된 신호와 에러 마이크로폰 센서 사이에 음향 전파 특성 경로는 오차 경로의 의미를 가진다. 실시간으로 빠른 제어가 필요한 능동소음제어 시스템에서는 제어 성능의 개선을 위해 제어 스피커와 에러 마이크로폰 사이에 오차 경로에 대한 모델이 적응형 제어 알고리즘에 반영되어야 하며 실제 실험에 앞서 측정이 필요하다. 오차 경로를 의미하는 전달함수에는 Fig. 7과 같이 증폭기, A/D변환기, D/A변환기 등의 전기 시스템을 포함한다. $S(z)$ 는 Fig. 1에서 볼 수 있는 동적 시스템의 응답 특성 함수 모델이다. FIR 필터에 기반을 두고 있는 최소자승법 알고리즘을 사용하여 오차 경로의 전달함수를 모델링 하였으며

이 실험은 능동소음제어 기법을 적용하고자 하는 대상과 주변 조건이 동일한 상태에서 무향실 조건 내에서 측정하였다. 이와 같은 과정을 통해 측정된 오차 경로 모델에 관한 전달함수 모델은 제안된 적응형 알고리즘을 검증하는 과정에서 반드시 고려되어야 하는 부분이다. Fig. 9에서 (a)는 오차 경로 모델링 과정에서 필터 계수의 수렴 경향성을 보여주며 (b)는 동적 시스템 모델링을 통해 얻은 전달함수의 계수를 보여주며 완전히 수렴한 후에 측정된 계수 정보를 오차 경로 모델에 대한 전달함수로 사용한다.

4.3 능동소음제어 실험

길이가 짧은 음향 덕트에 대한 능동소음제어 실험을 수행하기 위해 Fig. 8과 같이 무향실 내에 1 m 길이의 아크릴 원형 덕트를 설치 후 Fig. 10의 블록 다이어그램과 같이 전체적인 시스템을 구성하였다. 여기에서 $S(z)$ 는 실험을 통해 측정된 오차 경로 모델의 전달함수를 의미한다. 최소자승법 알고리즘은 측정된 오차 경로 모델의 전달함수 $S(z)$ 와 조합되어 FX-LMS, FU-LMS 그리고 FU-VSSLMS로 나타낸다. 그리고 제안된 FU-VSSLMS 알고리즘의 수렴 속도와 안정성이 기존에 널리 사용되는 FX-LMS와 FU-LMS 알고리즘과 비교하는 형태로 실험이 수행되었다. Table 2는 실험에 사용된 적응형 알고리즘의 변수를 보여주고 있으며 시스템의 발산을 피하기 위해 적절한 값을 가지도록 조정되었다. FX-LMS 알고리즘의 경우에는 80개의 zero 계수를 사용하였고 FU-LMS 알고리즘은 20개의 zero와 30개의 pole을 사용하였다. 일반적으로 FX-LMS 알고리즘의 필터 길이는 FU-LMS 알고리즘에 비해 길다.

5. 실험결과 및 분석

새롭게 제안된 FU-VSSLMS 알고리즘의 수렴 속도와 안정성을 검증하기 위해 두 개의 소음 신호가 사용되었다. 광대역 소음과 순음 신호가 조합된 형태로서 신호 생성은 MATLAB/Simulink를 사용하였다. 그리고 다른 나머지 신호는 선형적으로 주파수 성분이 변화하는 chirp를 사용하였으며 110 Hz에서 140 Hz까지 1 Hz/sec의 변화 속도를 가지고 입력 신호가 변화된다.

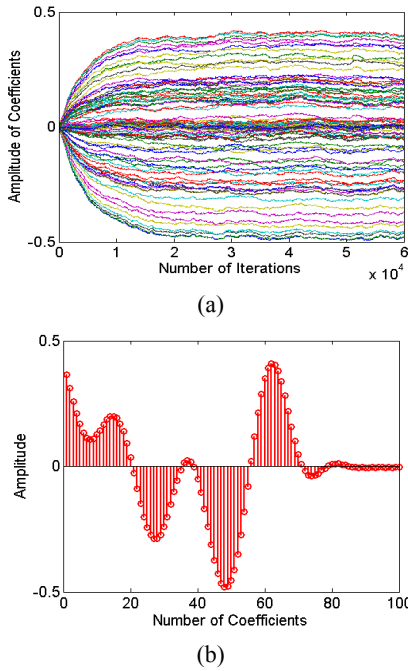


Fig. 9 Estimation of impulse response for the secondary path: (a) update of filter coefficients of impulse response, (b) impulse response of the secondary path

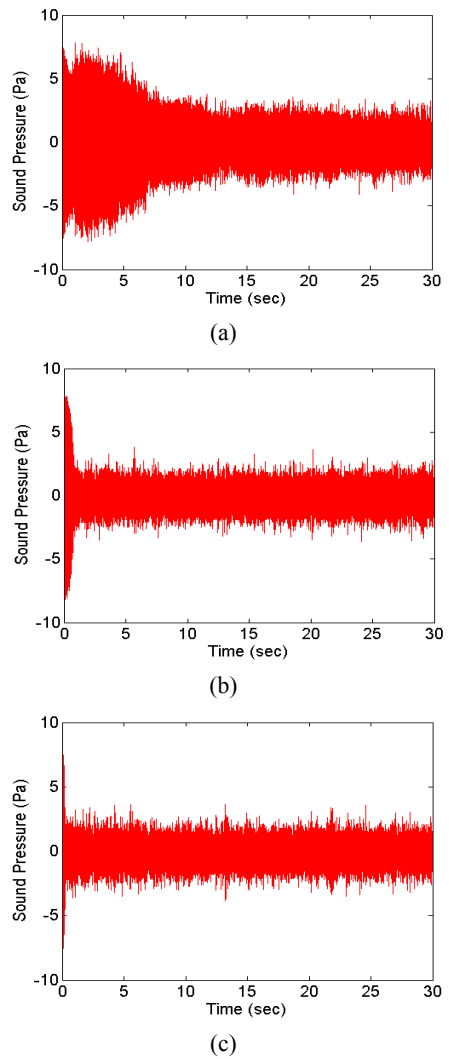


Fig. 11 Time history of the error signal measured at downstream of a short duct. Primary source is composed of sinusoidal sound embedded in white noise. The adaptive algorithm for the ANC is (a) FX-LMS (b) FU-LMS and (c) FU-VSSLMS

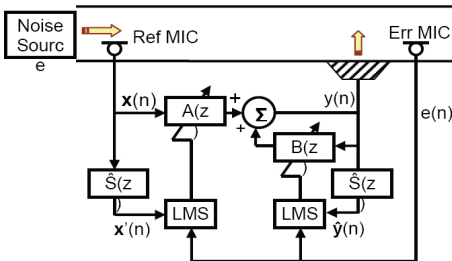


Fig. 10 Block diagram of a feed forward ANC system in a short duct considering the secondary path for enhancement of the adaptation

우선, 광대역 소음과 고정된 순음 신호를 가지는 경우에 대해 실험을 수행하였다. 길이가 짧은 음향 덕트에 측정된 오차 경로가 반영된 FX-LMS, FU-LMS 그리고 FU-VSSLMS를 사용하여 능동소음 제어 실험을 수행하였고 덕트의 끝 부분에 설치되어 있는 에러 마이크로폰 센서에서 측정된 에러 신호는 Fig. 11에서 적용된 알고리즘에 따른 차이를 확연히 보여주고 있다. 이 실험에 사용된 FX-LMS 알고리즘의 필터 길이는 앞서 언급한 바와 같이 FU-LMS

알고리즘에 비해 상대적으로 길다. 실험적인 결과는 IIR 필터에 기반을 두는 FU-LMS 알고리즘의 수렴 성능이 FIR 필터에 기반을 두는 FX-LMS 알고리즘에 비해 우수하다는 것을 확인하였다. 그리고 FX-LMS 알고리즘은 상대적으로 불안정하면서 느린 수렴 속도를 가지고 있음을 그래프를 통해 볼 수 있었다. 불안정한 경향성의 주된 이유는 덕트의 길이가 짧고 제어용 스피커로부터 참조 마이크로폰 센서의

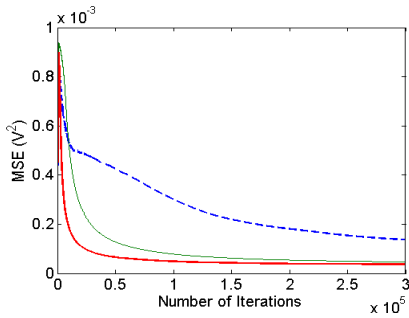


Fig. 12 MSE (mean square error) for the error signal at downstream which is obtained by the experiment work. The primary source used for the test is composed of sinusoidal sound embedded in white noise. The adaptive algorithm is FXLMS(····), FULMS(—), and FUVSSLMS(—)

위치가 매우 가깝기 때문에 발생하는 음향학적 피드백 때문이다. 그러므로 FX-LMS 알고리즘은 길이가 짧은 덕트 시스템 내에서 능동소음제어를 위해 사용하기에는 적절하지 않음을 알 수 있다. 반면에 FU-LMS 알고리즘은 빠른 수렴 속도를 가지고 순음 성분을 줄이는데 용이함을 확인하였다. 새롭게 제안된 FU-VSSLMS 알고리즘은 보다 빠른 수렴 속도 가지고 있다. 이러한 수렴 성능의 검증을 위해 각각의 에리 신호의 절대값이 계산이 되었고 Fig. 12에서 볼 수 있듯이 서로 다른 경향성을 가지고 있으며 FU-VSSLMS 알고리즘을 사용하는 경우에 가장 좋은 수렴 성능을 가지고 있음을 확인하였다.

두 번째 실험은 chirp 신호에 대한 능동소음제어 실험을 수행하였다. 이와 같은 경우에는 주파수 성분이 변화하기 때문에 제어 알고리즘이 적절히 따라가는 것이 쉽지 않기 때문에 좋은 수렴 성능을 기대하는 것이 어렵다. Fig. 13은 능동소음제어 기법을 적용하였을 때 chirp 신호에 대한 시간 데이터를 보여주고 있다. 여기에서 실선은 능동제어알고리즘을 적용하였을 때의 결과를 보여준다. Fig. 13(a)는 FX-LMS 알고리즘을 사용한 경우에 대한 시간 데이터를 보여준다. 이 결과로부터 FX-LMS 알고리즘이 chirp 신호에 대해 제어가 제대로 되지 않음을 확인하였다. 즉, 앞서 살펴본 경우와 마찬가지로 참조 마이크로폰 센서와 제어용 스피커 사이에 음향학적 영향으로 인해 적절히 소음을 저감하는 것이 쉽지 않음을 확인하였다. 이러한 음향학적 영향을

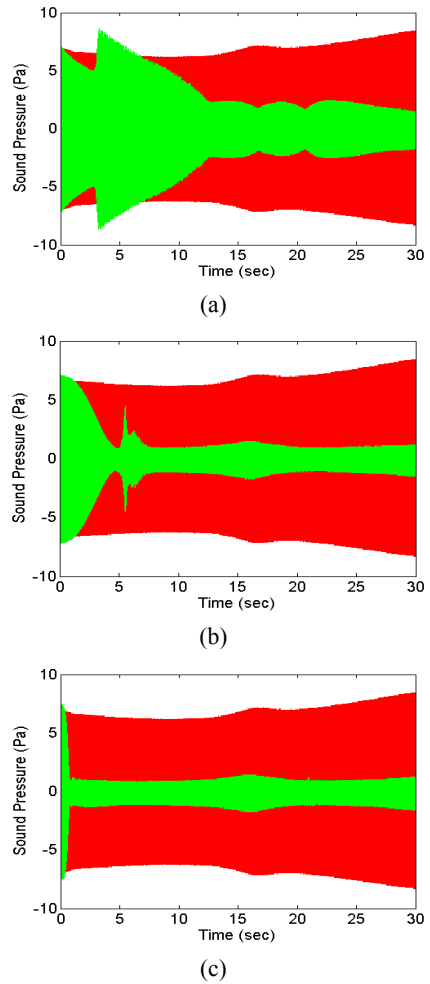


Fig. 13 Time history of the error signal measured at downstream. Primary source is composed of a chirp signal. The adaptive algorithm for the ANC is (a) FXLMS (b) FU-LMS and (c) FU-VSSLMS(dark one : uncontrol-rolled, light one : controlled)

최소화하기 위해 FU-LMS 알고리즘이 사용되었다. Fig. 13(b)에서 볼 수 있듯이 앞서 살펴본 고정되어 있는 순음과 달리 chirp 신호에 대해서는 안정성을 가지고 적절히 소음을 저감하는 것이 쉽지 않음을 볼 수 있다.

이는 가진 신호의 주파수 변화를 적절히 제어 알고리즘이 따라가지 못해 발생하는 불안정 상태로서 약 5초 이후에 시간 데이터의 수렴 특성이 다소 불안정해짐을 볼 수 있다. 하지만, 이 연구에서 새롭게 제안한 FU-VSSLMS 알고리즘의 경우에는 Fig. 13(c)

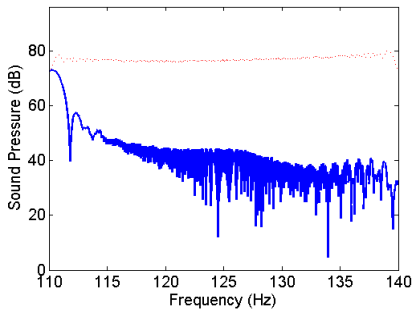


Fig. 14 Spectrum analyses for the error signals attenuated by the ANC system. Sound pressure level of uncontrolled error signal(---) and controlled error signal(—)

Table 2 Parameters of adaptive algorithm for real ANC experiment(for sinusoidal signal / for chirp signal)

FX-LMS	μ					
	0.001 / 8e-4					
FU-LMS	μ_1	μ_2				
	5e-4 / 15e-5	0.001 / 5e-4				
FU-VSSLMS	α	γ	$\mu_{1,max}$	$\mu_{1,min}$	$\mu_{2,max}$	$\mu_{2,min}$
	0.97	0.75	0.001 / 2e-4	1e-5	0.005 / 6e-4	1e-5

에서 볼 수 있듯이 빠른 수렴 속도와 안정된 제어 특성을 확인할 수 있다. 이러한 결과로부터 우리는 FU-VSSLMS 알고리즘을 사용하는 경우에 매우 효과적이고 안정된 제어 성능을 가진다는 것을 실험적으로 확인할 수 있다. 즉, FU-VSSLMS에 사용된 에러 신호 보정 필터는 시스템의 안정성을 향상시키고 가변 스텝 사이즈는 수렴 속도를 개선하는데 도움이 됨을 알 수 있다. 그리고 선형적으로 주파수 성분이 변화하는 chirp 신호에 대한 결과를 보여주는 Fig. 14에서 110 Hz에서 소음 저감 성능이 좋지 않음을 볼 수 있다. 이는 적응형 알고리즘 특성상 필터 길이에 따라 적응 시간이 다소 필요하기 때문에 발생하는 것이며 이 시간 영역을 제외하고 예상한 바와 같이 적절한 소음 저감 성능을 보여줌을 Fig. 14에서 확인할 수 있다. 기본적으로 사용되는 형태의

알고리즘에 비해 이 연구에서 제안된 알고리즘이 길이가 짧은 음향 덕트의 능동소음제어에 매우 적절함을 실험을 통해 확인하였다.

이와 같이 두 가지 입력 신호에 대해 세 가지의 적응형 알고리즘을 적용하여 소음 저감 특성을 살펴보았다. 제어 시스템이 불안하지 않는 범위 내에서 제어기의 변수를 최대한 조정하였으며 그 결과 고정된 순음과 선형적으로 변화하는 chirp 소음에 대해 이 연구에서 제안한 FU-VSSLMS 알고리즘이 제어 시스템의 안정성과 수렴 속도 측면에서 FX-LMS, FU-LMS 알고리즘에 비해 우수함을 확인할 수 있다.

6. 결 론

이 논문에서는 길이가 짧은 덕트 내에서의 능동 소음제어를 위한 알고리즘을 제안하였다. 이와 같은 경우에는 제어 스피커의 음향학적 피드백이 존재하여 능동소음제어에 대한 어려움이 다소 많은 편이다. 길이가 짧은 덕트 내에서의 능동소음제어는 recursive LMS 알고리즘을 사용하는 것에 의해 적절히 수행될 수 있다. 이 연구에서 제안하는 recursive VSSLMS 알고리즘은 에러 보정 필터와 가변 스텝 사이즈를 사용하여 제어 시스템의 안정성과 빠른 수렴 속도를 동시에 얻을 수 있음을 시뮬레이션과 실험을 통해 확인하였다. 이와 같은 장점을 가지는 적응형 알고리즘의 사용을 통해 자동차 흡기 또는 배기관과 같이 길이가 짧은 음향 덕트의 원활한 소음 제어가 가능하다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 MEST(No. 2010-0014260).

참 고 문 헌

- (1) Widrow, B. W. and Sterns, S. D., 1985, Adaptive Signal Processing, Pearson Education, Inc..
- (2) Harris, R. W., Chabries, D. M. and Bishop, F. A., 1986, A Variable Step Size(VS) Adaptive Filter

Algorithm, IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, Vol. ASSP-34, No. 2, pp. 309~316.

(3) Kwong, R. H. and Johnston, E. W., 1992, A Variable Step Size(VS) Adaptive Filter Algorithm, IEEE Trans. Signal Processing, Vol. SP-40, No. 7, pp. 1633~1642.

(4) Wang, Y., Zhang C. and Wang, Z., 2003, A New Variable Step Size LMS Algorithm with Application to Active Noise Control, IEEE ICASSP-2003: Inter. Conf. Acoust. Speech & Signal Proc, pp. V573~V575.

(5) Zhang, A. and Gong, N., 2007, A Novel Variable Step Size LMS Algorithm Based on Neural Network, ISKE-2007 Proceedings.

(6) Kuo, S. M. and Morgan, D. R., 1996, Active Noise Control Systems Algorithms and DSP Implementations, John Wiley & Sons, Inc..

(7) Eriksson, L. J., 1991, Development of the Filtered-u Algorithm for Active Noise Control, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 89, pp. 257~265.

(8) Snyder, S. D., 1994, Active Control Using IIR Filters - A Second Look, Proceedings of ICASSP,

Conference on Acoust. Speech & Signal Proc., IEEE, pp. II241~II244.

(9) Larimore, M. G., Treichler, J. R. and Johnson, Jr., C. R., 1980, SHARF: Algorithm for Adapting IIR Digital Filters, IEEE Trans. Acoust. Speech. & Signal Proc., Vol. ASSP-28, No. 4, pp. 428~440.

(10) Lawrence, J. Z., 1995, Fundamentals of Acoustic Field Theory and Space-time Signal Processing, CRC Press.

(11) Elliot, S. J., Stothers, I. M. and Nelson, P. A., 1987, A Multiple Error LMS Algorithm and Its Application to the Active Control of Sound and Vibration, IEEE Trans Acoust. Speech. & Signal Proc., Vol. ASSP-35, No. 10, pp. 1423~1434.

(12) Elliot, S., 2001, Signal Processing for Active Control, Academic Press.

(13) Ryu, K. W., Hong, C. H., Shin, C. J. and Jeong, W. B., 2011, Active Noise Control of a Closed Rectangular Cavity Using FXLMS Algorithms, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No. 11, pp. 983~990.