

능동소음제어용 적응필터 알고리즘

이상권
(인하대학교)

1. 머리말

소음제어를 하기 위한 방법으로 수동소음제어 또는 능동소음제어 기법들이 널리 사용된다. 관심주파수 영역이 저주파인 경우 파장의 길이가 수동형 소음제어 장치의 크기에 대해 상대적으로 길어지는 물리적 한계로 인해 적절한 소음제어 특성을 얻는 것이 어렵다. 이와 같은 경우에 대안으로 능동소음제어 기법이 적용되며 적응필터(adaptive filter)를 이용한 적응형 알고리즘이 소음제어 성능을 결정하는 중요한 인자로 작용한다. 그림 1은 적응형 알고리즘의 블록다이어그램을 보여주고 있다. 동적 시스템의 모델링은 구성이 단순하고 외부 외란에 강건한 최소자승법(LMS, least mean square) 알고리즘이 주로 사용되고 있다.

동적 시스템의 모델링은 매우 많은 수의 zero계수를 사용하는 FIR(finite impulse response) 필터를 사용하거나 또는 상대적으로 적은 수의 zero와 pole계수를 사용하는 IIR(infinite impulse response) 필터를 사용하는 것에 의해 수행될 수 있다. 일반적으로 수렴시간(convergence time)이 짧은 시스템의 소음제어에는 IIR 필터가 사용되어 안전성(stability)이 중요한 경우에는 FIR 필터가 사용된다. 그러나 실제 응용에서는 대부분 안전성이 중요하므로 FIR 필터에 기초한 적응필터가 많이 사

용된다. 그러나 수렴시간이 요구됨으로 실제 응용되는 예는 자동차, 항공, 건축 구조물 등에 제한적이다. 이 글에서는 짧은 적응시간이 요구되는 자동차의 흡기 또는 배기관과 같이 길이가 짧은 덕트에 IIR 필터에 기반을 두는 최소자승법 알고리즘을 소개한다. 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. 그림 2와 같이 IIR 필터에 기반을 두는 적응형 알고리즘을 사용하여 동적 시스템 모델링을 수행하였고 zero와 pole을 가지는 전달함수를 얻을 수 있다. 반면에 FIR 필터에 기반을 두는 경우 zero만을 가지는 전달함수를 얻게 되며 그림 2의 블록 다이어그램에 비해

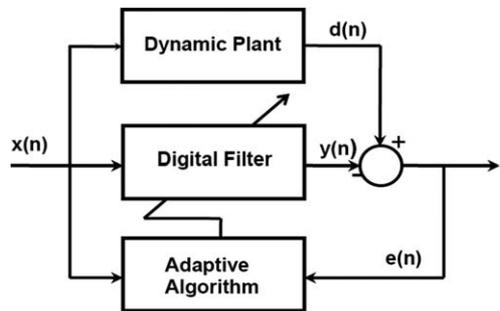


그림 1 동적플랜트의 시스템 규명에 응용되는 적응 알고리즘

* E-mail : sangkwon@inha.ac.kr / (032) 860-7305

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 IIR 필터에 기반을 두는 최소자승법 알고리즘이 사용된다. Chirp 신호와 같이 선형적으로 빠르게 주파수 성분이 변화하는 경우에 빠른 수렴 속도와 시스템의 안정성을 유지하기 위해 FIR 필터보다는 IIR 필터에 기반을 두는 적응형 알고리즘을 사용하는 것이 적절하다. 스텝 사이즈의 크기는 시스템의 수렴 속도와 안정성을 결정하는 중요한 변수이다.

이 글에서는 recursive VSSLMS라는 새로운 형태의 알고리즘을 제안한다. 기존 LMS 또는 recursive LMS 알고리즘에 비해 보다 빠른 수렴 속도와 시스템 안전성 확보를 목적으로 에러 신호 보정 필터(SHARF)와 가변 스텝 사이즈를 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 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 소음 제어를 위해 제안되었다. 그리고 제안된 알고

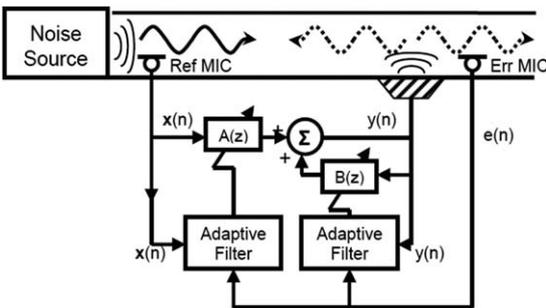


그림 2 짧은 관내에서의 능동소음저감용 제어 알고리즘의 흐름도

리즘의 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. 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 나타낼 수 있다.

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

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.

3. VSSLMS 알고리즘

이 글에서 다루는 LMS 알고리즘의 수렴 속도를 개선하기 위한 방법으로 가변 스텝 사이즈 μ 를 사용하는 방법이 있다. 이와 같은 알고리즘을 VSSLMS(variable step size LMS) 알고리즘이라 부르며 다음과 같은 수식 관계를 가지고 있다.

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

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

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

식 (2b)에서 α 와 β 는 VSSLMS 알고리즘의 중요한 변수이다.

4. FU-VSSLMS 알고리즘

적응형 FIR 필터의 계수를 갱신하기 위해 기본적으로 LMS 알고리즘이 사용된다. 일반적으로 길이가 짧은 음향 덕트의 경우 적응형 IIR 필터가 참조 신호와 제어 스피커 사이에 음향학적 피드백 현상을 상쇄하기 위해 필요하다. IIR 필터의 계수는 두 개의 recursive LMS 알고리즘을 사용하여 pole과 zero의 개수를 지속적으로 갱신한다.

$$\begin{aligned} y[n] &= \sum_{p=0}^P b_p x[n-p] + \sum_{q=1}^Q a_q y[n-q] \\ &= \mathbf{x}[n]\mathbf{b} + y[n-1]\mathbf{a} \end{aligned} \quad (3)$$

여기에서 \mathbf{x} 는 입력 벡터 행렬을 의미하고 y 는 출력 벡터 행렬이다. 그리고 \mathbf{a} , \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 hyperstable adaptive recursive filter)를 사용하여 지속적으로 계수 정보를 업데이트 한다. SHARF 알고리즘은 Synder에 의해서 제안된 필터 알고리즘이며 관련된 수식은 다음과 같다.

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

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

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

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

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

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

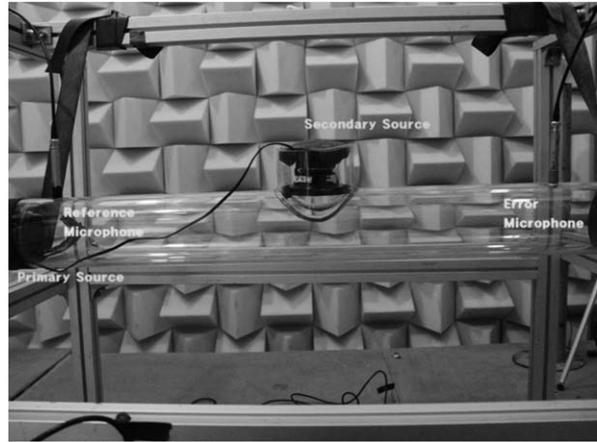
여기서 a_r 은 SHARF 알고리즘의 계수를 의미한다. 가변 스텝 사이즈의 크기를 의미하는 μ_k 는 다음과 같은 범위 내에서 적절히 조정된다.

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

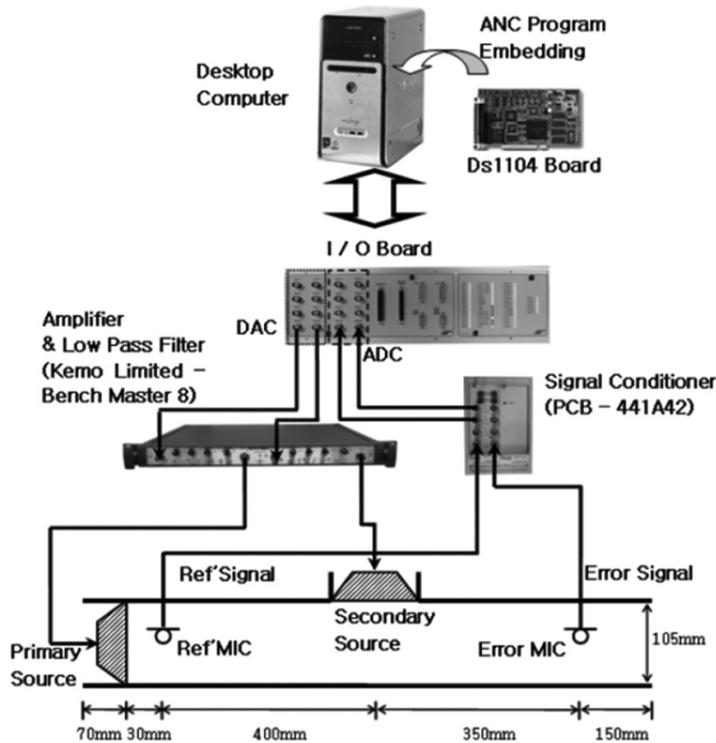
5. 응용

제안된 알고리즘의 실험적 검증을 위해 1 m 길이의 아크릴 원형 덕트를 사용하였다. 전반적인 실험 장치의 구성은 그림 3(a)와 같으며 원형 덕트의 단면 크기가 상당히 작기 때문에 덕트 내부의 음향 전파 특성은 차단주파수 이하의 평면파로 가정하였다. 이와 같은 가정에 근거하여 덕트의 길이 방향에 대한 모드 특성만 존재하며 첫 번째 차단주파수는 능동소음제어 시스템이 적용되는 관심주파수 범위보다 높게 위치한다. 검증 실험에 적용된 능동제어 시스템은 하나의 참조 마이크로폰 센서와 제어 스피커 그리고 에러 마이크로폰 센서로 구성되어 있다.

이 실험에서 사용되는 능동소음제어 시스템



(a)



(b)

그림 3 관의 길이가 짧은 시스템에 대한 능동소음제어 시스템과 알고리즘 흐름도

은 크게 제어용 스피커와 에러 마이크로폰, 그리고 적응형 제어 알고리즘으로 구성되어 있다. 입력 스피커와 에러 마이크로폰 센서 사이에 음

향 전파 경로는 주요 전달 경로라 하고 제어 스피커를 통해 입력된 신호와 에러 마이크로폰 센서 사이에 음향 전파 특성 경로는 오차 경로의

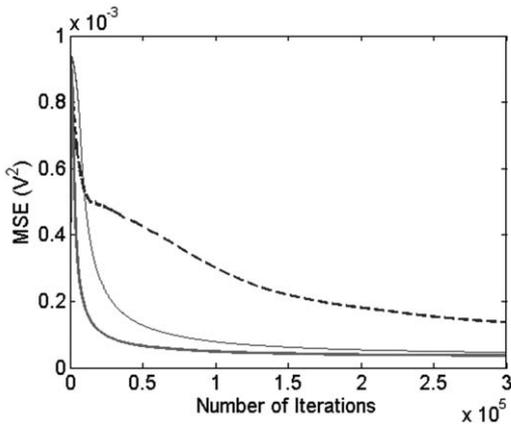


그림 4 적응제어 알고리즘에 따른 관내의 소음 오차의 비교
F FXLMS (----), FULMS (—), and FUVSSLMS (—)

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 그림 3(b)와 같이 증폭기, A/D 변환기, D/A 변환기 등의 전기 시스템을 포함한다. 주변 장치의 전달 함수는 FIR 필터에 기반을 두고 있는 최소자승법 알고리즘을 사용하여 오차 경로의 전달 함수를 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.

길이가 짧은 음향 덕트에 대한 능동소음제어 실험을 수행하기 위해 무향실 내에 1 m 길이의 아크릴 원형 덕트를 설치 후 그림 3(b)의 블록 다

이어그램과 같이 전체적인 시스템을 구성하였다. 최소자승법 알고리즘은 측정된 오차 경로 모델의 전달함수와 조합되어 FX-LMS, FU-LMS 그리고 FU-VSSLMS로 나타난다. 그리고 제안된 FU-VSSLMS 알고리즘의 수렴 속도와 안정성이 기존에 널리 사용되는 FX-LMS와 FU-LMS 알고리즘과 비교하는 형태로 실험이 수행되었다. 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. 짧은 덕트 시스템 내에서 능동소음제어를 위해 사용하기에는 적절하지 않음을 알 수 있다. 반면에 FU-LMS 알고리즘은 빠른 수렴 속도를 가지고 가변순음(frequency modulated tone sound) 성분을 줄이는데 용이함을 확인하였다. 새롭게 제안된 FU-VSSLMS 알고리즘은 보다 빠른 수렴 속도 가지고 있다. 이러한 수렴 성능의 검증을 위해 각각의 에러 신호의 절대값이 계산이 되었고 그림 4에서 볼 수 있듯이 서로 다른 경향성을 가지고 있으며 FU-VSSLMS 알고리즘을 사용하는 경우에 가장 좋은 수렴 성능을 가지고 있음을 확인하였다.

6. 맺음말

능동소음제어용 알고리즘은 오랜 기간 동안 개발되어 왔으며 현재도 개발되고 있다. 그러나 고급장비의 요구와 적응의 한계성으로 오랜 기간 동안 응용에 한계를 가져 왔다. 최근에 전산장비의 및 계측기의 급속한 발달과 가격경쟁력으로 조금씩 응용성이 접근되고 있다.

이 글이 능동소음제어를 필요로 하는 분의 한 예제가 되었으면 하는 바램이다. KSNVE