

덕트내 소음의 능동제어에 관한 연구

A Study on the Active Noise Control in Duct

이 채 봉*

Chai-Bong Lee*

요약

원형관의 덕트를 사용하여 1차원 구동원으로써 라우드스피커와 환기용 팬을 사용하여 각종 알고리즘인 X-LMS 알고리즘과 Filtered-U 알고리즘 그리고 Full-Feedback Filtered-U 알고리즘으로 구성된 DSP 적응필터를 작동시켜 덕트에 적용할 수 있는 능동소음 제어시스템 실현의 가능성에 대하여 여러 가지 실험을 하였다. 1차 구동원을 환기용 팬을 사용할 때 2차 제어용 신호가 환기용 팬에 가까이 있는 탐지 마이크로폰에 혼입되는 현상을 고려한 Full-Feedback Filtered-U LMS 알고리즘을 능동제어 시스템에 적용하여 적응제어 필터를 작동하면 시스템이 발산되지 않고 안정상태에서 주파수 범위 170-250Hz 사이에서 다른 알고리즘에 비하여 소음량이 최대치에서 10dB정도 감소되었다.

Abstract

There have been experiments dealing with the possibility of the actualization of the ANC system by means of operating the DSP adaptation filter. This filter is composed of various filters(including X-LMS algorithm, Filter-U algorithm, and Full-Feedback-Filter-U algorithm) that use ventilation fans and loudspeakers as a primary source in a circular duct as an experimental device. In this operation, the ANC system using the X-LMS algorithm was found to be more effective in reducing noise than without such system. When applying the input signal of the DSP board Full Feedback-Filtered-U algorithm system while having in mind that the additionally installed second control signal was gone through feedback and mixed into the detection microphone installed near the ventilation fan when using the first ventilation fan, the system was not emitted, but maintained stable during the operation of the control filter. At this point, noise tended to decrease at a maximum of 10dB compared to other algorithms at the frequency band of 170-250Hz.

Keywords : ANC, Filter-X LMS, Filtered-U LMS, Full-Feedback Filtered-U LMS, DSP

I. 서론

역위상의 음을 생성하여 원래의 방사음을 제거하는 능동소음 제어기술은 최근 디지털 신호처리의 하드웨어적 기술 향상과 LMS 알고리즘 개발 및 개선에 의해 연구의 급속한 진전과 실용화가 추진되고 있다. 그 중에도 덕트내를 전파하는 소음 제어에 관해서는 실용적으로 이용 가능성이 높고, 저주파대역에서는 1차원적 평면파로써 취급이 가능하므로 능동제어시스템을 간단히 구현할 수 있어, 이에 대한 실용화 연구가 활발하다.

적용 제어필터를 적용한 소음제거기의 특징은, 저주파에서 음을 제거하는 것이 유리하고, 덕트내로 음이 진행할 때

입력신호가 증가되지 않고 손실이 단순히 전파하는 것으로 종래의 수동형 저주파수 음 제거기의 특성에 대한 결점을 보완한 것이다.

1970년대에 들어 M.A.Swinbanks가 복수의 검출 마이크로폰과 2차 음원을 사용하여, 한 방향으로 진행되는 음파만을 검출, 생성하여, 발진을 방지할 수 있는 시스템을 제안한 이래 덕트내 소음제거에 대한 본격적인 연구가 시작되었다[1,2,3]. 1980년대에 들어 C.F.Ross가 디지털 신호처리기술의 발달에 따라 디지털 필터를 사용한 능동제어시스템을 실현하였다[4]. 그 후, 덕트내 음향전달특성과 2차 구동원 스피커의 방사특성 변화에 맞추어 디지털 신호처리회로의 특성을 변화시키는 능동제어가 연구의 주류가 되었다. A.Roure는 C.F.Ross의 알고리즘을 발전시켜 자체 적응 제어시스템을 제안하였다[5]. 한편, J.Tichy 등은 LMS알고리즘 등 적응 제어필터를 사용한 시스템을 실현하였다[6]. 그리고 1990년대 들어 고속 디지털 신호처

*동서대학교 정보시스템공학부

논문 번호 : 2006-3-12

접수 일자 : 2006. 6. 21

심사 완료 : 2006. 7. 21

리보드(DSP)가 TMS시리즈, ADSP시리즈 등이 보급되어 적용 제어시스템 구현이 용이하여 개량된 시스템에 관한 연구가 진행되어 개발되고 있다. 그 피드 포워드형의 능동 노이즈 제어 시스템에 있어서 문제가 되는 것은 2차 구동원 스피커에서 방사된 음이 검출 마이크로폰에 이르는 음향전달계에 음향피드백이 형성되고 있어 피드백 이득을 저감시키고, 제어시스템의 발전을 방지하는 연구가 중요한 과제이다[7].

본 연구에서는 닥트내 설치한 2차적 부가 음원인 스피커에서 방사된 음이 소음원 근방에 설치한 탐지 마이크로폰에 혼입된 것을 피하기 위하여 소프트웨어적인 방법으로 해결하는 피드백 Filterd-U나 Full 피드백 알고리즘을 사용하였다. 그리고 소프트웨어적으로 피드백을 고려하여 구현한 알고리즘으로 능동소음 제어시스템에 관해서 검토하고, 환기용 닥트내의 실험에 의해서 그 소음 제어량에 대한 유효성을 검토하였다.

II. 환기용 팬을 소음원으로 한 닥트제어용 능동소음 제어시스템

본 연구에 사용한 닥트는 양철판으로써 직경이 12.5cm, 길이가 6.7m이다. 닥트의 음원에서 방사된 음의 파장은 닥트의 직경에 비하여 아주 길어 저주파수(1200Hz이하)의 소음은 닥트내를 1차원적으로 전파하여 간다고 간주할 수 있다. 그리고 소음원에서 방사되는 음이 닥트내를 진행할 때 부가 음원인 2차 음원을 같은 진폭의 음을 역위상으로 음파를 발생하므로 구동 음원이 소거된다. 그렇지만, 실제로 2차 구동음원인 스피커에서 방사되는 음파가 1차 소음원 가까이에 설치한 탐지 마이크로폰에 혼입되어 피드백 루프가 형성되며, 능동소음 제어시스템에 하울링이 발생되어 능동소음 제어시스템이 불안정한 경우도 있다. 닥트의 능동제어 시스템의 구성도는 그림 1과 같으며 시스템을 구성하는 DSP보드는 ADSP2181을 사용하였으며 마이크로폰은 B&K4135를 이용하였다.

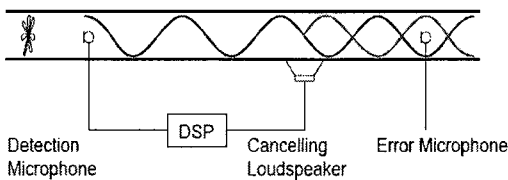


그림 1. 2차 음원의 역위상 간섭

Fig. 1. Inverse-phase interference of second source

III. 소음 저감을 위한 능동제어 알고리즘

닥트내 소음 제어시스템에 사용한 알고리즘은 Filterd-X

LMS 알고리즘을 기본으로 한다. 그러나 닥트내 부가적 음원인 제 2 라우드스피커의 음이 구동원 근방에 있는 탐지 마이크로폰에 역 혼입에 의해 그 영향을 줄이기 위하여 IIR 디지털 필터에 의한 능동소음 제어 알고리즘이 사용되었던 것은 Eriksson에 의해 발전시킨 Filterd-U LMS(FU-LMS) 알고리즘이다[8].

3.1 FX-LMS 소음제거 경로에 대한 영향

적용필터와 전달함수 C 를 경유한 신호 $y(n)$ 과 교차점에서 실제 전달계를 경유하고 희망하는 신호 $d(n)$ 에서 적용필터를 통한 신호 $y(n)$ 을 뺀 것이 오차신호 $e(n)$ 으로 그림 2에 나타내었다. 그러나 환기용 팬을 사용한 구동원 신호로써 닥트내 소음을 제어할 경우에는 역 위상을 만들기 위하여 2차의 부가 스피커로부터 임의의 거리에 있는 오차 마이크로폰에 의해서 수음될 것이다. 그림 2의 결합점은 부가적 라우드스피커의 출력과 닥트내의 1차 소음을 나타내었다. LMS 필터적용 과정에서 $h(n+1) = h(n) - \mu * x'(n) * e(n)$ 으로 시스템의 임펄스 응답을 구한다. 그러므로 입력신호 $e(n)$ 은 1차신호원 $d(n)$ 과 출력 $y(n)$ 으로 구성될 것이다. 필터링 된 전달함수 $C(z)$ 는 2차 경로라고 부르는 $y(n)$ 에서 $e(n)$ 까지의 소음제거 경로를 대표하며, 이 전달함수는 출력신호 $y(n)$ 을 계산한다.

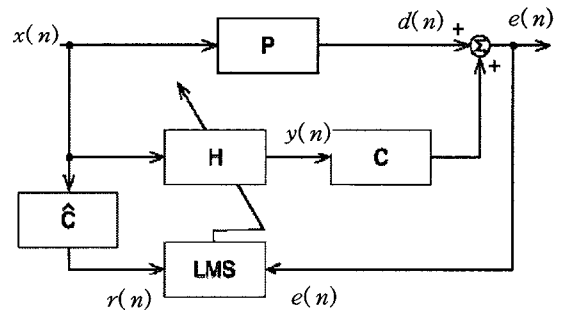


그림 2. 신호제거 시스템

Fig. 2. Removal system of signal

통상적으로 사용하는 LMS 알고리즘을 이용한 능동소음 제어기의 소음제거 경로에 대한 소음제거량은 일반적으로 불안정한 경향으로 나타난다. 실제의 전달계 $C(z)$ 때문에 입력신호 $x(n)$ 이 오차신호 $e(n)$ 와 입력신호 $x(n)$ 은 시간 차이가 생긴다. 능동제어 시스템의 소음제거 경로에서 $C(z)$ 의 효과를 보상하기 위한 두 가지 주요 방법 중 하나는 하나의 필터값이 이전에 필터 $\hat{C}(z)$ 를 갖는 입력신호 $x(n)$ 을 필터하는 방법과 $\hat{C}(z)$ 의 값을 가능한 정확한 값으로 $C(z)$ 의 소음제거 경로를 모델링하는 것이다. 적응 제어 필터링은 오차신호 $e(n)$ 과 입력신호 $x(n)$ 의 정확한 추정은 할 수 있는 알고리즘을 Filterd-X LMS 알고리즘

(FX-LMS)이라고 부른다(그림 3 참조)[9].

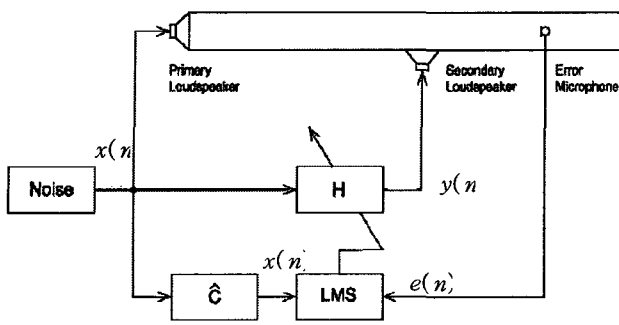


그림 3. Filtered-X LMS 알고리즘
(입력신호 : 라우드스피커)
Fig. 3. Filtered-X LMS algorithm
(Input signal : loudspeaker)

3.2 Filtered-U LMS(FU-LMS) 알고리즘

FX-LMS 알고리즘의 안정적인 작동은 입력신호가 소음제거용 2차 라우드스피커에서 방사되는 음으로부터 독립적이어야 한다. 그러나 FX-LMS 알고리즘의 입력신호로써 측정된 검출신호가 탐지용 마이크로폰에 의해 수음될 경우 입력신호는 소음제거 2차 라우드스피커의 음을 이미 포함되는 문제가 생긴다. 소음제거용 2차라우드스피커에서 음파가 결합된 음향피드백을 음향신호 전달계로 나타낼 수 있다. 본 연구에서 주요 알고리즘으로 선정된 FU-LMS 알고리즘은 전체 시스템의 일부분으로 제어하는 피드백에 대한 고려와 적응 IIR 필터 문제점을 한 부분으로 처리하는 것으로, FU-LMS 알고리즘의 피드백 보상회로의 개념도와 FU-LMS 알고리즘[8]은 그림 4와 같다. IIR필터의 기능은 그림에서 2개의 부분으로 되어 있으며 $y(n)$ 에서 $u(n)$ 에 이르는 $F(z)$ 와 $y(n)$ 에서 $A(z)$ 끝단에 이르는 $B(z)$ 로 구성된다. FIR필터인 $A(z)$ 와 IIR필터의 $B(z)$ 는 LMS알고리즘에 의해 하중계수를 계산한다. 그림에서 IIR필터의 전달함수를 구하면 식 (1)과 같이 된다.

$$H_{FULMS}(z) = \frac{A(z)}{1 - B(z)} \quad (1)$$

IIR필터 $B(z)$ 가 적응하는 과정에서 최적 필터 전달함수의 공통 분모는 다음 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned} 1 - B(z) &= P(z)F(z) - C(z), \\ B(z) &= 1 - P(z)F(z) + C(z) \end{aligned} \quad (2)$$

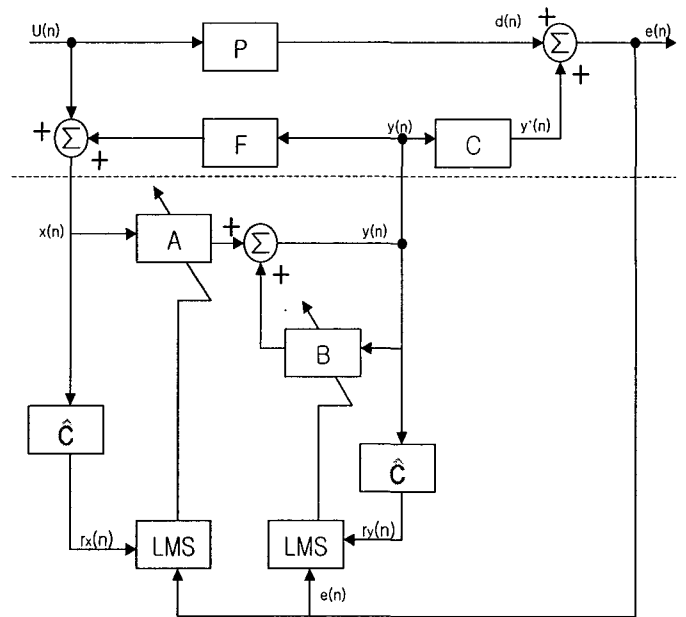


그림 4. FU-LMS 알고리즘을 적용한 시스템
Fig. 4. System applying the FU-LMS algorithm

3.3 Full-Feedback Filtered-U LMS(FFFU-LMS) 알고리즘

FFFU-LMS 알고리즘의 피드백 보상회로의 개념도와 알고리즘을 그림 5에 나타내었다[10,11]. FU-LMS와 FFFU-LMS의 차이점은 피드백 되는 필터 부분이 $B(z)$ 에서 입력신호까지 접속점에 있다. IIR필터와 FIR필터의 교차점은 FU-LMS 시스템에서는 $A(z)$ 를 건너주고 난 이후에 있고 FFFU-LMS에서는 교차점이 $A(z)$ 를 통과하기 이전에 있다. 이것에 대한 전달함수는 식(3)과 같다.

$$H_{FFFULMS}(z) = \frac{A(z)}{1 - A(z)B(z)} \quad (3)$$

2개의 LMS알고리즘의 필터정보를 다시 부분적으로 나누어 $A(z)$ 와 $B(z)$ 의 교차점에 있다면 $B(z)$ 에서의 적응을 위해 입력신호도 정확한 결과를 얻기 위해 필터 전달함수 $A(z)$ 를 복사에 의해 필터링한다. 그림 5에서 음원 스피커로부터 탐지 마이크로폰에 이르는 음향전달계의 임펄스 응답 \hat{C} 와 2차 음원 스피커로부터 오차 마이크로폰에 이르는 음향전달계의 임펄스 응답 \hat{C} 는 닥트네 방사 신호제거에 앞서 그림 6과 같이 측정하였다.

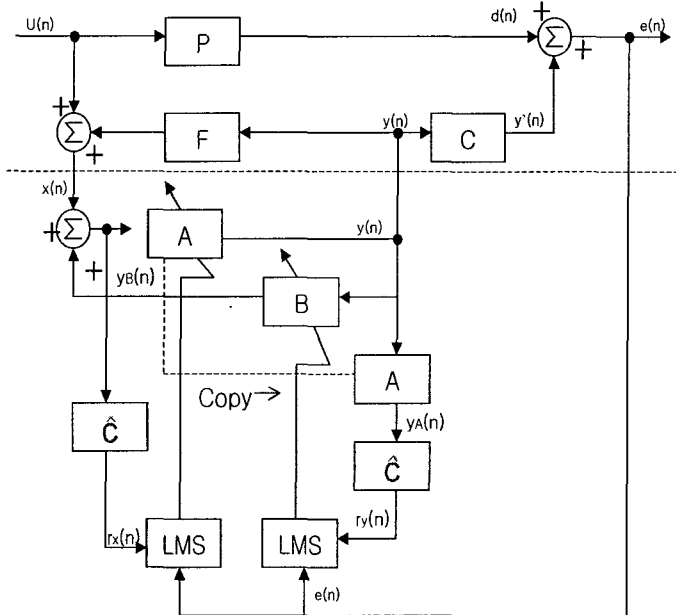


그림 5. FFFU-LMS 알고리즘을 적용한 시스템
Fig. 5. System applying the FFFU-LMS algorithm

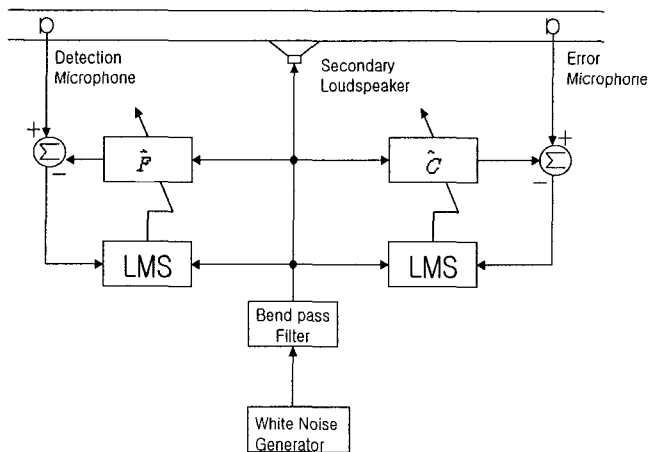


그림 6. 임펄스 응답 측정
Fig. 6. Measurement of impulse response

3.4 능동제어 시스템의 감음량

광대역 랜덤 음을 대상으로 한 능동 소음 제어시스템을 그림 7과 같이 나타내었다. 그림에서 2차 음원으로부터 방사되는 음이 1차 소음원으로 부터 닥트내에 전파하여 온 음과 역 위상이 되도록 신호처리 회로의 특성을 정할 필요가 있다. 이 경우 닥트내 음향전파 특성이나 마이크론, 라우드스피커의 음향특성을 그림으로부터 다음과 같은 식(4),(5)를 얻었다.

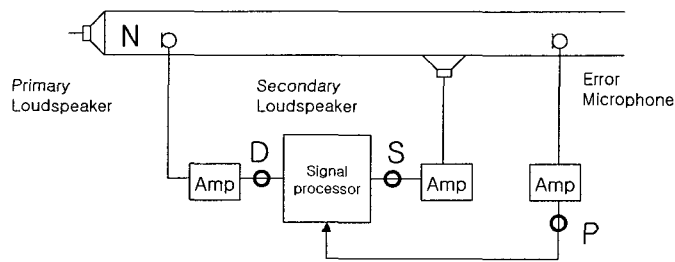


그림 7. 능동제어 시스템
Fig. 7. Active control system

그림에서 N과 S는 1차 소음원과 2차 소음원 앰프의 입력을 나타내고 D와 P는 탐지 마이크론과 오차 마이크론의 앰프 출력을 나타낸다. 여기에서 능동 시스템 동작시는 식 (4)과 같이 되고 정지시에는 식 (5)와 같이 된다.

$$S = T_a D$$

$$D = H_{SD} \cdot S + H_{ND} N$$

$$P_{on} = H_{SP} \cdot H_{NP} N \tag{4}$$

$$P_{off} = H_{NP} \cdot N \tag{5}$$

여기에서

T_a : 신호처리 회로의 전달특성, H_{ij} : $i \sim j$ 까지의 전달특성, P_{on}, P_{off} : 시스템의 동작과 정지시의 마이크론의 출력신호를 의미하며 식 (4)과 (5)를 정리하면 다음 관계식이 얻어진다.

$$\frac{P_{on}}{P_{off}} = \frac{H_{DP} - (H_{DP}H_{SD} - H_{SP})T_a}{H_{DP}(1 - H_{SD})T_a} \tag{6}$$

$P_{on} = 0$ 이 되기 위해 신호처리 회로의 전달특성 T_a 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$H_{Dp} = \frac{H_{NP}}{H_{ND}}$$

$$T_a = \frac{H_{DP}}{H_{DP}H_{SD} - H_{SP}} \tag{7}$$

여기에서 H_{Dp} 는 시스템 정지시 1차 소음원만 동작중인 D와 P사이의 전달함수이고 계측 가능하다. 그리고 식 (7)로부터 다음 식이 성립된다.

$$T_a = \frac{H_{DP}}{H_{dp} - H_r} T_a \tag{8}$$

$$H_r = \frac{P_{on}}{D} = H_{DP} - (H_{DP}H_{SD} - H_{SP})T_a \tag{9}$$

여기에서 H_r 은 식 (9)과 같으며 시스템 작동시의 D와 P사이의 전달함수이며 계측이 가능하며 0에 가깝도록 신호처리 회로의 목표물 특성을 최적화 할 수 있다. 그러나 식 (9)에 T_a 가 포함되어 있기 때문에 본 연구에서는 T_a 를 대신하여 1 스텝 전에 구한 T_d 를 대입하고 다음식의 관계에서

신호처리 회로를 최적화 하였다.

$$T_d^{(j)} = \frac{H_{DP}}{H_{DP} - H_r^{(i-1)}} T_d^{(i-1)} \quad (10)$$

여기에서 i 는 신호처리 회로의 전달특성의 갱신횟수이고 자동처리가 가능하다. 신호전달 회로는 T_d 의 특성을 만족하도록 작성되어 있지만 전달특성 T_a 와 일치하지 않는다. 그러므로 감음량 ATT(dB)는 다음 식으로 나타내었다.

$$ATT = -20 \log \frac{P_{on}}{P_{off}} = -20 \log \left(\frac{1 - T_a/T_d}{1 - T_{SD}T_a} \right) \quad (11)$$

IV. 닥트내 소음량 제거 실험결과

닥트내 소음 제거량 측정 실험은 Filtered-X LMS 알고리즘과 피드백 Filtered-U LMS 알고리즘에 의한 소음 제거 실험 결과는 그림 8, 그림 9, 그리고 그림 10에 나타내었으며 앞에서 기술한 각종 알고리즘에 대한 주파수상 오차 마이크로폰 부근에서 측정된 소음 제거량을 나타냈다. 그림 8은 구동 소음원을 1차 음원인 라우드스피커로 하고, DSP보드의 입력신호 $x(n)$ 은 라우드스피커 입력단 신호로 각 알고리즘에 대한 주파수 스펙트럼을 나타냈다. 3가지 실험한 알고리즘에 대한 실험 결과는 X-LMS, FU-LMS, FFFU-LMS에 대하여 각각 나타내었다. 여기서 3가지 실험한 능동소음 제어의 알고리즘은 매우 넓은 주파수 범위에서 안정적으로 동작되는 것을 확인 할 수 있었다.

두 번째 실험인 그림 9은 적응 알고리즘의 입력신호인 $x(n)$ 을 구동 소음원을 라우드스피커로 하고, DSP보드의 입력신호는 구동음원인 라우드스피커 근방에 설치한 탐지 마이크로폰을 사용하였을 때 각 알고리즘에 대한 소음 제거량은 오차 마이크로폰에 수음한 신호의 주파수상 진폭스펙트럼을 나타낸 것이다. 탐지 마이크로폰의 신호는 소음 제거용 2차 라우드스피커의 구동신호가 음향 피드백에 대한 문제를 내포하고 있으며 단순한 FX-LMS 알고리즘과 FU-LMS와 FFFU-LMS에서 파형으로 구분하였는데, 주파수 30Hz, 60Hz, 90Hz에서 피크 값이 약간 높게 나타났다.

그림 10은 닥트내부의 구동 소음원으로 환기용 팬을 사용하고 DSP보드의 입력신호 $x(n)$ 은 탐지용 마이크로폰을 사용하였을 때 각 알고리즘에 대한 소음제거량은 오차 마이크로폰으로 수음한 신호를 FFT하여 주파수상 진폭스펙트럼을 나타낸 것으로, 340Hz 주파수에서 스펙트럼상 주변의 피크 값에서 잡음이 감소되지 않았다. 능동소음 제어시스템의 구조상에서 최고의 결과 값은 회전 팬에 의한 영향과 닥트내의 벽면의 잡음 전달에 의해 생기는 영향도 있다. 각종 적응 알고리즘에 의해 잡음을 제거하기 위해 구동원으로써 닥트에 효과적인 능동소음 제어시스템 설치와 강한 진동원으로 부터 파장이 짧은 음파는 수동적 제어

가 필요하다.

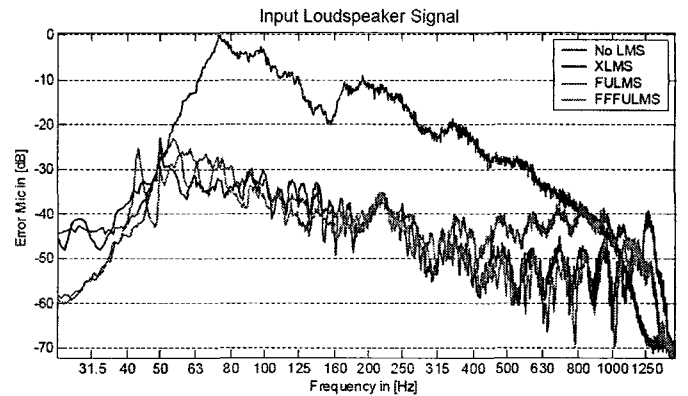


그림 8. 구동원: 라우드스피커, DSP보드 입력단 신호: 라우드스피커 입력단 신호

Fig. 8. Source: loudspeaker, DSP board input signal: loudspeaker input signal

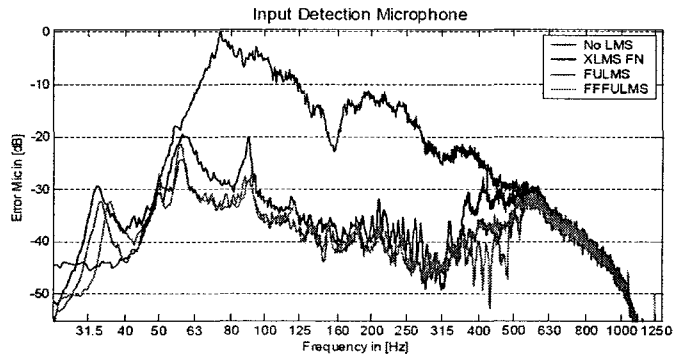


그림 9. 구동원: 라우드스피커, DSP보드 입력단 신호: 탐지 마이크로폰

Fig. 9. Source: loudspeaker, DSP board input signal: detect microphone

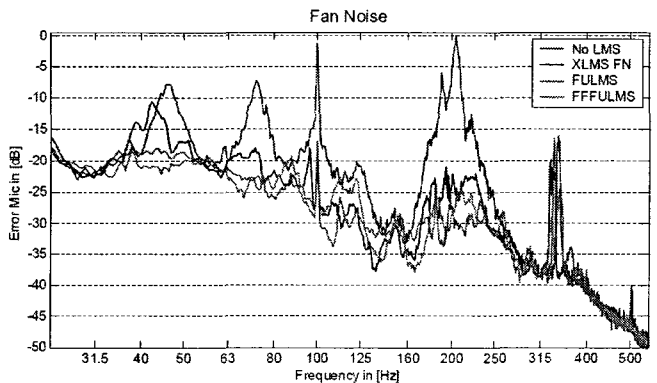


그림 10. 구동원: 환기용 팬, DSP보드 입력단 신호: 탐지 마이크로폰

Fig. 10. Source: ventilation fan, DSP board input signal: detect microphone

V. 결론

1차원 구동원으로써 라우드스피커와 환기용 팬을 사용하여 각종 알고리즘인 X-LMS 알고리즘과 Filtered-U 알고리즘 그리고 Full-Feedback Filtered-U 알고리즘으로 구성된 DSP 적응 필터를 작동시켜 닥트에 적용할 수 있는 능동소음 제어시스템의 실현에 가능성 대해 여러 가지 실험을 하였다.

구동음원으로써 협대역 백색 소음을 라우드스피커로 방사할 때 닥트를 경유하는 신호는 물론 부가적 2차 제어신호원인 라우드스피커의 입력단 신호를 만드는 DSP 보드의 입력단 신호가 1차 신호원인 라우드스피커의 입력단 신호나 1차 신호원 근방에 설치한 탐지 마이크로폰에 수음한 신호를 사용하면 Filtered-X LMS 알고리즘으로 능동소음 제어시스템을 구현하여 작동했을 때는 그렇지 않을 때 보다 소음감소 효과는 아주 안정적으로 170Hz에서 450Hz까지의 주파수대역에서 10~15dB 감소되었다.

그러나 1차 구동 소음원을 환기용 팬일 때 팬 회전에 의한 음파는 닥트관을 경유하여 출력단까지 도달하지만 DSP보드의 입력단 신호는 환기팬 근방에 설치한 탐지용 마이크로폰으로 수음한다. 이때 DSP보드내에서 만들어져 2차 제어용 라우드스피커를 구동 했을 때 그 음은 닥트내에서 일부는 1차 음원 쪽으로 케환하고 일부는 닥트 출력단 쪽으로 전파한다. 2차 제어용 음원에서 구동원 쪽으로 케환한 신호는 DSP보드의 입력단 신호로 사용하고 있는 탐지용 마이크로폰에 혼입되는 상태로 필터 X-LMS 알고리즘은 케환 신호로 인하여 시스템이 불안정하다. 1차구동원을 환기팬을 사용할 때 2차 제어용 신호가 탐지 마이크로폰에 혼입되는 현상을 고려하여 만들어진 Filterd-U LMS 이나 Full-Feedback Filtered-U LMS 알고리즘을 능동소음 제어시스템에 적용하여 적응 제어 필터를 작동하면 시스템이 발산되지 않고 안정 상태에서 주파수범위 170-250Hz사이에 나타나는 최대치에서 10dB의 소음량이 감소되는 경향으로 나타났다.

산업 현장에서 실제로 사용하는 닥트의 신호원으로써 환기용 팬이 작동될 때 소음 감소량 증대에 대한 연구는 아직도 다양한 형태로 연구되고 있어 향후 이 분야의 해결하여야 할 문제점이다.

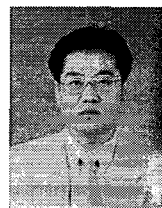
감사의 글

본 연구를 위해 많은 도움을 주신 배 현기 박사님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1]M.A. Swinbanks, "The active control of sound propagation in long ducts", J.Sound Vib. 27, pp. 411-436, 1973.

[2]J.H.B. Poole and H.H. Levenhall, "An experimental study of Swinbanks Method of active attenuation of sound in ducts", J.Sound Vib. 58, pp. 333-345, 1978.
 [3]G. Canevet, "Active sound absorption in an air conditioning duct", J.Sound Vib. 58, pp. 333-345, 1978.
 [4]C.F. Ross, "An algorithm for designing a broadband active sound control system", J.Sound Vib. 80, pp. 373-380, 1982.
 [5]A. Roure, "Self-adaptive broadband active sound control system", J.Sound Vib. 101, pp. 429-441, 1985.
 [6]J. Tichy, G.E. Waranaka, and L.A. Poole, "Active noise reduction system in ducts", ASME84-WA/NCA 15, pp. 167-178, 1984.
 [7]Y. Shimada, Y. Nisimura, T. Usagawa, and M. Ebata, "An adaptive algorithm for periodic noise with secondary path delay estimation", J.A.S.Jpn(E) 19, 5, pp. 363-372, 1998.
 [8]L.J. Eriksson, "Development of the filtered-U algorithm for active noise control", J.A.S.A Vol. 89(1), pp. 227-265, 1991.
 [9]G. Chen, M. Abe, and T. Sone, "Evaluation of the convergence characteristics of the Filtered-X LMS algorithm in the frequency domain", J.A.S.Jpn(E) 17, 6, pp. 295-303, 1996.
 [10]Crawford, D.H. Stewart, and E. Toma, "A novel adaptive IIR filter for active noise Cancellation", Processing of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol.3, pp. 1629-1632, 1996.
 [11]H. Takahasi, Y. Suzuki, S. Takane, and F. Asano, "A new method for active suppression of the reflected sound waves based on the Kirchhoff-Helmholtz integral equation with state feedback control", Proc. AC-TIVE 2002, pp. 167-178, 2002.



이 채 봉(Chai-Bong Lee)
 1985년 동아대학교 전자공학 (공학사)
 1986년 일본 문부성 국비유학생
 1988년 일본 동북대학(TOHOBU) 전기 및 통신공학 전공 석사
 1992년 일본 동북대학(TOHOBU) 전기 및 통신공학 전공 박사
 1993년 ~ 현재 동서대학교 정보시스템공학부 부교수
 관심분야: 소음 · 진동, 디지털 신호처리