

# 능동소음제어를 이용한 효과적인 팬소음의 제어

엄 승 신\*, 신 인 환\*, 이 수 갑\*\*

서울대학교 기계항공공학부

공력소음 및 소음제어 연구실

## Effective Fan Noise Control Using Active Noise Control

Seung-Sin Eom\*, Inwhan Shin\* and Soogab Lee\*\*

Seoul National University School of Mechanical and Aerospace Engineering

AeroAcoustics & Noise Control Lab.(AANCL)

sinni@chollian.net, encre@gong.snu.ac.kr, solee@plaza.snu.ac.kr

### 요 약

본 논문은 기계장치에서 발생하는 소음 중 불필요한 소음만을 제거하고 실제로 필요한 소음(경고음 작동음 등)의 정보를 가진 소리는 제거하지 않는 소음 제어 방법을 Active Noise Control(ANC)를 이용하여 구현하였다. 소음원으로는 축류팬(Axial Fan)을 사용하였으며 여기서 발생하는 BPF를 효과적으로 제어할 수 있는 Feedback Active Noise Control 방식을 사용하였으며 적응 알고리즘으로 Filtered-X LMS 알고리즘을 사용하였다. 실험은 두 가지 Case(덕트 내 전파 소음, 외부 자유 음장 방사 소음)로 실행되었다. 제거하고자하는 대상은 BPF 소음이며 이 이외의 주파수에는 영향을 주지 않게 하기 위하여 대역필터를 이용하였다. 또한 실제 인간이 느끼는 소음 감소 효과를 알아보기 위해 Loudness로 제어 전후의 결과를 비교하였다. 실험 결과 BPF만 감소시키고 BPF 이외의 주파수에는 영향을 주지 않음을 알 수 있었으며 6.7dB의 Loudness level의 감소 효과를 얻어, 제어하고자 하는 주파수만을 제어하였으며 음압뿐 아니라 인간이 느끼는 소음도에서도 효과적으로 감소할 수 있음을 확인할 수 있었다.

informations of the necessary noise(warning sound, operating sound etc.) for the induced noise of the mechanical system. In this paper, the noise source is axial fan, and the Feedback Active Noise control method that can effectively control BPF generated from the axial fan is used, and the Filtered-X LMS algorithm for adaptive algorithms is used. The experiments are executed for two case(propagating noise in the duct, emission noise for exterior free field). The part to be removed is BPF noise, and the band-pass filter not to effect to the other frequencies is used. Also, to investigate the effect of the noise reduction for human, we are compared with the results that are controlled for using Loudness before and after. As a results, we are certified that the BPF is decreased only and frequencies outside of BPF are not affected, and we acquire the reduction effects of 6.7 dB Loudness Level, then the frequency to be removed is controlled. Therefore, we can be certified that sound pressure as well as loudness can be effectively decreased for human sound quality

### ABSTRACT

This paper describes Active Noise Cancellation/Control (ANC) method that removes the information of the unnecessary noise and doesn't remove the

### 1. 서 론

소음 제어 방법은 수동적 제어(Passive Noise Control)과 능동적 제어(Active Noise Control)로 나눌 수 있다. 능동적 제어(ANC)는 수동적 제어에 비하여 저주파 소

음을 효과적으로 제어할 수 있으며 또한 유동에 영향을 주지 않고 적용이 가능한 방법이다. ANC는 음파의 중첩현상을 이용하여, 발생한 소음과 크기가 같고 위상이 반대인 음파를 발생시켜 두 음파의 상쇄간섭을 유도하는 것은 기본적인 개념이다. 이러한 ANC의 응용은 주로 소음을 줄이는 방향으로 연구되었다. 하지만 ANC의 디지털 신호 처리 방식은 필요하지 않은 소음은 줄이고 필요한 소음은 유지하는 선별적인 제어가 가능하다. 기계 장치에서 발생하는 소음은 줄여야만 하는 소음도 있으나 기계의 작동을 알리고, 동작 상태를 판단할 수 있는 제거할 대상이 아닌 소음도 함께 존재한다. 또한 Noise Quality 측면에서 더 높은 Quality를 가지는 소음은 Sharpness, Fluctuation, Roughness 등 다양한 요인에 의해 결정되어 진다. 그러므로 발생하는 소음 중 일부는 제거하고 일부는 유지 또는 감소시키는 역할을 ANC를 이용해서 구현할 수 있다. 소음 감소뿐 아니라 Noise Quality를 높이는 소음 제어 방법으로 ANC를 효과적으로 사용할 수 있다.

본 연구에서는 소음 제어 방법으로서의 ANC와 Noise Quality를 높여주는 ANC의 두 가지 역할을 할 수 있는 ANC 시스템을 구현하기 위하여 일정 주파수 대역만을 ANC를 이용하여 제어하고 다른 주파수 대역은 그대로 유지하는 실험을 수행하고 수행결과를 Loudness를 바탕으로 비교하여 인간이 느끼는 실제적인 소음 감소치의 감소효과를 살펴보고자 한다.

## 2. 소음원

실험에 사용되는 소음원으로는 가장 광범위하게 사용되는 팬을 사용하였다. 팬소음은 BPF주변의 대역에서 강한 소음을 발생시켜 대역 제어가 용이하고 또한 다른 소음 제어 방법보다는 ANC의 적용이 효율적인 소음원이다.

팬은 작은 압력증가만으로 많은 양의 기체를 운반하거나 배출하는 장치로 수송장치나 발전기에 사용하는 터보 엔진, 산업용 HVAC(Heating, Ventilation, Air Conditioning) 장치에서 건물의 공조기 및 가전제품까지 다양한 용도로 사용되고 있다. 팬소음의 제어는 일반적으로 공기 통로의 라이닝(lining) 처리나 소음기(silencer), 공명기(resonator)와 같은 수동적 제어 방법이 사용되고 있으나 이러한 방법은 유동저항을 유발하여 팬의 효율을 감소시키고 부피가 증가하며 팬의 회전에 의해 발생한 저주파 소음에 대하여서는 비교적 비효율적이다.

팬에 의해 발생하는 음압은 광대역 소음(broadband noise)과 이산 소음(discrete tone) 두 부분의 합으로 이

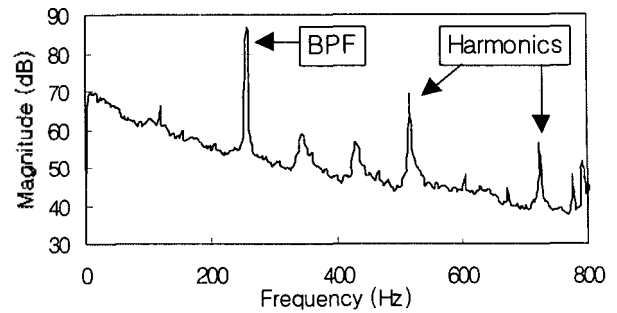


Fig. 1 Spectral Analysis of Fan Noise

루어져 있다. 광대역 소음은 블레이드 압력을 비정상적으로 만드는, 블레이드 표면에서의 경계층에서 발생하는 난류(turbulence)와 팬의 중심부 및 지지대에 의해 발생한 교란에 의해 발생한다. 그리고 이산 소음(discrete tone)은 블레이드가 공기를 가로지름에 의하여 발생한 유동의 주기적인 교란에 의해 발생된다. 대칭적으로 균일하게 분포되어 있는 블레이드를 가진 팬에서 발생하는 이산 소음 중 가장 낮은 음의 주파수를 BPF(Blade-Passing Frequency)라고 부른다. BPF는 팬의 회전 주파수에 블레이드 수를 곱한 값이다. 이산 소음은 BPF와 그 조화 성분(harmonics)으로 이루어져 있다.<sup>(1)</sup>(Fig.1참조)

대부분의 팬소음의 스펙트럼을 보면 광대역 소음은 이산 소음에 비해 매우 작은 값이므로 무시할 수 있으며 이산 소음 중에서도 BPF가 그 하모닉 성분과 비교하여 매우 크므로 전체 소음 레벨(Sound Pressure Level, SPL)에 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 그러므로 제어하고자 하는 대상을 BPF로 한정하여도 전체 SPL의 감소가 이루어진다.

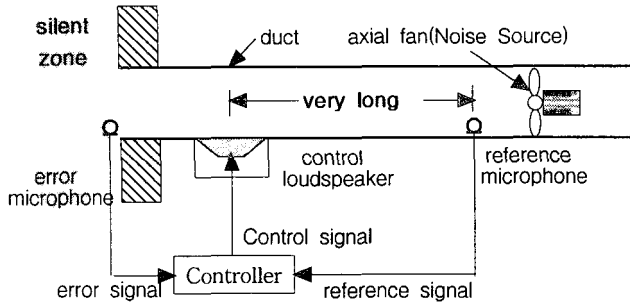
팬 중에서 축류팬의 경우 BPF 성분이 아주 강하게 나타나고 BPF가 주로 저주파 쪽에서 발생하므로 Feedback 능동 소음 제어를 사용하면 효과적으로 전체 소음 레벨을 낮추는 것이 가능하다.

## 3. 팬소음의 능동소음제어

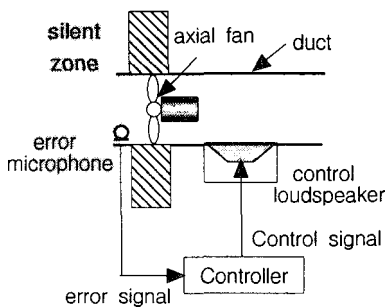
능동 소음 제어(Active Noise Cancellation/Control, ANC)는 최근에 활발한 연구가 되고 있는 분야로 기존의 수동 소음 제어(passive noise control)의 단점을 보완하는 수단으로 사용된다. 능동소음제어는 음파의 중첩현상을 이용하여, 발생한 소음과 크기가 같고 위상이 반대인 음파를 발생시켜 두 음파의 상쇄간섭을 유도하여 소음을 줄이는 방법이다.

기존의 능동 소음 제어 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데 그 하나는 전통적인 feedforward 제어 방식이

고 다른 하나는 feedback 제어 방식이다.(Fig.2 참조)



(1) Feedforward Active Noise Control



(2) Feedback Active Noise Control

Fig. 2 Feedforward ANC and Feedback ANC

feedforward 제어 방식은 광대역 소음과 이산 소음을 모두 제어할 수 있으나 참조 마이크로폰으로부터 입력 되는 소음이 제어 스피커의 위치까지 도달하기 전에 입력 소음에 대한 제어음이 발생해야 한다는 인과조건 (causality condition)을 만족시켜야 한다. 이를 위해서는 참조 마이크로폰(reference microphone)과 제어 스피커(control loudspeaker)의 거리가 어느 정도 길어져야 하며 이 조건을 만족시키지 않으면 광대역 소음의 제어는 불가능하다.<sup>(2)</sup> 또한 제어음이 다시 참조 마이크로 입력 되는 음향 계환(acoustic feedback)이 발생하므로 이를 방지하기 위해서 더 많은 계산량이 필요하다. 이에 비해 Feedback 제어 방식은 주기적인 소음만을 제어할 수 있다는 제한 조건이 있으나 참조 마이크로폰(reference microphone)이 필요 없어 음향 계환도 없으므로 비교적 장치가 간단하고 계산량 또한 적다.<sup>(2)</sup>

팬소음은 주요 소음이 BPF이므로 제어 대상을 BPF로 한정한다면 feedforward 제어 방식보다는 feedback 제어 방식이 적당하다고 할 수 있다. 이 뿐만 아니라 Feedback 제어 방식은 앞서 말한 참조 마이크로폰과 제어 스피커(control loudspeaker) 간의 거리를 어느 정도 유지할 필요가 없으므로 길이에 상관없이 소형 장치에 적용이 가능하다는 장점이 있다. 또한 제어 음원의 위치

가 소음원의 앞 쪽 뿐만 아니라 뒤쪽에 위치하는 것도 가능하다.<sup>(3)</sup>

Feedback ANC에서는 오차 마이크로폰으로부터 들어 온 오차 신호(error signal)와 제어 스피커로 보내어지는 제어 신호로 참조 신호(reference signal)를 만들어 낸다. 이런 참조 신호를 만들기 위해 선형 예측법(linear prediction method)을 사용하였다.<sup>(4)</sup> 식(1)은 선형 예측법에서 참조 신호를 구하는 식이고 Fig.3은 블록 선도이다.

$$x(n) \cong \hat{d}(n) = e(n) + \sum_{k=0}^{L-1} \hat{s}_k y(n-k) \quad (1)$$

$\hat{d}(m)$ : 시간  $m$ 에서의 제어하고자 하는 소음 신호의 예측값  
 $x(m)$ : 시간  $m$ 에서의 참조 신호  
 $e(m)$ : 시간  $m$ 에서의 오차 신호  
 $y(m)$ : 시간  $m$ 에서의 제어 신호  
 $\hat{s}_k$ : 오차 경로의 충격응답함수를 모델링한 필터계수의  $k$ 차항

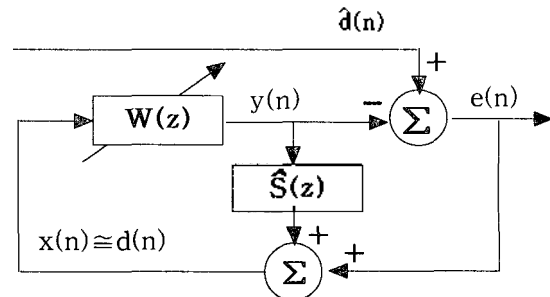


Fig. 3 Linear Prediction Method

적용 알고리즘으로는 가장 보편적으로 사용되는 Filtered-X LMS 알고리즘을 사용하였다. Filtered-X LMS 알고리즘은 오차경로(error path, 제어기에서 계산한 출력값이 D/A 변환기, 음향 증폭기, 스피커, 공간전파, 마이크로폰, 신호 조절기, A/D 변환기를 거쳐 계산 입력값으로 들어오기까지의 경로)를 고려한 적응 알고리즘으로 블록 선도는 Fig.4와 같다.

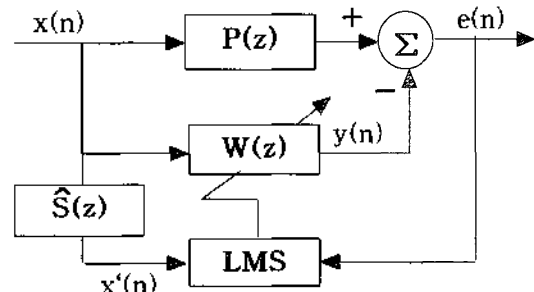


Fig. 4 Filtered-X LMS Algorithm

이 적응 알고리즘은 다른 알고리즘에 비하여 계산이 간단하고 적응 속도가 빠르며 안정성이 큰 장점을 가지고 있다. 이 적응 알고리즘의 최종적인 계산식은 식(2)와 같다.

$$w_k(n+1) = w_k(n) + \mu x'(n-k)e(n) \quad (2)$$

$$(k=0,1,\dots,L-1)$$

$w_k(m)$  : 시간  $m$ 에서의  $k$ 차 디지털 필터 계수  
 $x'(m)$  : 시간  $m$ 에서의 오차 경로를 통과한 참조 신호  
 $e(m)$  : 시간  $m$ 에서의 오차 신호  
 $\mu$  : LMS 알고리즘의 수렴 계수  
 $L$  : 필터의 길이

오차 경로(  $\hat{S}(z)$  ) 모델링을 위해서 백색잡음(white noise)을 발생시켜 Filterd-X LMS 알고리즘을 이용하여 충격 응답 함수(Impulse Response Function)를 구하는 방법을 사용하였다.<sup>(5)(6)</sup> 제어하고자 하는 소음만을 제거하기 위해서는 해당 소음을 다른 소음과 분리하여야 한다.

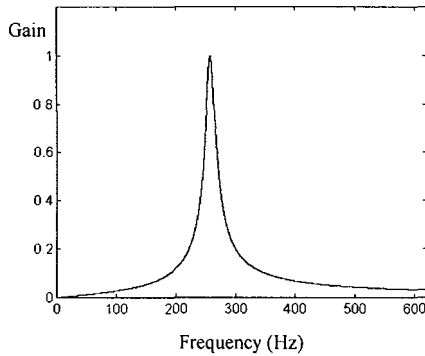


Fig. 5 Frequency Response Function of Narrow Band-Pass Byquad Active Filter

이를 위해 협대역 필터(narrow Band-Pass Filter)를 사용하였다. 협대역 필터의 통과 대역은 BPF주파수를 중심으로 수 Hz정도의 아주 좁은 대역이 되도록 필터를 설계하였다.<sup>(7)</sup> 설계한 협대역 필터의 형태는 Biquad Active Filter이고 주파수 응답 함수(Frequency Response Function)는 Fig. 5와 같다. 필터를 거친 신호가 제어기로 입력되므로 BPF 성분 외의 광대역 소음이나, 팬소음이 아닌 주위 다른 곳에서 발생한 소음은 이 필터를 거치면서 모두 제거되어 순수한 BPF 성분만이 제어기로 입력되어 진다.

#### 4. Loudness

음압은 소음도를 평가하기 위한 물리적인 양일 뿐 실제 인간이 느끼는 소음도와는 차이가 있다. 이러한 차이를 줄이기 위한 것으로 Weighting Function을 사용하나 주파수에 따른 가중치만 주었을 뿐 이 또한 실제 소음도와는 차이가 있다.

Loudness는 사람의 청각기관의 반응과 실험을 바탕으로 한 소음도의 척도로 주파수뿐만 아니라 해당 주파수 대역의 Level에 의해서 가중치가 다르게 주어지므로 실제 인간이 느끼는 소음도와 유사한 소음 척도로 사용된다. ISO에서 규정한 Loudness, Loudness level의 계산은 아래 표와 같다.

Method	Quantity measured		Band width of analysis	Sound field
	loudness	loudness level		
A	sones(OD)	phons(OD)	octave	diffuse
B	sones(GD)	phons(GD)	1/3octave	diffuse free
	sones(GF)	phons(GF)		

표 1 Designations for calculating loudnesses and loudness levels

소음원으로 사용하는 팬소음은 복잡하고 피크가 발생하는 형태이며 자유 음장 조건을 만족하므로 Method B의 GF를 이용하여 ISO 532에 의해 계산하였다. 계산시 사용하는 음압데이터는 calibration을 통해 조절한 뒤 사용하였다. calibration은 B&K 4228을 이용하여 250Hz, 124dB의 소음원을 이용하여 수행되었다.

#### 5. 실험 방법 및 결과

실험 장치는 Fig. 6과 같이 구성되어 있다. Feedback 제어 시스템의 구성을 위하여 제어 스피커와 오차 마이크로폰을 설치하였고 팬은 관의 끝단에 위치시켰다. 마이크로폰에서 입력된 신호는 협대역 필터를 거쳐 신호 조절기(Signal Conditioner)인 B&K NEXUS를 지나 DSP(Digital Signal Processor) 모듈로 입력되어 진다. DSP 모듈은 실시간 신호 처리를 위하여 TMS320C25<sup>(8)</sup>를 사용하였으며 2채널의 A/D 변환기와 2채널의 D/A 변환기를 포함하고 있다. DSP 모듈에서 출력된 신호는 음향 증폭기(audio amplifier)인 Inkel PA-4000을 거쳐 제어 스피커로 보내어 진다. 실험용 관은 두께 2mm, 직경 11.5cm의 PVC 파이프를 이용하여 제작하였으며 덕트의 끝단에 냉각용 팬을 설치하고 출구면에 Baffle을 설치하였다. 마이크로폰의 경우 협대역 필터의 성능을 평가하기 위하여 방풍막(windscreen)을 달지 않은 상태로 설치하였다.

실험은 두 가지 경우에 대하여 수행하였다. Case I은 팬에서 발생한 소음이 관을 통하여 전파되는 것을 막기 위한 실험으로 마이크로폰을 관 내부의 중심에 설치하였다. Case II는 팬에서 발생한 소음이 출구로 나아가

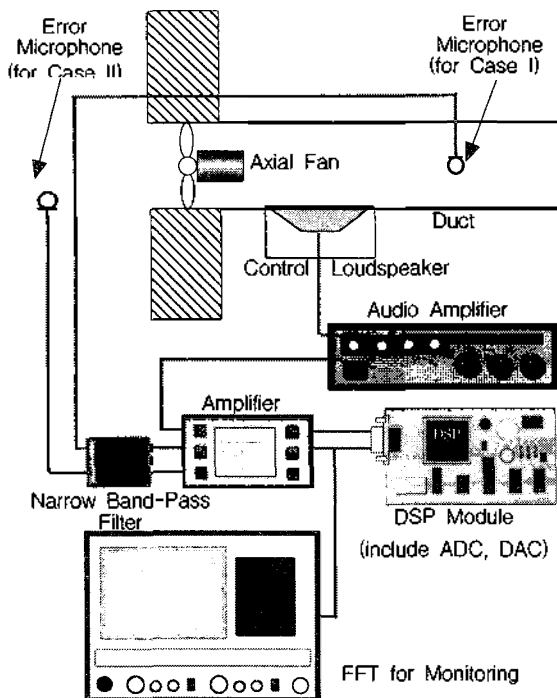
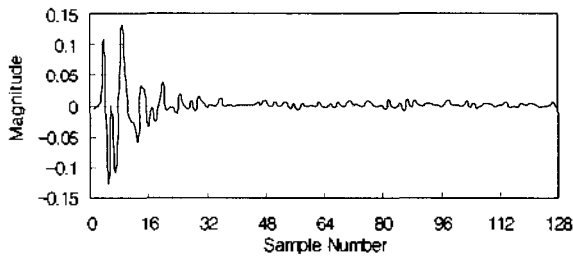
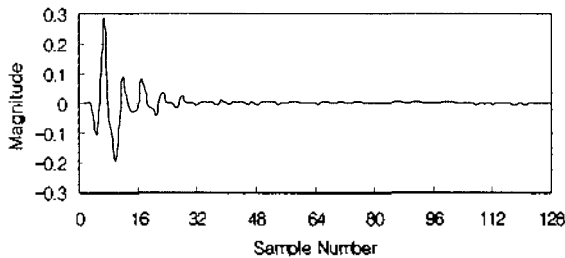


Fig. 6 Experimental Setup (Case I : control in duct, Case II : control at free-field out of duct exit)



(1) Case I (in duct)



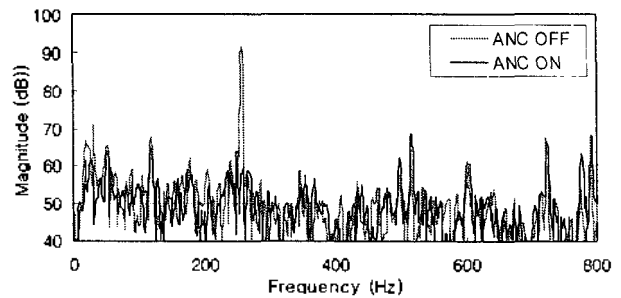
(2) Case II (free-field out of duct exit)

Fig. 7 Impulse Response Function of Error Path

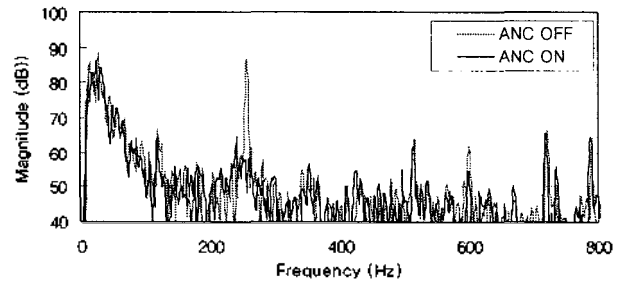
관 밖 자유음장으로 전파되는 것을 막기 위한 실험으로 관 밖으로 배출되는 유동이 직접 마이크로폰에 부딪쳐 난류소음이 발생하는 영역에 마이크로폰을 설치하였다.

먼저 오차경로(error path) 모델링을 수행하여 Fig. 7 과 같은 오차경로의 충격 응답 함수(Impulse Response Function)를 구하였다. 필터차수는 128차이고 Sampling Rate는 2000Hz이다.

Case I의 경우는 유동에 의한 저주파 랜덤 소음의 증가는 별로 없지만 Case II의 경우에는 팬에 의해 발생한 유동이 열린 공간으로 방출되는 지역에 마이크로폰이 설치되어 있으므로 Fig. 8과 같이 저주파 쪽이 상승하게 된다. 이 경우 일반적인 Feedback 제어 방식을 사용하면 BPF의 감소효과가 줄어들 뿐만 아니라 주기적이지 못한 신호의 영향으로 시스템이 불안정하게 된다. Fig.



(1) Case I (in duct)



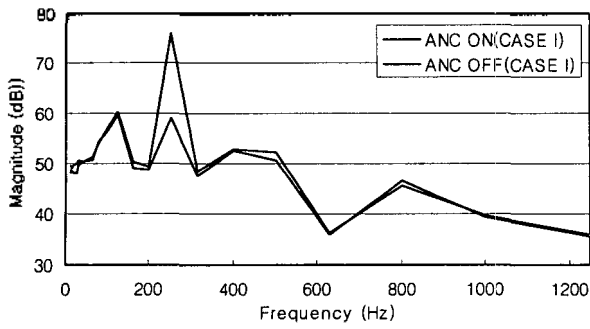
(2) Case II (free-field out of duct exit)

Fig. 8 Performance of Feedback ANC with Band-Pass Filter

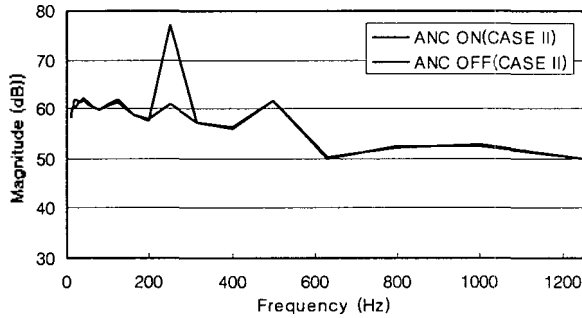
8은 Case II의 경우 협대역 필터를 사용하지 않고 제어를 할 때의 제어 전과 제어 후의 스펙트럼을 비교한 것이다. BPF에 15dB 정도의 소음 감소 효과가 있었으나 어느 정도 시간 뒤에는 발산하였다. 이는 feedback 능동 소음 제어 시 예측이 불가능한 저주파 광대역 소음의 증가가 제어 시스템에 불안정성을 야기하기 때문이다.

위의 결과에서 대역 필터의 사용으로 제어하고자하는 BPF에서의 소음은 30dB 정도의 소음을 줄였으며 그 이외의 소음은 변화가 없음을 확인할 수 있다.

위에서 구한 음압 결과를 바탕으로 ISO 532의 Method A의 GF를 구하기 위한 1/3옥타브 분석 결과는 그림 9와 같다. 그림9에서도 BPF 근처의 밴드에서의 소음만이 제어되고 있음을 알 수 있다.



(1) Case I (in duct)



(2) Case II (free-field out of duct exit)

Fig. 9 1/3 octave analysis for Performance of Feedback ANC

위의 1/3 octave 분석을 통하여 두 가지 경우(CASE I, CASE II)의 제어 전과 제어 후의 결과를 비교해 보면 다음 표와 같다.

		제어 전	제어 후	차이
CASE I	phon	83.7	78.0	-5.7
	sone	20.6	13.9	-6.7
CASE II	phon	88.2	86.4	-1.8
	sone	28.3	24.9	-3.4

표1. performnce of ANC in terms of phon and sone

CASE I의 경우는 덕트 내로 전파되는 소음을 제어한 결과로 phon에서 5.7dB의 감소를 sone에서 6.7sone의 감소효과를 거둔 반면, CASE II는 CASE I보다는 작은 감소효과를 보였다. 이는 CASE II의 경우는 저주파 랜덤 소음의 증가가 커지는 영향이 크므로 나타난 현상으로 이경우는 BPF의 제어는 별 효과가 없는 것으로 나타났다.

그러므로 BPF가 가장 주요한 소음으로 작용하는 경우 ANC를 이용하여 원하는 주파수 대역만을 효과적으로 제어하여 실제 소음도를 낮출 수 있음을 확인하였다.

## 6. 결론

관의 끝에 설치되어 있는 팬에서 발생하여 관을 통해 전파되는 소음과 외부 자유음장으로 전파되는 소음을 각각 Feedback 능동 소음 제어 방식을 이용하여 제어하고자 하는 주파수 성분(BPF)만을 제어하였다. 본 연구에서는 팬소음 중 BPF 성분만을 제어 대상을 하였으며 BPF 성분의 효과적인 제어와 유동 및 외부 유입 소음에 의한 시스템의 불안정성을 극복하기 위하여 협대역 필터를 사용하였다. 그 결과 BPF에서 Case I(관내 제어)과 Case II(관 외부 음장 제어)의 경우 각각 30dB 정도의 소음감소 효과를 거두었다. 또한 ANC의 제어 효과를 물리적인 값인 음압 비교뿐 아니라 실제 인간이 느끼는 소음도에 가까운 Loudness를 계산하여 실제적인 ANC의 효과를 검증하였다. 본 연구를 통하여 ANC의 적용범위가 소음 감소만이 아닌 실질적인 소음도를 줄이고 Noise Quality를 높일 수 있는데 대한 초기 시도를 하였다.

## 참고문헌

- (1) 이수갑, 최성임, 1997, "프로펠러 소음 : 원리, 해석 및 저감 기술", 한국항공우주학회지, 제25권, 제2호, pp.183-189
- (2) Sen M. Kuo, Dennis R. Morgan, 1996, Active Noise Control Systems -Algorithms and DSP Implementations, John Wiley & Ssons, Inc.
- (3) 이용석, 1998, "적응 피드백 방법을 이용한 1차원 능동 소음 제어에 관한 실험적 연구", 서울대학교 대학원 석사학위 논문
- (4) Kuo, S., M., and Vijayan, D., 1994, "Adaptive Algorithm and Experimental Verification of Feedback Active Noise Control System", Noise Control Eng. J. 42(2), pp.37-46
- (5) Widrow, B., Shur, D., and Shaffer, S., 1981, "On Adaptive Inverse Control", Proc. 15th Asilomar Conf., pp. 185-189
- (6) Ljung, L., 1987, System Identification:Theory for the User, Englewood Cliffs, Prentice-Hall
- (7) Arnaud Delpoux and Brandon Loggins,  $\pm 2g$  Acceleration Sensing Module Based on a  $\pm 40g$  Intefrated Accelerometer, Motorola Semiconductor Application Note, AN4004
- (8) Texas Instruments, 1983, TMS320C2X - User's Guide, Texas Instruments Inc.
- (9) ISO 532B. Acoustics - Method for Calculating Loudness Level, 1975
- (10) Zwicker, E., and Fastle, H., Psychoacoustics - Facts and Models, S