

청소기 소음원에 적용한 스위칭 방식 능동 소음기

성 덕 만 이 승 요 한 석 우 최 규 하

건국대학교 전기공학과

Active silencer using switching method in vaccum cleaner

Duk-Mahn Sung Seung-Yo Lee Suk-Woo Han Gyu-Ha Choe

Dept. of Electrical Eng. Kon-kuk University

Abstract - Until now, environmental problem has become more and more serious, and acoustic noise is one of environmental pollutions. For many years, ANC(Active Noise Control) has been made to reduce this noise.

In this paper, active silencer using switching method is studied. This silencer is composed of single-phase full bridge inverter to drive cancelling loudspeaker. The inverter is controlled to reduce noise by ramp comparison control method. At the vacuum cleaner, noise control with FFCS(Feed-Forward Control Structure) is applied and geometric arrangement is replaced to avoid unstability of FFCS.

1. 서 론

환경 문제가 많은 사람들의 관심에 대상이된 근래에 들어와서 소음도 하나의 큰 문제로 대두되고 있다. 소음에 장기간 노출될 경우, 신체적인 청각장애외에도 불안, 초조 등과 같은 정신적인 장애도 가져오게 된다. 소음을 줄이는 방법은 크게 두 가지로 요약할 수 있는데, 그 한가지는 머플러, 흡음재, 차폐재, 차단벽 등을 이용한 수동적인 소음저감 방법으로 소음을 흡수, 차단하여 소음을 감소시키는 원리를 사용한다.

수동적인 소음저감법은 고주파수에서는 매우 탁월한 효과를 보이거나 저주파수에서는 부피가 커지고, 무게가 증가하며, 이에 따르는 비용이 증가하게 된다. 또 한 가지는 음파의 중첩원리를 이용한 능동 소음 저감 방법으로 소음원에 대해 크기가 같고 위상이 180도 차이의 상쇄원을 만들어 소음 신호와 상쇄간섭을 일으키게 하는 방법으로 저주파수에서 상대적으로 효과가 뛰어나고 비용이 적게 들기 때문에, 수동 소음 저감법의 문제인 저주파수에서의 소음 저감에 대한 해결 방법으로 많이 연구되어지고 있다.

본 논문에서는 능동 소음 저감법에 대한 연구로써, 단상 풀 브릿지 인버터로 구현한 전향제어기법의 스위칭 방식 능동 소음 제어법을 이용하여 청소기 소음원에 대한 소음제어를 연구하였고 시뮬레이션과 실험을 통해 제안된 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

2. 청소기 소음원에 대한 분석과 소음 신호처리

2.1 청소기에서의 소음 발생측정

청소기 소음은 발생지점인 청소기로부터 관측지점의 위치가 어디인가에 따라서 그 차이가 생긴다. 따라서 청소기를 고정한 상태에서 관측지점을 이동함에 따라 소음의 크기가 어떻게 변화하는지

를 측정하여, 소음의 검출 지점과 상쇄 지점을 선정함으로써 시뮬레이션과 실제 실험에서의 기하학적인 위치 선정의 토대를 제시한다. 그림 1은 청소기를 고정시킨 상태에서의 관측지점의 여러 가지 위치를 제시한 것이며 이에 따른 소음의 실제 측정치를 표 1에 제시한다.

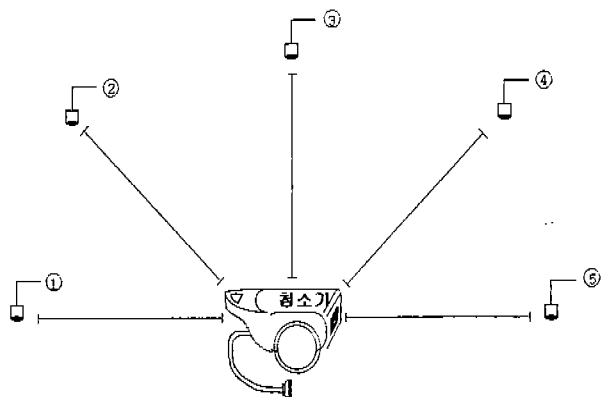


그림 1 여러 위치에서의 청소기 소음의 측정
Fig 1 Sensing of noise in vacuum cleaner at several position

표 1 검출 위치별 소음 발생 크기 [dB]
Table 1 A magnitude of noise at the several point

위치 [dB]	①위치	②위치	③위치	④위치	⑤위치
발생소음 [dB]	73.5	75.6	76.8	79.0	83.9

표 1에서 알 수 있듯이 소음은 청소기 후단(⑤위치)의 배기통에서 가장 많이 발생된다. 따라서, 검출지점과 상쇄 지점의 위치는 청소기 배기통부분과 청소기 후단에서 1m떨어진 지점으로 정한다.

2.2 소음 특성과 소음 신호의 처리

청소기 소음 저감을 위해서는 청소기 소음에 대한 분석이 먼저 이루어 져야 한다. 이러한 소음원에 대한 분석은 주된 소음원을 찾아냄으로써 컴퓨터 시뮬레이션뿐만 아니라, 실제 제어기에 들어가는 제어 신호를 효과적으로 만들 수 있음으로써 실험에도 매우 중요하다.

그림 2와 그림 3은 소음발생 지점과 상쇄 지점에서의 소음에 대한 FFT결과를 보여준다.

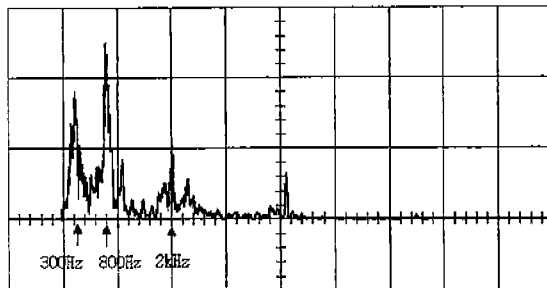


그림 2 청소기에서의 소음신호 FFT 분석 파형
Fig. 2 The FFT of noise source in vacuum cleaner

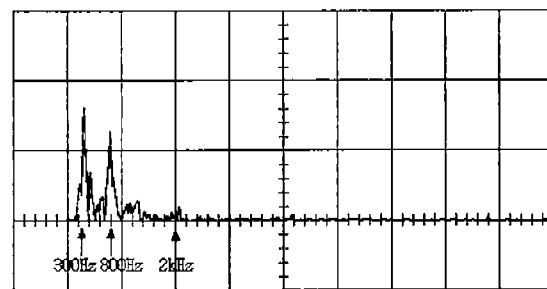


그림 3 상쇄지점에서의 소음신호의 FFT
Fig. 3 The FFT of noise at cancelling area

그림 2와 그림 3에서 알 수 있듯이 청소기 소음이 발생한 지점에서 상쇄 지점에 도착하는 동안에 1 kHz 이상의 성분이 상쇄되어, 상쇄하고자 하는 지점에서 소음의 주된 성분은 300 Hz와 800 Hz임을 알 수 있다. 그러므로 본 논문에서는 소음 신호를 처리 할 때 청소기에서 측정된 소음을 저역통과 필터링(LPF:low-pass filtering)하여 소음 신호를 제어하였다. 이렇게 함으로써, 스위치에 제어 신호가 도달하게될 때 1 kHz가 넘어가는 신호에 대한 불필요한 스위칭을 줄이게 되어 스위칭 부담을 덜어줌으로써 스위치의 오동작을 줄일 수 있게 된다.

3. 소음 저감에 적용된 제어 기법

3.1 청소기 소음에 적용된 전향제어 기법

능동 소음 제어에서 중요한 요소는 적용되는 제어 기법이라고 할 수 있을 것이다. 능동 소음 제어의 제어 기법으로써는 크게 궤환 제어 기법 구조(FBCS : Feed- Back Control Structure)와 전향 제어 기법 구조(FFCS : Feed-Forward Control Structure)를 들 수 있다. 궤환 제어 기

법은 마이크론이 있는 지점에서 소음 저감을 목적으로 하며, 그 지점에 존재하는 모든 소음을 감쇄시키는 것이 목적이다. 이에 비하여 전향 제어 기법은 소음원을 마이크론으로 검출하여 이를 적절히 제어하여 상쇄 시키고자하는 지점에서의 검출된 소음만을 저감하는 것을 목표로 한다. 능동소음 제어에서의 전향 제어기법의 문제점은 제어기 내부의 음의 제한 루프에 의한 시스템 불안정 상태인 하울링이 존재하는 것이다. 그러므로 제어기를 구현 할 때 이러한 요소를 고려해서 설계하여야 한다. 본 논문에서는 이러한 음의 제한 루프를 제거하기 위하여 적용된 전향 제어기 구조의 기하학적 위치를 재배치하였다.

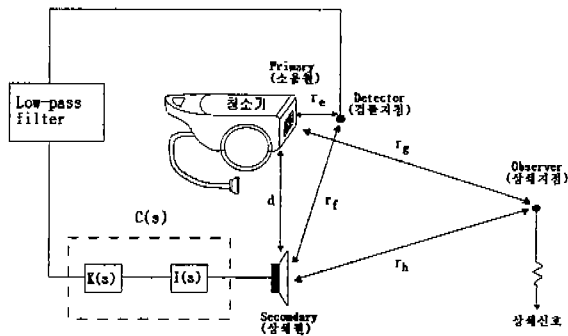


그림 4 청소기에서 전향제어기법의 기본 배치도
Fig. 4 Structure of FFCS for vacuum cleaner

여기서 제어부(C(s))는 실제 제어부인 K(s)와 인버터제어부인 I(s)를 하나로 포함한 것이다. 그림 4에 제시된 전향 제어기법의 능동소음 제어의 전달함수를 고려한 블록선도를 그리면 그림 5와 같이 표현 할 수 있다.

$E(s)$: 소음원에서 검출기까지 경로 r_e 의 전달함수

- $F(s)$: 상쇄원에서 검출기까지 경로 r_f 의 전달함수
- $G(s)$: 소음원에서 상쇄지점까지 경로 r_g 의 전달함수
- $H(s)$: 상쇄원에서 상쇄지점까지 경로 r_h 의 전달함수
- $M(s)$: 검출기의 전달함수
- $C(s)$: 제어기의 전달함수
- $N(s)$: 전자소자의 전달함수
- $L(s)$: 상쇄원의 전달함수

음의 제한 루프를 제거하기 위한 조건은 다음과 같다.

<< 조건 >>

i. 그림 4에서 검출기의 기하학적 위치를 통풍구 앞에 배치한다.

$$E(s) \cong 1 \quad (1)$$

ii. 상쇄원의 위치를 검출기와 일정 거리를 유지한다. 즉, 상쇄원에서 r_f 의 경로로 유입되는 성분의 영향을 받지 않게 한다.

$$F(s) \cong 0 \quad (2)$$

iii. $M(s)$ 과 $N(s)$ 는 각각 소음의 음과 신호를 마이크론으로 변환하여 전기 신호를 만드는 전달함수와 전기소자의 전달함수로서 1로 처리한다. 제어기의 전달함수를 구하여 오차($\frac{1}{\alpha(s)}$)항을 삽입하여 보상한다.

$$M(s) \cong 1, \quad N(s) \cong 1 \quad (3)$$

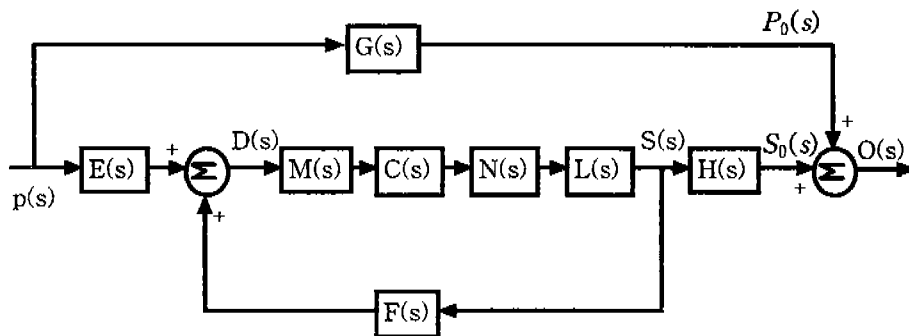


그림 5 일반적인 전향 제어 기법의 블록선도
Fig. 5 Block diagram of FFCS

조건 i, ii, iii을 고려한 실제 청소기에 적용된 전향 제어 기법의 블록선도는 그림 6과 같다.

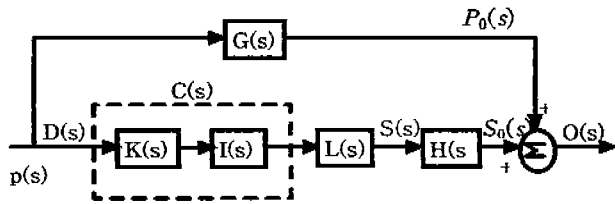


그림 6 청소기에 적용된 전향 제어 기법의 블록선도

Fig. 6 Block diagram of FFCS for Vacuum Cleaner

상쇄지점에서의 소음 신호와 상쇄 신호의 합으로 나타낼 수 있다

$$O(s) = P_0(s) + S_0(s) \quad (4)$$

전향 제어 기법의 최종 목표는 상쇄지점에서의 신호 $O(s)$ 를 "0"으로 만드는 것이다. 따라서 다음과 같은 수식이 만족된다.

$$P_0(s) + S_0(s) = 0 \quad (5)$$

$$S_0(s) = C(s)L(s)H(s)p(s)$$

$$P_0(s) = G(s)p(s)$$

$$C(s) = -\frac{G(s)}{L(s)H(s)} \quad (6)$$

$$C(s) = K(s)I(s)$$

따라서 구하고자하는 전체전달함수는

$$\therefore K(s) = -\frac{G(s)}{L(s)H(s)I(s)} \alpha(s) \quad (7)$$

3.2 스위치 구동을 위한 삼각파 비교 제어법

본 논문에서는 상쇄원 스피커를 구동하기 위한 시스템으로써 단상 풀 브릿지 인버터를 사용하였다. 그리고 인버터를 구동하기 위한 PWM(Pulse With Modulation)신호를 만들어 주기 위해서, 전력전자에서 널리 사용하는 방법인 삼각파 비교 제어기법을 사용하였다.

삼각파 비교 제어 기법은 발생한 삼각파와 임의의 신호를 비교하여 스위칭 신호를 만들어 주는 원리으로써, 실험에서는 제어기($K(s)$)를 거친 제어 신호와 삼각파를 비교하여 스위칭 신호를 만들어 주었다. 또한 삼각파 비교 신호는 인간의 가청 주파수 범위 대를 상회하는 고주파를 사용하여 혹시 발생할 수 있는 삼각파에 의한 스위칭 소음을 방지하였다. 그림 7은 삼각파 비교 제어기법의 개념도를 나타낸 것이다.

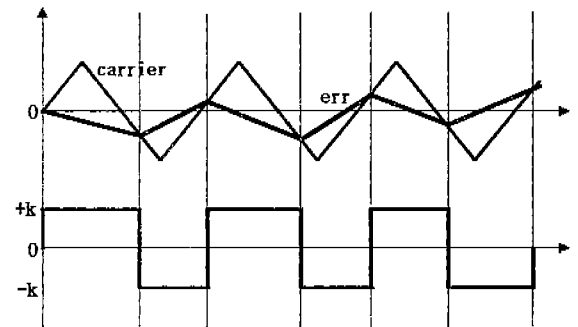


그림 7 삼각파 비교 제어 기법의 원리도

Fig. 7 The method of ramp comparison control

4. 컴퓨터 시뮬레이션

본 논문에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 거리에 따른 소음 특성과 실제 청소기 소음에 적용한 전향 제어 기법에 대한 소음 저감 효과를 제시했다. 거리에 따른 소음특성에 대한 시뮬레이션을 통하여 고주파수의 소음을 저역통과 필터링하여 소음신호를 처리한 방법에 대한 타당성을 증명하였고, 청소기 소음에 대한 전체적인 시뮬레이션을 통하여 실험에 사용되는 제어기의 설계를 효과적으로 하였다.

4.1 거리에 따른 소음특성에 관한 시뮬레이션

소음원의 특성에서 분석한 것과 같이 소음 신호는 거리와 주파수에 따라 그 특성이 달라지는 것을 알 수 있다. 이를 검증하기 위하여 공간상의 전달 함수($G(j\omega)$)는 참고문헌[4]에서 인용한 식 8과 같이 표현하여 시뮬레이션을 수행하였다.

$$G(j\omega) = \frac{A}{r} e^{-j\omega r/c} \quad (8)$$

여기서

- A : 신호의 크기
- r : 거리
- f : 신호의 주파수
- c : 소리의 속도 (공기중 : 344 m/s)

실제 실험에서 청소기 소음의 주된 성분인 300 Hz와 800 Hz의 소음 특성 그리고 1 kHz를 넘어가는 소음 신호의 특성을 분석하기 위하여 1.5 kHz와 3 kHz의 소음 특성을 MATLAB을 통하여 거리에 따라 소음 특성이 어떻게 변화하는지를 관찰하였다.

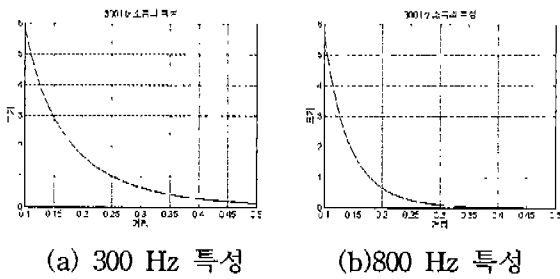


그림 8 300 Hz와 800 Hz의 소음 특성
Fig. 8 The character of 300 Hz, 800 Hz noise

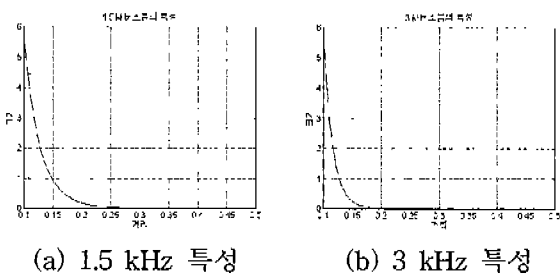


그림 9 1.5 kHz와 3 kHz의 소음 특성
Fig. 9 The character of 1.5 kHz, 3 kHz noise

그림 8과 9를 통하여 알수 있듯이 고주파수의 음이 거리가 증가함에 따라 빨리 감쇄한다. 따라서 실험에서 저역통과 필터링을 하여 소음 신호를 처리한 것이 타당함을 알 수 있었다. 즉 실험에서 1 kHz 가 넘어 가는 부분을 제거하여 스위치의 부담을 줄인 것에 대한 타당성을 시뮬레이션을 통하여서도 알 수 있다.

4.2 청소기 소음원에 대한 시뮬레이션

청소기 소음원과 검출지점의 마이크로폰의 경로 이득은 무시하였으며, 소음원과 상쇄지점 마이크로폰 사이 그리고 상쇄 스피커와 상쇄지점의 마이크로폰의 공간상의 전달 함수는 식 8을 통하여 수행하였다. 그리고 시뮬레이션에 사용되는 스위치는 데드타임을 무시한 이상적인 스위치로 가정하였고, 3장에서 제시한 제어기에 적용된 오차항은 무시하여 수행되었다.

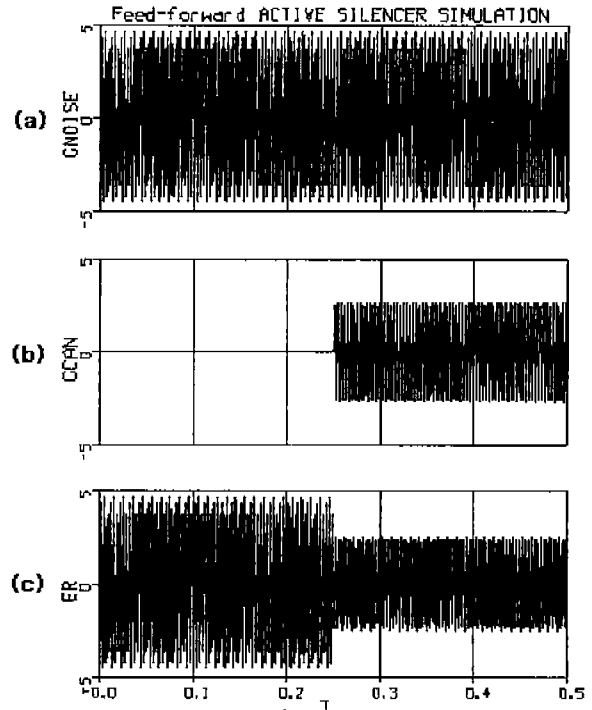


그림 10 제어기 on시의 소음 상쇄 효과
Fig. 10 The noise in vacuum cleaner by compound noise

- (a) 상쇄지점에서의 청소기에 의한 소음파형
- (b) 상쇄지점에서의 상쇄원에 의한 상쇄파형
- (c) 상쇄지점에서의 제어기 on시 잔류파형

5. 실험 결과

실험을 위한 시스템 구성도는 그림 4와 같으며 실험은 거리에 따른 청소기 소음 특성의 측정과 실제 청소기 소음에 적용한 전향제어 기법 스위칭 방식 능동 소음기에 대한 실험으로 나누어 실시하였다.

5.1 거리에 따른 소음 특성에 관한 실험 결과

청소기에서 거리가 증가함에 따라 소음의 특성이 어떻게 변화하는가를 관측하기 위하여 50cm 단위로 소음을 마이크로폰으로 검출하여 이 소음을 오실로 스코프를 통하여 FFT를 측정하여 거리에 따른 소음 특성을 관찰하였다.

거리에 따른 소음 특성의 관찰로써 논문 서두에서 밝힌 1 kHz를 넘어가는 소음에 대하여 저역통과 필터링한 것의 타당성을 시뮬레이션을 통하여 입증하고 실험을 통하여 검증할 수 있을 것이다.

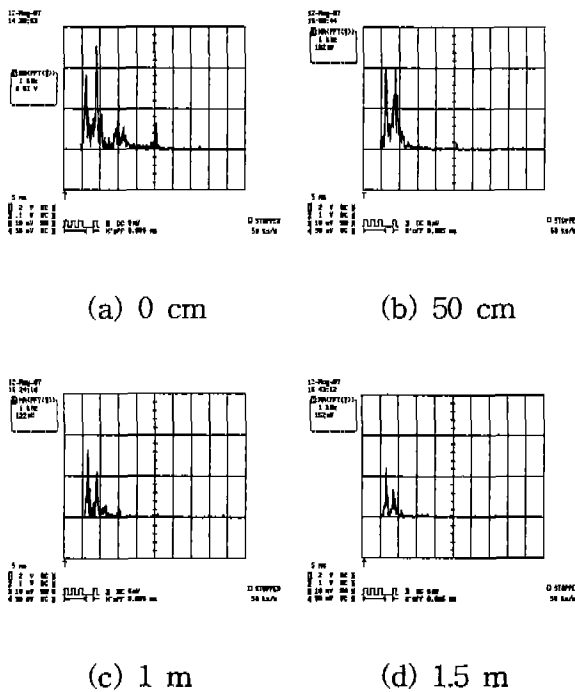


그림 11 청소기에서 소음의 FFT
Fig. 11 The FFT of noise from vacuum cleaner

그림 11의 실험 파형에서 보여지는 것과 같이 고주파수의 소음은 거리가 증가함에 따라 빠른 감소 현상을 보이고 상대적으로 저주파수의 소음은 감소 현상이 작다는 것을 알 수 있다. 이것은 3장과 4장의 시뮬레이션을 통하여 인지하고 있는 사실로 실험을 통하여 입증하였다.

5.2 청소기 소음원에 대한 실험 결과

청소기 소음에 대한 결과는 청소기의 청소모드에 따라 약, 중, 강 모드로 나뉘어져 실행하였고, 실험에 사용된 상쇄원 구동용 스피커의 사양은 출

력이 5[W], 임피던스 8[Ω]인 스피커를 사용하였으며, 실측된 값은 $R_{sp}=8[\Omega]$ 이며, $L_{sp}=344[\mu H]$ 이다. 실험에 사용된 스위치는 단상 풀 브릿지 인버터를 사용하였으며, 스위치에 공급되는 직류전압(V_{dc})은 1.2 ~ 1.4 [V] 정도였다. PWM 신호는 삼각파 비교 제어기로 만들어져 데드타임 회로를 거친다. 또한 게이트 구동 신호를 만들기 위하여 IR2112로 구성된 gate-driver를 사용하였다.

그림 12는 강모드에서 제어기 ON시의 청소기 소음의 상쇄 파형을 보여주고 그림 13과 14는 각각 상쇄 전,후의 소음에 대한 FFT를 보여준다.

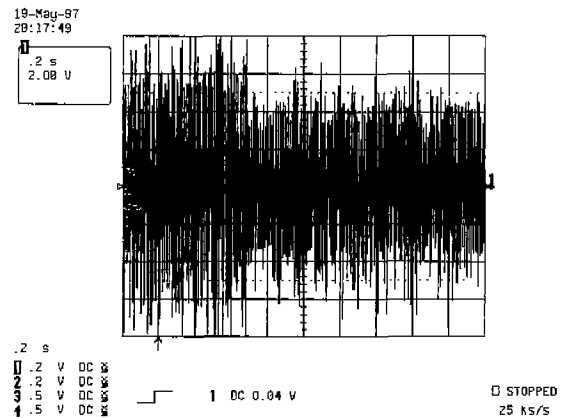


그림 12 청소기의 소음기 ON시 상쇄효과
Fig. 12 Noise cancelling effect on controller ON

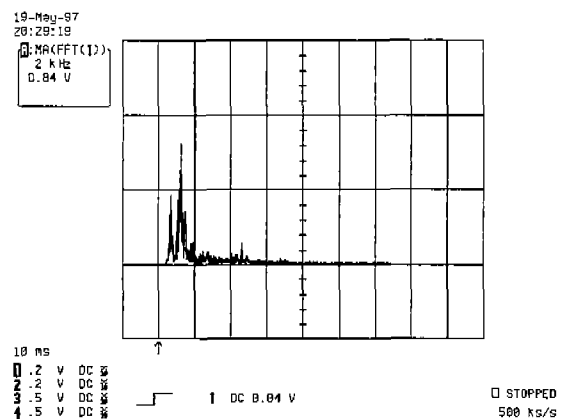


그림 13 제어기 OFF시 상쇄 지점에서 청소기 소음의 FFT
Fig. 13 The FFT of noise in vacuum cleaner on controller OFF

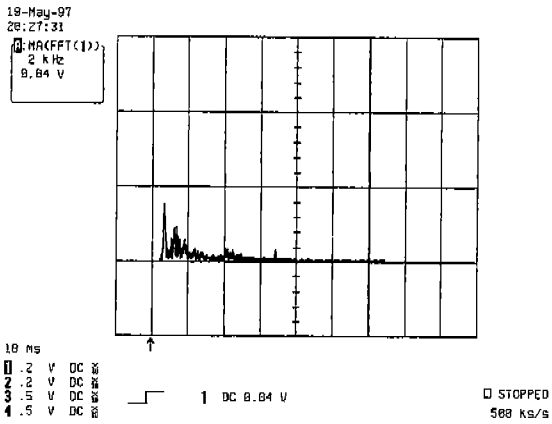


그림 14 제어기 ON시 상쇄 지점에서 청소기 소음의 FFT

Fig. 14 The FFT of noise in vacuum cleaner on controller ON

그림 15는 청소기 각 모드에 따른 소음의 상쇄 효과를 [dB]로 나타낸 것이다.

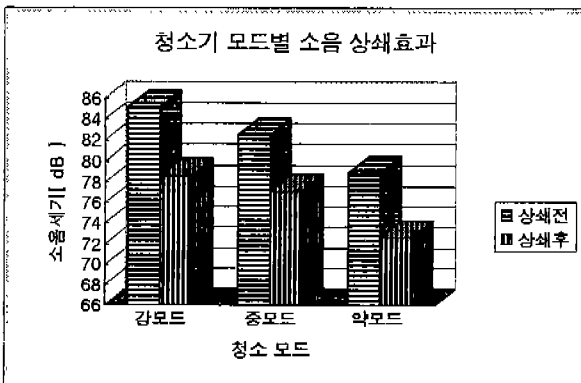


그림 15 청소기 모드별 상쇄 효과

Fig. 15 The cancelling effect by changing mode of cleaner

6. 결 론

본 논문에서는 진공 청소기 소음원에 적용한 스위칭 능동 소음기에 대한 연구이다. 소음 제어 기법으로써는 전향 제어 기법이 적용되었으며, 논문에서는 전향제어 기법 내부에서 음의 제한 루프에 의한 시스템 불안정상태인 하울링을 제거하기 위하여 기하학적인 조건을 제시하였다. 실제 청소기 소음을 줄이기 위해 청소기의 청소 모드별로 실험을 한 결과 각 모드에서 거의 균일하게 6 ~ 8 [dB] 정도의 상쇄 효과를 얻을 수 있었다.

향후로는 스위칭 방식의 능동 소음기의 실 소음

원에 대한 적용이 활발히 이루어지며, 더 좋은 제어기의 설계가 이루어져, 소음기의 특성향상이 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

- [1] R. R. Leitch, M. O. Tokhi "Active Noise Control Systems", IEE Proceedings, Vol.134, Pt.A No.6, JUNE 1987.
- [2] P. A. Nelson, S.J.Elliott, "Active Control of Sound", Academic Press, 1992.
- [3] 남현도, 안동준, "회전기에 의한 소음제거를 위한 능동 소음 제어-3차원 폐공간의 경우", 전기학회논문지, 제43권 9호, 1994.9
- [4] M. O. Tokhi, R.R.Leitch "Active Noise Control", Oxford : Clarendon Press, 1992
- [5] Sen M. Kuo, Dennis R. Morgan, "Active Noise Control Systems", John Wiley & Sons, Inc. 1996
- [6] N. Mohan, "Power Electronics", John Wiley, 1989.

본 연구는 1994년도 한국과학재단 특정 연구비 지원에 의하여 이루어졌음.