

위상차에 따른 소음 제거기의 성능 비교

* 최 창 권 , * 조 병 모

* 순천대학교 전자공학과 음향신호처리 연구실

전화 : (0661) 750 - 3571 / 팩스 : (0661) 750 - 3570

The Performance Comparison of Active Noise Controller With Phase Difference

* Chang-kwon Choi , * Byoung-mo Cho

* Acoustics, Speech, and Signal Processing Lab.

Dept. of Electronic Engineering, Sunchon National University

E - mail : boss@assp.sunchon.ac.kr

Abstract

Passive noise reduction is a classical approach to attenuate industrial noise. But Active noise cancellation has several advantages over the passive noise cancellation. Such a system offers a better low frequency performance with a smaller and lighter system. This paper presents an active closed loop control system which consists of an controller for inverting and compensating the phase delay, an microphone for picking up the external noise, and loudspeaker for radiating the acoustic anti-phase signal to reduce external noise.

The noise in the phase delay covered from 80° to 270° tends to be reduced. The degree of noise cancellation obtainable with this system reaches value about 17dB.

1. 서 론

ANC (Active Noise Control)는 제어하고자 하는 소음을 진폭이 같고 위상차가 180°인 제 2차음을 능동적으로 발생시켜서 소음을 감쇠시키는 방법으로 장거리 전화 회선에서 발생되는 에코우 제거(Echo Cancellation)나 등화기(Equalization)[2], 3차원 공간에서의 음상정위(Sound Localization)[3]나 임체 음향 재생(Sound Reproduction)[4] 등에 응용되고 있다.

수동적인 소음 감쇠 기술은 소음 발생 지점과 감쇠시키려는 지점 사이에 흡음재나 방음재를 설치하여 소음을 차단 또는 감쇠시키므로 고주파 영역에서는 효과적이지만 저주파 영역(약 500 Hz 미만)에서는 비효과적이다.

적용 디지털 필터를 이용한 feedforward 제어방식은 소음과 상관관계가 있는 신호를 검출할 수 있는 경우에는 상당히 유효하지만 상당히 많은 비동기적인 회전

체를 갖는 기계가 운행중인 공장내 소음이나 자동차나 비행기와 같이 소음원이 공간 내에 넓게 분포되어 있는 경우에는 이 방법은 유효하지 않다.

본 논문에서는 차음재료에 의해서 고주파수 영역의 소음이 차단되고 밀폐된 국소 영역에서 feedback 제어를 이용한 소음 감쇠 방법과 한정된 대역의 소음 감쇠 주파수 대역을 위상 천이기(phase shifter)를 이용하여 가변시켜서 소음 감쇠의 성능을 고찰했다.

2. 국소 영역의 소음 감쇠

feedback 제어에서 소음을 감쇠시키기 위해서는 먼저 이상적인 센서와 스피커(전 대역에서 진폭 특성이 평坦하고 위상지연이 영)를 개발한다는 것은 불가능하기 때문에 이러한 특성을 갖도록 보상 필터를 사용하여 소음을 제어하고 있다.

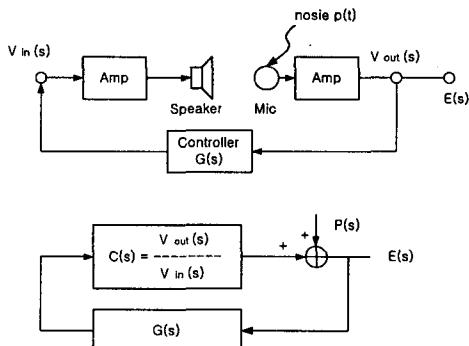


그림 1. feedback 소음 제어

특히 보상필터의 안정성에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 센서와 스피커의 위치, 간격 차에서 생기는 음향

학적 시간(위상) 지연이다. 따라서, 시간 지연을 최소화하고 스피커와 센서, 그리고 그 사이의 음향 함수를 포함한 전기 음향(electroacoustic) 전달 함수의 위상 변화율을 최소로 하는 구조가 필요하다. 음향학적 시간 지연을 최소화하기 위해서는 먼저 스피커와 센서간의 거리를 짧게 하는 것이 유리하다.

일반적인 feedback 제어를 이용한 소음 제어의 구조를 그림 1에 나타내었으며, 증폭기와 제어기는 마이크로폰에 의해 검출된 소음 $p(t)$ 을 감쇠시키기 위해서 구성된 각각의 전기적인 요소들이 있다.

마이크로폰에 입력된 소음은 증폭되어 제어기에서 역위상으로 변환하고 위상을 보정한 후 스피커에 재환된다. 스피커 증폭기의 입력 ($V_{in}(s)$), 스피커와 마이크로폰 사이의 음향 함수, 그리고 마이크로폰 출력 ($V_{out}(s)$) 사이의 전기 음향 전달 함수를 $C(s)$, 소음이 감쇠된 신호를 $E(s)$ 그리고 제어기의 전달 함수를 $G(s)$ 라 한다면 소음이 감쇠된 신호 $E(s)$ 는 다음과 같다.

$$E(s) = \frac{P(s)}{1 - G(s) C(s)} \quad (1)$$

전달 함수가 $\{1/(1 - G(s) C(s))\}$ 인 선형 시스템에 인가되는 신호가 $S_{pp}(w)$ 인 power spectral density를 갖는다면 재환이 있을 때 감쇠된 신호의 power spectral density는 다음과 같이 주어진다[5].

$$S_{ee}(w) = S_{pp}(w) \left[\frac{1}{|1 - G(jw) C(jw)|^2} \right] \quad (2)$$

일정 주파수에서 $E(s)$ 를 최소로 하기 위해서는 $|1 - G(jw) C(jw)|^2$ 를 최대로 해야 한다. 여기서 주파수 응답 $G(jw)$ $C(jw)$ 의 진폭을 $K(w)$, 위상을 $\Phi(w)$ 라 가정하면

$$|1 - G(jw) C(jw)|^2 = 1 + K^2(w) - 2K(w) \cos \Phi(w) \quad (3)$$

일반적으로 $C(jw)$ 가 주어졌을 때, 이득 $K(w)$ 가 각 주파수에서 최대가 되도록, 그리고 위상 천이 영역이 180° 내에 존재하도록 $G(jw)$ 를 선택해야 한다. 만일 $K(w)$ 가 크면 $\Phi(w)$ 는 큰 영향을 미치지 않으며, $\Phi(w)$ 의 값이 $+90^\circ$ 에서 $+270^\circ$ 사이에 있으면 $-K(w) \cos \Phi(w)$ 항은 양수가 된다. 여기서 $G(jw)$ 는 causal impulse 응답 특성을 갖어야 하며 재환을 포함한 전체 필터 $\frac{E(s)}{D(s)}$ 는 안정해야 한다.

$P(s)$ 가 0이라고 가정하고 $G(s)$ 출력과 $C(s)$ 입력을 단절시킨 후 $C(s)$ 입력에 신호를 인가하여 $G(s)$ 출력에서의 위상천이가 360° 이면 $C(s)$ 입력 신호와 동상이 되며 이 때 $G(s)$ 출력을 $C(s)$ 입력에 연결한 경우 $C(jw)G(jw)$ 의 이득이 1보다 작다면 $C(s)$ 에 인가된 신호는 재환되면서 점차 작아져 소멸된다. 그러나 $P(s)$ 를 입력으로 하고 $E(s)$ 를 출력으로 한 전체 시스템(Closed Loop System)을 안정하게 하기 위해서는 $\frac{E(s)}{D(s)}$ 의 극점(Pole)이 S-평면의 원쪽에 위치해야 한다.

3. 실험 방법 및 결과 고찰

국소 영역의 소음 감쇠를 실험하기 위한 블럭도를 그림 2에 나타내었다.

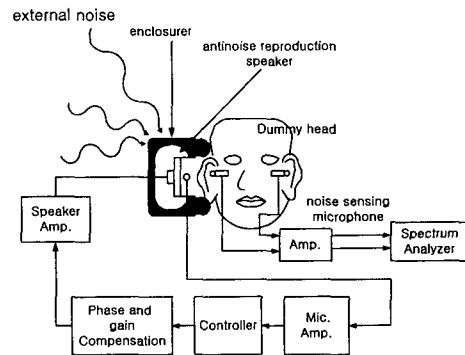


그림 2. 소음감쇠를 위한 블럭도.

먼저 고주파수 영역의 음을 수동적으로 감쇠시키기 위해서 헬멧(helmet)을 이용하였으며, 헬멧 내에 소음의 역위상을 발생시키는 스피커와 외부소음과 스피커에서 출력되는 음을 감지하기 위한 콘덴서 마이크로폰(스피커와 마이크로폰간의 거리는 1cm정도이다)을 설치하였다. 이때 사용된 소음은 백색 잡음이다. 시스템은 제어기, 위상을 보상해 주는 필터, 그리고 마이크로폰과 스피커 증폭기로 구성하였다. 또한 이 소자들은 상용화되어 일반적으로 용이하게 구입할 수 있는 소자들이다.

3.1 헬멧의 소음 감쇠, 스피커와

마이크로폰간의 응답과 위상특성 측정

소음을 감쇠시키기 위해서 먼저 헬멧이 외부의 소음을 어느 정도 주파수 영역까지 감쇠시키는지 알아보기 위해서 외부 소음 레벨을 약 100dB로 설정하고 한쪽 귀에 헬멧을 장착한 후 더미헤드의 양 귀에 설치되어 있는 B&K 측정용 마이크로폰으로 수음하여 이들의 스펙트럼을 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서 알 수 있듯이 약 400Hz에서 15dB, 500Hz에서 20dB 정도 감쇄되는 것을 알 수 있으며 이 이상의 주파수로 갈수록 10dB/decade로 감쇄되어 감쇠 정도가 우수하다. 따라서 소음 감쇠를 위한 제어기와 보상필터는 약 500Hz이하의 주파수 영역을 고려하는 것이 바람직하다.

이렇게 수동적인 소음 제어가 이루어진 다음에 스피커와 마이크로폰의 진폭 특성이 다른 증폭기(위상을 천이)를 사용하여 위상 특성을 측정하였다.

3.2 실험 결과 고찰

본 논문에서는 그림 4와 같은 보상하기 전의 스피커와 마이크로폰의 주파수 특성을 가지는 시스템을 표1과 같이 위상을 보정하고 그림 5와 같이 스피커와 마이크로폰간의 주파수 특성을 가지게 한 경우를 바탕으로 실험에 임하였다. 백색 잡음을 이용하여 입력신호의 500Hz 이하의 주파수 대역에서 그림 6과 같이 최

대 17dB 정도의 소음 제거 효과를 나타내었다. 또한 위상차에 따른 소음 제거의 특성을 알아보기 위해 일정한 간격의 위상차를 지닌 대역의 신호만이 입력될 때 각 대역폭에 대한 소음 제거 효과 역시 전체 대역의 소음 제거 실험과 유사한 결과를 보였다. 이의 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림 7-(f),(g)와 그림 7-(a), (m)에서 알 수 있듯이 위상차가 작을수록 소음 제거 효과가 뛰어나는 결과를 얻었다.

입력되는 신호의 종폭도에 따라 소음 제거의 관계는 그림 8-(a),(b),(c)와 같이 입력되는 신호에 관계없이 거의 일정한 소음 감소 효과를 얻을 수 있다. 다만 입력되는 신호가 약 40 dB이하의 크기를 갖는 신호일 경우는 조용한 실내에서 주위의 불규칙적인 소음 관계로 저주파수 대역에서의 신호에 대해 오히려 증가하는 경향을 보였다. 이와 같이 500Hz이하의 신호에서 능동적인 소음 제거와 500Hz이상의 신호에서 수동적인 소음 제거로 인하여 전체적인 소음 제거 효과를 얻었다.

4. 결론

현재 사회적으로 소음 공해라는 문제가 제기되고 있는 가운데 음향 모델링 관점에서 소음 제거기는 실생활에 꼭 필요한 존재로 부각되고 있다.

본 논문에서는 일정 위상차를 갖는 주파수 대역 내에서 소음 제거 효과를 실험하였다. 위상차에 따른 대역에서의 소음 제거는 전체 대역에서의 소음 제거와 유사하며 작은 위상차에 따른 대역폭의 소음 제거가 우수함을 확인하였다. 그리고 입력되는 신호의 종폭도에 관계없이 거의 일정한 소음 제거가 이루어짐을 확인하였다.

보다 더 넓은 대역에서의 소음 감소 효과를 얻기 위해서는 스피커와 마이크로폰 종폭기에 관계된 위상 특성을 고려하여 시스템을 설계해야 할 것이다. 또한 이상적인 센서와 위상 지연이 없는 스피커의 개발이 총족될 때 보다 나은 소음 제거 효과를 얻을 수 있으리라 기대한다.

참고 문헌

- [1] P.Lueg, Verfahren Zur *Dämpfung* von Schall schwingungen, German Patent No. 655508
- [2] John N. Mourjopoulos, "Digital Equalization of Room Acoustics", J. Audio Eng. soc., vol. 42, No. 11 pp. 884 - 900 Nov. 1994
- [3] J. Martin, D. Van Maercke, and J.P. Vian, "Binaural Simulation of concert halls : A new approach for the binaural reverberation process", J.Acoust. Soc. Am. 94(6), pp 3255-3264, Dec. 1993
- [4] Michael A. Gerzon, "Optimum Reproduction matrices for Multispeaker Stereo ", J. Audio Eng. soc., vol.40, No. 7 pp. 571-589, July 1992
- [5] P.A. Nelson, S.J. Elliott, Active Control of Sound, Academic press, pp. 204-230, 1992
- [6] Ch. Carme, "A new filtering method by feedback for A.N.C. at the ear", Proc. of

Inter-Noise 88, pp. 1083-1086, 1988

- [7] P.D. Wheeder, "Voice Communications in the cockpit noise environment-the role of active noise reduction", Ph.D.Thesis, University of Southampton, England, 1986
- [8] Ir. L. Van Laere, Dr. Ir. P. Sas, " Principles and Applications of Active Noise Cancellation." Proc. of Inter-Noise 88, pp. 999-1002, 1988
- [9] Dougias O'shaughnessy, Speech Communication, pp.144, Addison-Wesley Publishing Company, 1987.

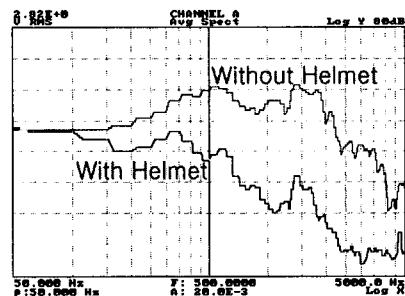


그림 3. Helmet의 주파수 특성

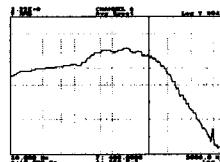


그림 4. 보상하기 전의 스피커와 마이크로폰의 주파수 특성

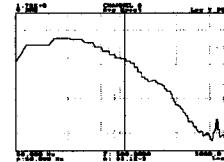


그림 5. 보상한 후의 스피커와 마이크로폰의 주파수 특성

표 1. 위상차에 따른 주파수 대역

위상차	주파수 대역	그림
50° ~ 40°	40 ~ 120 Hz	7-(a)
40° ~ 30°	120 ~ 140 Hz	7-(b)
30° ~ 20°	140 ~ 150 Hz	7-(c)
20° ~ 10°	150 ~ 190 Hz	7-(d)
10° ~ 5°	190 ~ 200 Hz	7-(e)
5° ~ 0°	200 ~ 220 Hz	7-(f)
0° ~ -5°	220 ~ 260 Hz	7-(g)
-5° ~ -10°	260 ~ 280 Hz	7-(h)
10° ~ -20°	280 ~ 330 Hz	7-(i)
-20° ~ -30°	330 ~ 370 Hz	7-(j)
-30° ~ -40°	370 ~ 420 Hz	7-(k)
-40° ~ -50°	420 ~ 450 Hz	7-(l)
-50° ~ -90°	450 ~ 550 Hz	7-(m)

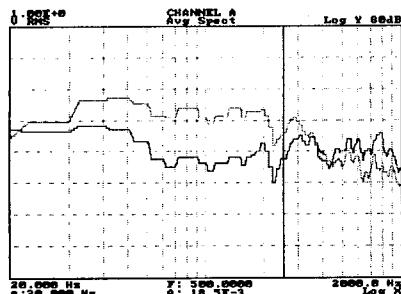
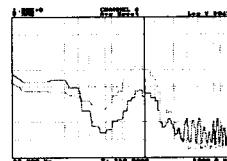
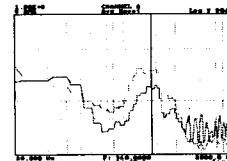


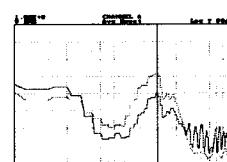
그림 6. 전체 대역에서의 소음 제거



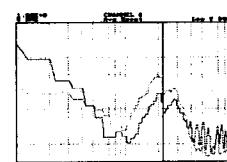
(a) 40 ~ 120Hz



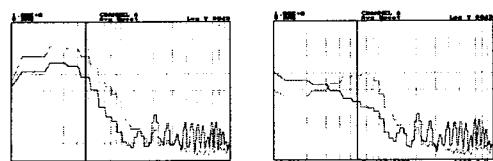
(j) 330 ~ 370Hz



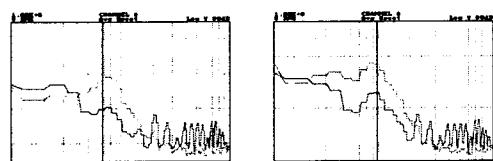
(k) 370 ~ 420Hz



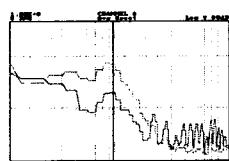
(l) 420 ~ 450Hz



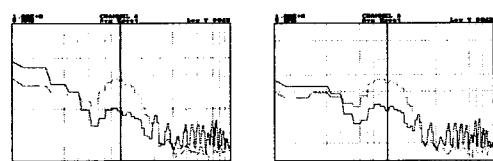
(b) 120 ~ 140Hz



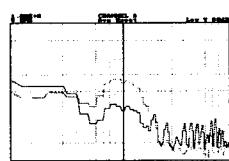
(c) 140 ~ 150Hz



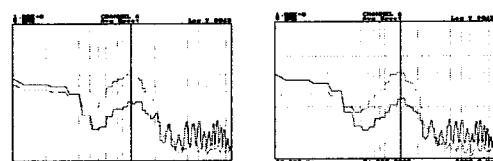
(d) 150 ~ 190Hz



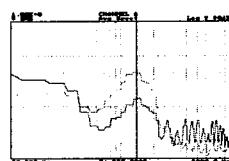
(e) 190 ~ 200Hz



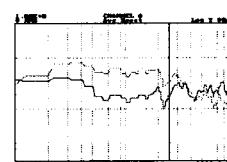
(f) 200 ~ 220Hz



(g) 220 ~ 260Hz



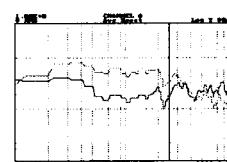
(h) 260 ~ 280Hz



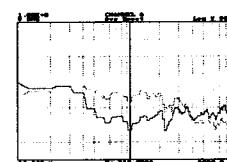
(m) 450 ~ 550Hz

그림 7. 각 주파수 대역에 따른 소음 제거

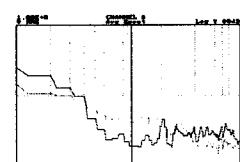
(점선 : ANC Off 실선 : ANC On)



(a) Gain 大



(b) Gain 中



(c) Gain 小

그림 8. Gain에 따른 소음 제거 특성 스펙트럼

(점선 : ANC Off 실선 : ANC On)