

〈논 문〉

# 특정주파수 소음제거를 위한 능동소음제어식 청각보호구 개발연구

김 동 균\* · 김 옥 현\*\*

(1997년 2월 24일 접수)

## Development of an Ear-muff with Active Noise Control for Selective Noise Attenuation

Dong Gyun Kim and Ock Hyun Kim

**Key Words :** Active Noise Control(능동소음제어), Headphone(헤드폰), Ear-muff(청각보호구), Selective Noise Attenuation(선별적 소음제거)

### Abstract

Acoustic noise has become an increasingly important issue, especially in the industrial environment. Nowadays home and office are not exceptional, mainly due to the increase in the usage of machinery. Active Noise Control(ANC) becomes efficiently an available tool for the noise suppression with rapid advances of solid state electronics. In this study an ANC system is developed for audio headphone to work as a noise protector, so called an ear-muff. The system is developed to kill a certain frequency band noises selectively which is purposed to suppress only the dominant ambient noise such that normal human conversation is not disturbed with wearing the ear-muff. For the purpose, an ANC design strategy is suggested and implemented with an analogue control circuit. The performance is evaluated by frequency response test, which shows well consistence with theoretical one. The results are so satisfactory that noise of 640 Hz, which is aimed to suppress, is reduced by 20db without significant distortion in other frequency band.

### 1. 서 론

산업문명이 발전함에 따라 가정과 직장은 많은 가전제품과 기계들로 들어차게 되어 인간생활은 과다한 소음에 노출되게 되었다. 특히 작업장에서의 과다한 소음은 작업자의 청각손실까지 가져올 수 있는 심각한 산업재해의 하나로 인식되고 있다. 소음제어는 크게 능동소음제어와 수동소음제어로 나눌 수 있다. 수동소음제어는 소음원을 외부공간과 절

연시키는 노력으로 저주파수 영역에서 유효하며, 고주파수(500 Hz 이상) 소음의 차단을 위해서는 차단구조물 질량이 과다해지는 단점을 갖는다.<sup>(1)</sup> 능동소음제어는 1936년 Lueg에 의해 최초로 제시된바 있으나,<sup>(2)</sup> 1970년대에 들어서서부터 반도체를 이용한 초고속 전자소자의 발전으로 능동소음제어의 실용화에 관한 연구가 활발하게 진행되었다.<sup>(3)</sup> 능동소음제어에 관한 연구는 덕트소음에 관하여 가장 활발히 수행되었다.<sup>(4,5)</sup> 현대건물이 대형화 함에 따라 덕트를 이용한 중앙집중식 공기조화 시스템이 일반화된 것과 덕트소음은 간단한 1차원 모델로 해석이 가능한 것 등이 그 이유인 것으로 생각된다.

\*충북대학교 대학원 기계공학과

\*\*회원, 충북대학교 기계공학과

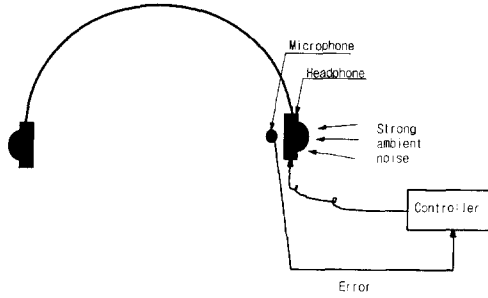


Fig. 1 Configuration of an ear-muff

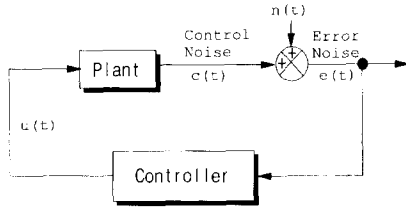


Fig. 2 Block diagram of an ANC system

또다른 유용한 적용대상으로 개인용 청각보호구를 들수있다.<sup>(6,7)</sup> 청각보호구는 소음제어 대상공간이 착용자의 청각기관에 한정되는 국소공간이므로 높은 소음제어 효과를 기대할 수 있음이 장점이다.

개인용 청각보호구의 기능으로 불필요한 소음만을 선택적으로 제거하여 일상적인 대화 등은 착용 상태에서 가능하도록 함을 생각할 수 있다. 이와 같은 기능부여로 모든 소음제거 기능의 청각보호구 사용시 대화를 위하여 착탈해야 하는 번거로움을 피할수 있게 된다. 본 연구에서는 이와 같이 특정 소음만을 제거하는 기능의 청각보호구의 개발에 관한 연구를 수행하였다. 제거대상의 특정소음은 그 주파수로 구별되는 것으로 가정하여 특정주파수 소음만을 제거하는 기능의 능동제어식 청각보호구에 관한 연구를 수행하였다. 일반적인 상용의 오디오 헤드폰에 특정주파수 소음을 선택적으로 제거하는 기능을 부여하기 위한 제어기 설계이론을 제시하였으며 제작 및 실험을 통하여 그 효과를 검증하였다. 이와 같은 기능의 청각보호구는 사격장, 프레스공장 등 특정소음이 지배적인 환경에서 효과적일 수 있을 것으로 생각된다.

## 2. 능동소음제어 시스템 구성

능동소음제어는 제어형태에 따라 피드백(Feedback) 제어, 피드포워드(Feedforward) 제어, 피드백-피드포워드제어로 크게 구분된다.<sup>(3)</sup> 피드포워드

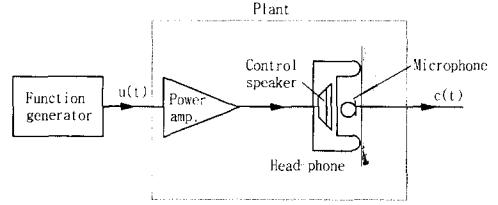


Fig. 3 Experimental setup for plant identification

제어는 소음원을 측정하여 이것과 크기가 같고 위상이 반대인 제어소음을 제어스피커로서 발생시켜 소음을 제거하는 방법으로 출력, 즉 합성소음의 피드백이 없는 제어이며 피드백제어는 소음원의 측정 없이 소음원에 의한 소음과 제어스피커에 의한 소음의 합성소음을 측정하여 피드백함으로써 소음제거 효과를 얻는 방법이다. 피드포워드제어는 오픈루프제어로서 음압 전달매체인 공기의 온도, 습도, 풍량 등에 의한 플랜트의 특성변화에 따라 소음제어 성능이 크게 영향받을 수 있어 적응제어 등 복잡한 제어기법이 요구되며,<sup>(8)</sup> 또한 소음원의 소음만을 측정하기 위한 세심한 주의가 필요하다. 피드백 제어는 상대적으로 플랜트의 특성변화에 민감하지 않으며 구현이 용이한 장점을 갖는다. 이와같은 이유로 본 연구에서는 피드백제어를 적용하였다.

Fig.1에 능동소음제어방식의 청각보호구를 보였으며 Fig.2에 그 블록선도를 보였다. 블록선도에서 플랜트는 제어기에서 제어스피커로 입력되는  $u(t)$ 로부터 제어스피커, 음파전달매질을 거쳐 마이크로폰에 전달되는 음압  $c(t)$ 까지의 전달함수에 해당된다.  $e(t)$ 는 제어소음  $c(t)$ 와 마이크로폰에 전달되는 외부소음  $n(t)$ 와의 합성음으로 청각보호구 착용자에게 들리는 최종 소음이다. 본 연구에서의 청각보호구는 상용 오디오헤드폰을 사용하였으며 헤드폰 내부공간에 마이크로폰을 설치하여 최종소음  $e(t)$ 를 피드백하였다.

## 3. 플랜트 특성규명 실험

본 연구에서 사용할 제어기의 설계를 위해 Fig.3과 같은 실험장치를 구성하여 제어 플랜트의 주파수응답특성 실험을 수행하였다. 그림에서와 같이 함수발생기로 단일조화함수를 발생시켜 앰프-제어스피커에 입력시키며 제어스피커에 의해 음파가 헤드폰내 공간에 방사되며 마이크로폰에 의해 측정된다. 함수발생기로부터 입력되는 신호  $u(t)$ 와 마이

크로폰에 의해 측정되는 신호  $c(t)$ 의 진폭과 위상을 비교하여 플랜트의 주파수응답을 실험적으로 구하였으며, Fig. 4에 그 결과를 보이고 있다. 이 실험결과로부터 최소 자승오차방법(least square error

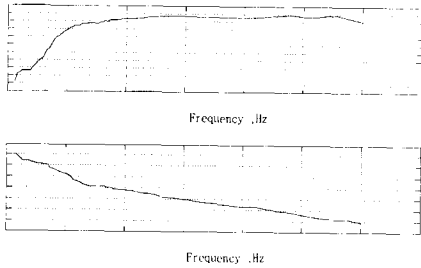


Fig. 4 Frequency response of a plant

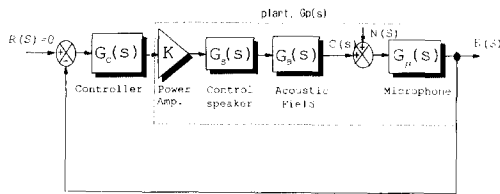


Fig. 5 Block diagram of an ear-muff with ANC

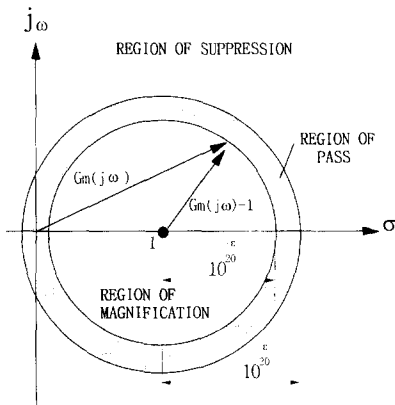


Fig. 6 Region of  $G_m(j\omega)$  and effects of ANC

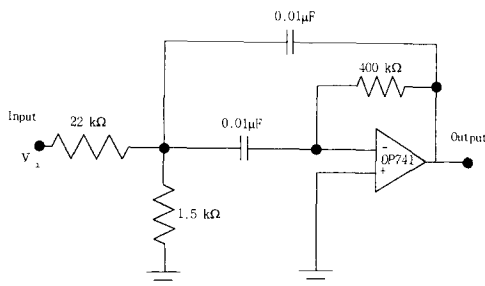


Fig. 7 Controller circuit

method)에 의한 플랜트의 근사적 선형모델링을 시도하였으며, 그 결과 선형시스템으로 모델링하기에는 무리가 있는 것으로 판단되었다. 따라서 플랜트 특성은 무리한 선형모델을 이용하기보다는 본 실험 결과로부터 얻은 각각의 입력주파수별 게인과 위상을 이용하는 것이 바람직할 것으로 판단되었다.

#### 4. 제어기 설계 및 제작

본 논문에서 연구될 능동소음제어 시스템의 세부 블록선도를 Fig. 5에서 보였다. 이로부터 제어시스템의 전달함수  $G_e(s)$ 는 아래와 같이 표현된다.

$$G_e(s) = \frac{E(s)}{N(s)} = \frac{1}{1 - G_m(s)} \quad (1)$$

$$G_m(s) = G_c(s) \cdot G_p(s) \quad (2)$$

$$G_p(s) = K \cdot G_a(s) \cdot G_s(s) \cdot G_\mu(s) \quad (3)$$

윗식에서  $G_c(s)$ 는 제어기 전달함수,  $G_p(s)$ 는 플랜트의 전달함수이다.

이 식으로부터 다음과 같은 소음제어 효과에 관한 조건식이 유도된다.

$\epsilon$ 을 임의의 작은 양의 값으로할 때(예로서  $\epsilon=3$ ) 소음통과 영역에서는

$$-\epsilon \text{ dB} < \left| \frac{E(j\omega)}{N(j\omega)} \right| < \epsilon \text{ dB} \quad (4)$$

소음감소 영역에서는

$$\left| \frac{E(j\omega)}{N(j\omega)} \right| < -\epsilon \text{ dB} \quad (5)$$

소음증가 영역에서는

$$\left| \frac{E(j\omega)}{N(j\omega)} \right| > \epsilon \text{ dB} \quad (6)$$

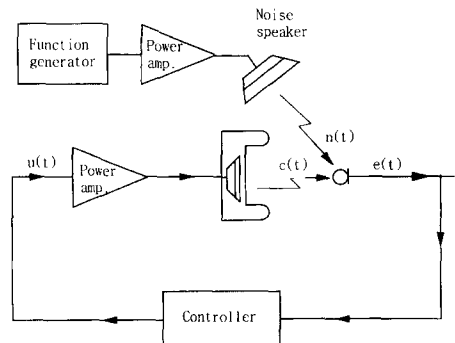


Fig. 8 Experimental setup for testing of the ear muff

식 (1)로부터 위의 조건식들은 Fig. 6와 같은 그림으로 표시된다. 이 그림을 참조하면 아래와 같은 소음감소를 위한 충분조건을 얻는다.

$$|G_m(j\omega)| > 1 + 10^{\frac{\epsilon}{20}} \quad (7)$$

윗식을 만족하는 주파수의 소음은 감소되므로 특정주파수 소음만을 제거하기 위하여는 그 주파수 성분만이 식 (7)을 만족시켜야 함이 필요하다. 이 조건은  $G_m(j\omega)$ 이 제거하고자 하는 주파수에서 공진극점(resonance peak)을 갖아야 함을 의미하고 이것은 식 (2)로부터 제어기가 제거하고자하는 주파수에서 공진극점을 가져야함을 의미한다.

이와 같은 추론으로부터 임의의 주파수 640 Hz에서 공진극점을 갖는 제어기를 아래와 같은 2차 시스템으로 설계·제작하였으며, Fig. 7에 그 회로도를 보였다.

$$G_c(s) = \frac{s}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (7)$$

윗식에서  $\omega_n = 640 \times 2\pi$ ,  $\zeta = 0.05$ 로 하였다.

Fig. 9에 식 (7)과 3절의 플랜트 특성실험결과를 이용하여 이론적으로 얻은 피드백제어 시스템의 주파수응답특성곡선을 보였다.

### 5. 능동소음제어 시스템의 성능시험

연구개발된 청각보호구의 성능시험을 위하여 Fig. 8와 같은 장치를 구성하여 주파수응답특성 실험을 수행하였다. 외부소음  $n(t)$ 는 함수발생기와 소음스피커를 사용하여 단일조화함수 소음을 청각보호구 외부에서 발생시켰으며, 마이크로폰으로 측정된 합성소음  $e(t)$ 를 측정하여 피드백하였다. 각 주파수별로 먼저 제어시스템의 동작을 끄고 마이크로폰으로  $n(t)$ 를 측정할 후, 제어시스템을 동작시켜 마이

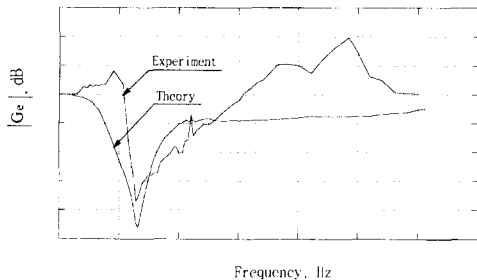
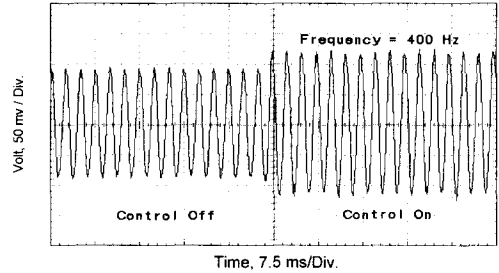
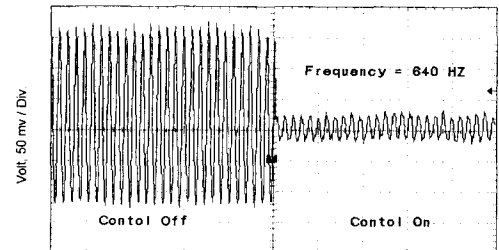


Fig. 9 Frequency response of the developed ear-muff

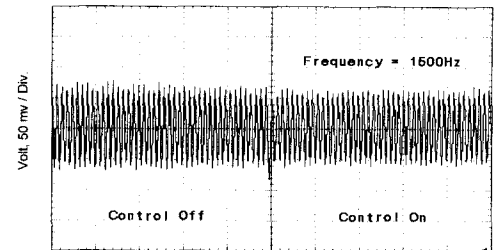
크로폰으로부터  $e(t)$ 를 측정하였다. 이렇게 측정된  $n(t)$ 와  $e(t)$ 의 진폭 비교를 통해 제어시스템의 주파수응답특성  $|G_e(j\omega)|$ 을 측정하였으며 그 결과를 Fig. 9에 보였다. Fig. 9를 보면 설계된 640 Hz에서 매우 큰 소음제어효과를 얻고 있음을 확인할 수 있



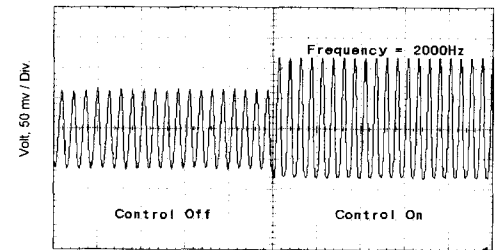
(a) 400 Hz



(b) 640 Hz



(c) 1500 Hz



(d) 2000 Hz

Fig. 10 Real time visualization of the ANC effect

다. 이론해석결과와는 달리 실험결과는 일부 주파수영역에서 오히려 소음이 증가됨을 확인할수 있었으며, 이것은 이론해석시 플랜트의 비선형성을 고려하지 않은것과 외부소음과 제어소음의 합성소음을 단순히 대수적 합으로 표현한 것에 이유가 있는 것으로 생각된다. Fig. 10에 이 실험시 측정된 몇 개 주파수 소음의 제어효과를 실시간 영역에서 보였다. 실험시 제어회로의 On-Off로써 제어효과를 시각적으로 대비하였다.

## 5. 결 론

특정주파수의 소음만을 선별적으로 제거하여 착용상태에서 일상대화가 가능하도록하는 능동제어식 청각보호구 개발에 관한 연구를 수행하였다. 일반적인 상용의 헤드폰에 마이크로폰을 부착하여 회드백함으로써 능동제어시스템을 구성하였다. 이와 같은 청각보호구는 싸이렌 차량내부, 사격장, 프레스 공장 등과 같이 특정주파수 성분이 지배적인 환경에서 효과적일 수 있으며, 본 연구에서 제시한 제어기의 직렬연결로써 2차, 3차 지배소음을 제거할 수 있게 된다.

본 연구에서의 이론해석 및 실험검증을 통해 제거하고자 하는 주파수에 공진극점(resonance peak)을 갖는 제어기로써 그 공진주파수의 소음을 선별적으로 제거할수있음을 확인하였으며, 본 연구에서 시도된 청각보호구의 경우 설계된 640 Hz의 소음 제거효과는 약 -20 dB를 얻었다.

## 참고문헌

(1) Tokhi, M. O. and Leitch, R. R., 1992, *Active*

*Noise Control*. Clarencon Press, Oxford.

- (2) Lueg, P., 1936, "Process of Silencing Sound Oscillations," U. S. Patent No. 2-043-416.
- (3) Shoureshi, R. Brackney, L., Kubota, N. and Batta, G., 1993, "A Modern Control Approach to Active Noise Control," *J. of Dyn. Sys., Meas. and Ctl., Tran. ASME*, Vol. 115, pp. 673~678.
- (4) Snyder, S. D. and Hansen, C. H., 1989, "Active Noise Control in Duct," *J. of Acoustic Society of America*, Vol. 86, No. 1, pp. 184~194.
- (5) Wu, Z., Varadan, V. K. and Lee, K. Y., 1995, "A State Space Modeling of One Dimensional Active Noise Control Systems," *J. Vib. and Acoustics, Trans. of ASME*, Vol. 117, pp. 220~225.
- (6) Simchauser, E. D. and Hawley, M. E., 1955, "The Noise Cancelling Headset~an Active Ear Defender," *Journal of the Acoustical Society of America*, 27, (1), 207.
- (7) McWilliams, J., 1993, "Implementation of an Active Noise Reduction System for Headphones," Master's report, U. C. Berkeley.
- (8) Wang, A. K. And Ren, W., 1995, "A New Indirect Adaptive algorithm for Feedforward Control with Application to Active Noise Cancellations," *Int. J. of Adaptive Ctl. and Signal Pressing*, Vol. 9. pp. 227~237.