

# 최대 진폭 응답으로 역위상을 천이시킨 헬멧에서의 소음감쇠 기법

## Noise Reduction of Anti-phase Shifting to Maximum Amplitude Response in a Helmet

조 병 모\*  
(Byung-Mo Cho\*)

\*순천대학교 전자공학과

(접수일자: 2001년 3월 13일; 수정일자: 2001년 5월 30일; 채택일자: 2001년 6월 20일)

소음제어기술은 산업현장에서 발생하는 소음을 감소시키기 위해 사용된 고전적인 방법이다. 능동적인 소음 감쇠기는 수동적인 소음 감쇠기에 비해 많은 이점을 가지고 있으며, 특히 능동적인 소음 감쇠시스템은 낮은 대역의 주파수 영역에서 소음 감쇠 성능이 우수하고, 소형, 경량으로 설계할 수 있는 이점이 있다. 본 논문에서는 수동적인 소음감쇠기로 헬멧을 사용하여 외부 소음을 감소시킨 후 헬멧 내에서의 소음을 제어할 수 있는 능동 소음 감쇠시스템을 제안한다. 제안된 능동적인 소음 감쇠시스템은 위상 지연 보상과 반전 회로와 외부 소음을 감지할 수 있는 마이크로폰과 외부 소음을 줄이기 위해 반전된 위상을 발생하는 스피커로 구성되어 있다. 그리고 소음감쇠 성능을 향상시키기 위해서 위상천이기를 사용하여 진폭 응답 곡선에서 최대가 되는 주파수에서 위상차가  $180^\circ$ 가 되도록 위상을 보정하여 소음을 저감했다. 본 논문에서 개발된 시스템은 위상 지연이  $50^\circ$ 와  $310^\circ$  사이에 존재하는 소음이 감소되었다. 이 시스템으로 인한 소음 감쇠는 약 20 dB의 감쇠 결과를 얻었다.

**핵심용어:** 소음감쇠 및 제어, 위상보상, 위상천이

**투고분야:** 소음 및 공력음향 분야 (10.6)

The active noise cancellation system offers a better low frequency performance with a smaller and lighter system compared to a passive one. This paper presents an active noise control system capable of reducing the noise in a helmet after attenuating the external noise using the helmet as the passive noise reduction system, which consists of a controller for inverting and compensating the phase delay, a microphone for picking up the external noise, and a loudspeaker for radiating the acoustic anti-phase signal to reduce the external noise. In this paper, external noise can be reduced by noise controller by compensating the phase difference to be  $180^\circ$  in the frequency of maximum value in the amplitude response. The noise of the phase delay covered from  $50^\circ$  to  $310^\circ$  was reduced in this system and it is possible to obtain a noise reduction of up to approximately 20 dB at the ears in the enclosure.

**Keywords:** Noise reduction and control, Compensation filter, Phase shifter

**ASK subject classification:** Noise and aeroacoustics (10, 6)

## I. 서론

ANR (Active Noise Reduction)은 감소시키고자 하는 소음이나 잡음을 진폭이 같고 위상차가  $180^\circ$ 인 제 2의 음을 능동적으로 스피커나 음향발생기를 통해 발생시켜서 소음을 감쇠시키는 방법이며, 냉장고나 에어컨에서 발생되는 소음, 특히 공조기의 덕트(duct)에 이용되고 있으며 [1], 장거리 전화 회선에서 발생하는 에코우 제거 (Echo Cancellation)나 등화기 (Equalization)[2], 3차원 공간에서의 음상정위 (Sound Localization)[3]나 입체 음향 재생 (Sound Reproduction)[4] 등에 응용되고 있다.

수동적인 소음 감쇠 기술은 소음 발생 지점과 감쇠시키려는 지점 사이에 흡음재나 방음재를 설치하여 소음을 차단 또는 감쇠시키는 방법으로 고주파 영역에서는 효과적이지만 저주파 영역 (약 500 Hz 미만)에서는 소음의 파장이 길어서 이를 흡음 또는 차폐시키기 위해서는 부피가 큰 흡음재나 차폐물이 필요하기 때문에 비효과적이다[5].

Feedforward 제어방식은 소음발생지점 (1차음장)과 소음을 제어하고자 하는 음장 (2차음장)사이에서 마이크로폰을 위치시켜서 소음이 1차음장에서 발생되어 2차음장으로 전파하여 가는 동안에 마이크로폰으로 음을 감지한다. 그리고 2차음장에 소음이 도착하는 시간을 고려하여 2차음장에서의 소음과 역위상이 되도록 마이크로폰에서 감지된 음을 증폭기나 제어기를 이용하여 변환한 후 스피커를 이용하여 2차음을 발생시켜서 소음을 감쇠시키는 방법이다[6,7].

적용 디지털 필터를 이용한 능동소음제어에서 궤환제어 (Feedback)방식은 소음과 상관관계가 있는 신호를 검출할 수 있는 경우에는 효과적이지만 상당히 많은 비동기적인 회전체를 갖는 기계가 운행중인 공장내 소음이나 자동차나 비행기와 같이 소음원이 공간 내에 넓게 분포되어 있는 경우에는 효과적인 방법은 아니다.

본 논문에서는 차음재로 고주파수 영역의 소음을 차단시킨 후, 궤환제어를 이용한 밀폐된 국소 영역에서 소음을 감쇠시키는 방법과 위상 천이기 (phase shifter)를 이용하여 소음의 주파수 대역을 천이시켜서 소음을 감쇠시키는 방법을 제안하고, 소음 감쇠 성능을 고찰한다.

본 논문에서 이용한 소음감쇠 시스템은 다음과 같다. DSP을 이용할 경우에는 아날로그 신호를 디지털로 변환할 때 생기는 샘플간의 시간차를 없애고 또 디지털로 시스템을 구성할 경우에 DSP나 메모리, 기타 입력력 소자가 필요하므로 소음감쇠 시스템이 방대해진다는 단점을

보완하기 위해서 본 논문에서는 먼저 수동적으로 헬멧을 사용하여 고주파수의 소음을 우선적으로 감소시키고 다음으로 헬멧내의 폐공간내에서 능동적인 방법으로 위상차가  $0^\circ$ 에서  $360^\circ$ 가 되는 주파수 영역을 위상천이기를 이용해서 개방이득이 최대가 되는 주파수 영역으로 천이시킨 후 소음을 감소시킨다.

2장에서는 국소영역에서 소음감쇠를 위해 설계한 시스템의 입출력관계와 시스템의 안정성에 대해서 살펴보고, 3장에서는 소음감쇠에 이용된 위상천이 회로의 전달 특성에 대해서 설명한다. 그리고 실험을 통하여 본 논문에서 제안한 구조의 성능을 고찰하고 결론을 맺는다.

## II. 폐공간 영역의 소음 감쇠

궤환제어에서 소음을 감쇠시키기 위해서는 먼저 이상적인 센서와 스피커 (이상적으로 모든 대역에서 진폭 특성이 평탄하고 위상지연이 영인 시스템)를 개발한다는 것은 불가능하기 때문에 이러한 특성을 보상할 수 있는 보상 필터 (Compensation Filter)를 사용하여 소음을 제어하여 소음을 감쇠시키고 있다. 이 때 보상필터를 설계할 때에 고려해야 할 우선적인 사항은 필터의 안정성에 관한 문제이다. 안정성에 영향을 미치는 가장 큰 요소는 센서와 스피커의 위치, 간격 차에서 생기는 음향학적 시간(위상)지연이다. 시간 지연을 최소화하고 스피커와 센서, 그리고 그 사이의 음향 함수를 포함한 전기음향 (electro-acoustic) 전달 함수의 위상 변화율이 최소가 되도록 시스템을 설계해야 한다. 음향학적 시간 지연을 최소화하기 위해서는 먼저 스피커와 센서간의 거리를 짧게 하는 것이 유리하다.

일반적인 궤환제어를 이용한 소음감쇠의 블록도를 그림 1에 나타내었으며, 증폭기와 제어기 (보상필터)는 외부에서 인가되는 소음을 마이크로폰으로 검출한 음  $p(t)$ 을 감쇠시키기 위해서 사용된 전기적인 시스템들이다.

마이크로폰에 입력된 소음  $p(t)$ 는 증폭되어 제어기에서 소음  $p(t)$ 와  $180^\circ$ 의 역위상이 되도록 위상을 보정한 후에 진폭을 조정하여 스피커로 제 2차음  $q(t)$ 를 출력한다. 이렇게 하여 스피커에서 방사된 역위상의 2차 음과 외부에서 인가되는 소음  $p(t)$ 가 음향 공간에서 중첩의 원리로 합해지면 외부에서 발생되어 들어오는 소음은 마이크로폰의 국소영역의 근방에서는 상쇄되어 감소된다.

스피커 증폭기의 입력을  $V_m(s)$ , 스피커 증폭기 입력

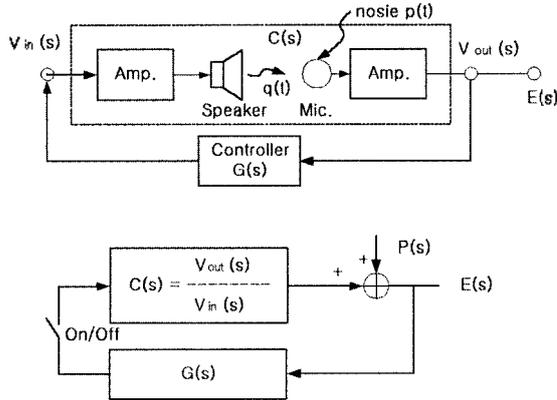


그림 1. 일반적인 궤환 소음제어 시스템  
Fig. 1. The general approach to a feedback noise reduction system.

과 마이크로폰 출력 ( $V_{out}(s)$ ) 사이의 전기 음향 전달 함수를  $C(s)$ , 소음이 스피커에서 방사된 신호와 음향공간에서 합해져서 감소된 신호를  $E(s)$ , 그리고 제어기의 전달함수를  $G(s)$ 라 한다면 소음이 감쇠된 신호  $E(s)$ 는 다음과 같다.

$$E(s) = P(s) + G(s) C(s) E(s) \quad (1)$$

이의 블록도는 그림 1(b)과 같이 나타낼 수 있으며, 식 (1)을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$E(s) = \frac{P(s)}{1 - G(s) C(s)} \quad (2)$$

전달 함수가  $\{1/(1 - G(s) C(s))\}$ 인 선형 시스템에 외부에서 인가되는 신호  $p(t)$ 가 백색잡음이고 그 전력스펙트럼 밀도가  $S_{pp}(w)$ 이라면 궤환이 있을 때 감쇠된 신호의 전력스펙트럼 밀도는 다음과 같이 주어진다[7].

$$S_{ee}(w) = S_{pp}(w) \left[ \frac{1}{|1 - G(jw) C(jw)|^2} \right] \quad (3)$$

임의의 각주파수  $w_0$ 에서  $E(s)$ 를 최소로 하기 위해서는  $|1 - G(jw) C(jw)|^2$   $w = w_0$ 가 최대가 되어야 한다. 여기서 주파수 응답  $G(jw) C(jw)$ 의 진폭을  $A(w)$ , 위상을  $\Phi(w)$ 라 가정하면

$$|1 - G(jw) C(jw)|^2 = 1 + A^2(w) - 2A(w) \cos \Phi(w) \quad (4)$$

일반적으로  $C(jw)$ 가 주어졌을 때, 이득  $A(w)$ 가 각 주파수에서 최대가 되도록, 그리고 감쇠시키고자 하는 소음의 주파수 대역내에서 소음원과 스피커에서 방사되는 2차 음원  $q(t)$ 의 위상의 합이  $\pm 180^\circ$ 가 되도록  $G(jw)$ 를

설계해야 한다. 식 (4)에서 알 수 있듯이 만일  $A(w)$ 가 크다면  $|1 - G(jw) C(jw)|^2$ 의 크기에는 위상응답  $\Phi(w)$ 는 큰 영향이 없다. 그리고  $\Phi(w)$ 의 값이 소음제어 대역에서  $+90^\circ$ 에서  $+270^\circ$  사이에 존재하면  $-A(w) \cos \Phi(w)$  항은 양수가 된다. 따라서  $C(jw)$ 와  $G(jw)$ 의 위상의 합이  $90^\circ$ 에서  $270^\circ$  사이에 존재해야  $|1 - G(jw) C(jw)|^2$ 의 값이 1보다 크게 되므로 소음이 감소된다.

지금까지는  $E(s)$ 의 전력스펙트럼밀도가 최소가 되기 위한 개방전달함수 ( $G(s) C(s)$ )의 이득과 위상에 관해서 살펴보았다. 다음으로 안정된 시스템을 구현하기 위한  $G(s)$ 의 특성에 대해서 설명한다.

$P(s)$ 가 0이라고 가정, 즉 소음이 인가되지 않는다고 가정하고  $G(s)$ 출력과  $C(s)$ 입력을 단절시킨 후  $C(s)$ 입력에 신호를 인가하여  $G(s)$ 출력에서의 위상천이가  $360^\circ$ 이면  $G(s)$ 출력에서의 신호는  $C(s)$ 입력 신호와 동일한 위상이 되며, 이 때에  $G(s)$ 출력을  $C(s)$ 입력에 연결할 경우  $C(jw) G(jw)$ 의 이득이 1보다 작다면  $C(s)$ 에 인가된 신호는 궤환되면서 점차 작아져 소멸된다. 그러나  $G(s)$ 의 이득이 1보다 크다면  $G(s)$ 출력은 궤환신호에 의해서 합해져서 점점 증가하게 되어 발산하게 된다. 따라서  $P(s)$ 에서  $E(s)$ 출력까지의 전체 시스템 (Closed loop system)을 안정하게 하기 위해서는  $E(s)/P(s)$ 의 극점 (pole)이  $s$ -평면의 왼쪽에 위치해야만 그 임펄스 응답이 안정하게 된다.

전체 시스템의 극점이  $F(s) = P(s)/E(s) = 1 - G(s) C(s)$ 의 영점이 된다.  $F(s) = 0$ 일 때  $G(s) C(s) = 1$ 이 되며,  $G(s) C(s)$ 을 Nyquist도로 그리면  $(1, j0)$ 으로 되고 여기서  $G(s) C(s)$ 의 영점이  $(1, j0)$ 을 포함하지 않는다면 전달 함수  $[1 - G(s) C(s)]^{-1}$ 을 갖는 필터는 안정하다. 따라서 궤환제어에서 시스템의 안정도와 소음감쇠를 위한 우수한 성능을 갖는 시스템을 구현하기 위해서는 스피커와 마이크로폰간의 크기와 위상응답 (개방응답)  $G(jw) C(jw)$ 을 고찰해 볼 필요가 있다. 이것이 Bode도 (주파수 응답 함수)로  $G(s) C(s)$ 의 주파수 응답을 그림 2에 나타내었다. 여기서 이득여유 (gain margin)는 다음과 같이 정의된다[7].

$$G_1 = 20 \log_{10} \frac{1}{|G(jw) C(jw)|_{w=w_1}} \quad [dB] \quad (5)$$

그림 2에서 실수 축과 만나는 점 ( $w = w_0, w = w_1$ )에서 각각 이득여유  $G_0, G_1$ , 그리고 위상여유  $\phi_0, \phi_1$ 를 나타내며,  $w_0 < w < w_1$  사이에서는 필터가 안정하게 되기 위해서는 위상응답이  $180^\circ$  근방에 있어야 소음감소가 우

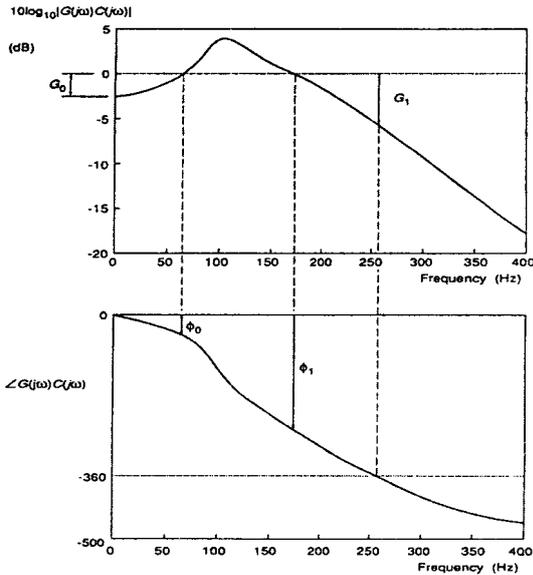


그림 2.  $G(j\omega)C(j\omega)$ 의 Bode도 (주파수응답함수). [5]  
Fig. 2. Bode plot of  $G(j\omega)C(j\omega)$  (frequency response function). [5]

수하다.

입력신호와 동상 ( $0^\circ$  또는  $360^\circ$ )이 될 때 시스템이 안정하기 위해서는 궤환되는 신호레벨을 낮아야 되므로 이득 여유는 클수록 좋다. 그리고 이득레벨이 큰 대역에서, 즉 이득이 0 dB보다 큰 주파수 대역에서 소음을 감소시키기 위해서는 역위상이 되어야 하므로  $\pm 180^\circ$ 의 위상차를 갖아야 한다.

앞에서도 언급했듯이 이득이 1보다 작아야 되고 우수한 제어시스템을 얻기 위해서는 대역 주파수 범위 내에서 스피커와 증폭기 특성 및 이들 사이의 음향특성의 위상변화가  $\pm 180^\circ$  이내인 필터를 설계하는 것이 바람직하며, 보다 소음감쇠 영역을 넓히고자 할 때에는 그림 2에서  $\pm 180^\circ$ 가 되는 주파수 대역을 확장시킬 필요가 있다. 특히 위상차가  $0^\circ$ 을 포함해서  $360^\circ$ 의 정수배일 때 이득이 1보다 큰 경우에는 불안정해지 때문에 소음을 제어하고자 하는 주파수 대역내에서 이득이 1보다 큰 경우  $360^\circ$ 의 정수배가 되는 주파수가 존재하지 않는 것이 바람직하다.

따라서 소음제어시스템을 설계할 때에는 먼저 위상차가  $\pm 180^\circ$ 가 되는 주파수의 대역을 확장한 후 다음으로 증폭기의 이득을 설정하는 것이 좋다.

### III. 위상 천이 및 보상

제어기의 진폭 특성은 크기가 일정한 이상적인 특성을 갖고 있어야 하며 스피커나 마이크론에서 필수적으로

생기는 위상 지연 특성만을 보상해 주는 필터가 필요하다. 일반적으로 극점과 영점이 많은 시스템의 경우에 소음제어 대역내에서 평탄한 이득 특성을 갖는 시스템을 구현하기 어려운 단점이 있다.

본 논문에서는 국소 영역의 패공간에서 소음 제어를 위해서 효과적인 방법으로 마이크론에 입력되는 소음만의 위상만을 반전시켜서 소음을 감소시키는 방법을 제안한다. 이 때에 소음 신호의 레벨을 변화시키지 않고 위상만을 변화시키고자 할 때에 구성할 수 있는 위상천이 회로의 특성곡선은 그림 3에 나타난 것처럼 두가지 종류가 있다.

Carme[8]은 복소공액인 두 개의 극점과 영점을 갖는 전달 함수를, 그리고 Wheeler[9]는 최소 위상 특성을 만족하는 1차 필터를 RC회로로 실현하는 방법을 제안했다. 본 논문에서 제안한 방법은 증폭도가 1이고 위상만을 변화시키는 필터를 이용했으며, 그 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = -\frac{R_2}{R_1} + (1 + \frac{R_2}{R_1}) (\frac{1/j\omega C}{R_3 + 1/j\omega C}) \quad (6)$$

여기서  $R_1$ 은 반전 입력소자,  $R_2$ 는 궤환 소자,  $R_3$ 은 비반전 입력소자, 그리고  $C$ 는 비반전과 접지사이의 소자이다. 만일  $R_1 = R_2$ ,  $1/CR_3 = K_1$ (여기서  $K_1$ 은 상수) 이라면

$$\frac{V_o(\omega)}{V_i(\omega)} = \frac{K_1 - j\omega}{K_1 + j\omega} \quad (7)$$

제어기의 전달함수는 식 (8)과 같다.

$$T(s) = (\frac{-s+z}{s+p})_{z=p=K_1} \quad (8)$$

여기서  $z$ 와  $p$ 는 각각 영점과 극점을 나타낸다. 그리고 실수이며,  $K_1$ 의 값, 즉 영점과 극점이 허수축에서 멀어질수록 위상응답은 완만하게 변한다. 분자의 항이  $(s-z)$ 인 경우에는 각주파수  $\omega$ 가 0에서  $\infty$ 로 증가함에 따라 위상변화는  $0^\circ$ 에서  $-180^\circ$ 까지 시계방향으로 변하고 분자

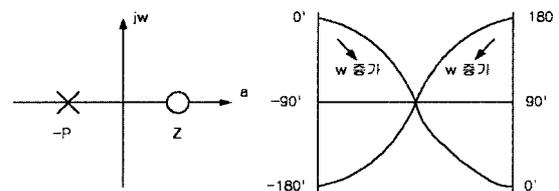


그림 3. 영점-극점도와 위상 응답  
Fig. 3. The pole-zero diagram and phase response.

항이  $(-s+z)$ 인 경우는  $w$ 가 0에서  $\infty$ 까지 증가함에 따라  $+180^\circ$ 에서  $0^\circ$ 까지 시계 방향으로 감소하도록 변환다. 그림 3과 같이 극점과 영점이 실수축의 좌·우에 대칭으로 위치하기 때문에 진폭 특성은 모든 주파수에서 일정하다.

크기가  $A(w)$ 이고 위상성분이  $\theta(w)$ 인 입력 신호를 응답이  $B(w) \angle \phi(w)$ (여기서  $B(w)=1$ )인 위상천이 필터에 통과시켜서 얻은 출력 응답을 극좌표형식(polarform)으로 나타내면  $A(w) \angle (\theta(w) + \phi(w))$ 가 되어 위상성분은 각주파수에 해당되는 위상만큼 더해져서 이동하게 되며, 이득은 변화가 없다. 이러한 특성을 이용해서 위상을 변화시킨 후에 소음과  $\pm 180^\circ$ 가 되는 2차음을 스피커를 통해 방사하여 소음을 감소시킨다.

#### IV. 실험 방법 및 결과 고찰

수동 소음감쇠를 위해서 먼저 헬멧을 이용해서 우선적으로 고주파수 영역의 소음을 감소시키고 저주파수 영역의 소음은 아날로그 회로로 위상천이기를 구현하여 소음을 감소시키는 실험을 했다. 이러한 실험을 위한 블록도를 그림 4에 나타내었다.

본 실험에서 이용한 각 구성기기의 기능은 다음과 같다. 수동적인 방법으로 음을 차폐하여 소음을 감소시키기 위해서 헬멧을 사용하였으며, 헬멧 내에는 외부소음과 스피커에서 출력되는 음을 감지하기 위한 콘덴서 마이크로폰과 그리고 그 음과 역위상이 되는 2차 음원을 발생시키는 스피커(스피커와 마이크로폰간의 거리는 1cm이며, 이를 그림 5에 나타내었다)를 설치하였으며, 외부에는 위상을 보상해 주는 위상보상 필터가 있다. 위상보상

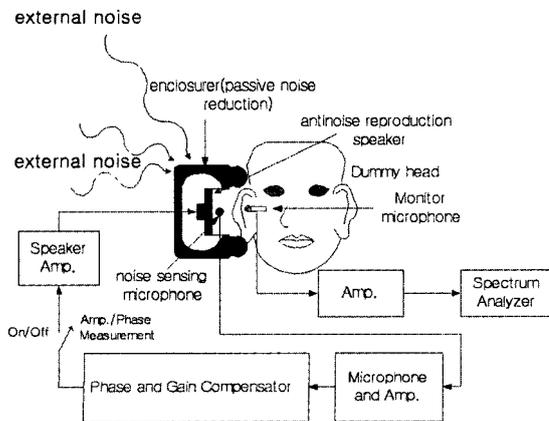


그림 4. 소음감쇠 실험 블록도  
Fig. 4. Block diagram of acoustic noise reduction.

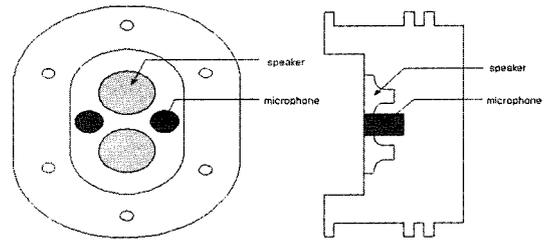


그림 5. 스피커와 마이크의 위치모양  
Fig. 5. The setup of speaker and Mic.

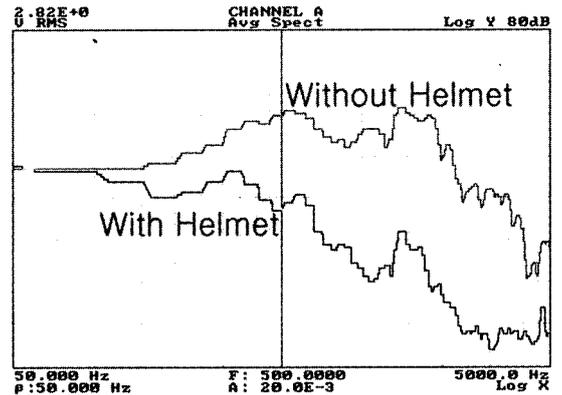


그림 6. Helmet의 소음감쇠 특성  
Fig. 6. Noise reduction of Helmet.

필터는 상용화된 그리고 일반적으로 용이하게 구입할 수 있는 증폭기로 구성하였다. 실험에 이용된 외부 소음은 백색잡음이며, 증폭기와 잡음발생기를 이용해서 발생시켰다.

##### 4.1. 수동소음감쇠기 헬멧의 소음 감쇠 특성

소음을 감쇠시키기 위해서 먼저 헬멧이 외부의 소음을 어느 주파수 영역까지 감쇠시키는지 알아보기 위해서 더미헤드(B&K, Type 4100-D)의 한 쪽 귀에 헬멧을 장착한 후 더미헤드의 양 귀에 설치되어 있는 마이크로폰으로 동시에 수음하여 이들의 스펙트럼을 32회 평균(이후에 있는 모든 스펙트럼은 마찬가지로 32회 평균했으며, 주파수 변위는 log scale이고 이득(y축) 변위의 한 간격은 10 dB이다)취했으며, 무보정(linear scale)으로 측정하여 그림 6에 나타내었다.

그림 6에서 알 수 있듯이 약 400 Hz에서 18 dB, 500 Hz에서 20 dB 정도 감쇠되는 것을 알 수 있으며, 그 이상의 주파수로 갈수록 10 dB/decade로 감쇠되어 고주파수 영역으로 갈수록 감쇠 성능이 우수했다. 따라서 수동과 능동 소음감쇠기법을 혼용할 경우 헬멧을 수동소음감쇠기로 사용할 때에는 소음 감쇠를 위한 보상필터는 약 600 Hz~700 Hz인 주파수 영역까지 고려하는 것이 바람직하다.

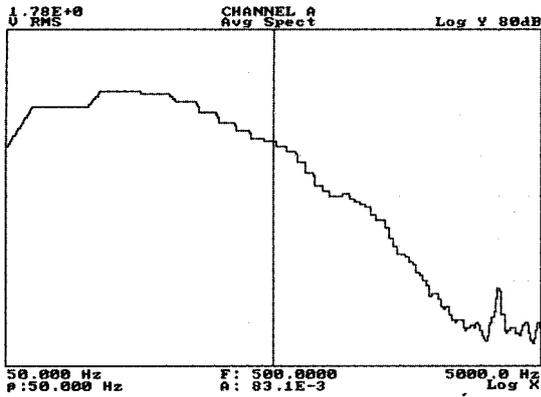


그림 7. 스피커 Amp.에서 마이크로폰 Amp.까지의 주파수 특성  
Fig. 7. Frequency response of speaker Amp.-Mic. Amp.

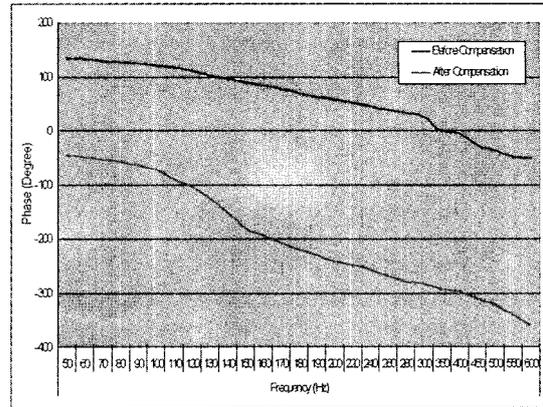


그림 8. 위상특성 (위: 보정전, 아래: 보정후)  
Fig. 8. Phase response (upside: before compensation, downside: after compensation).

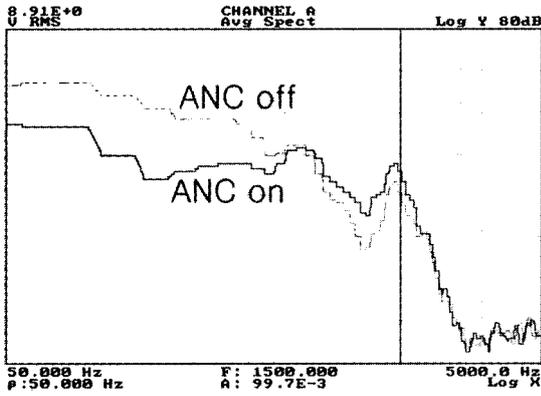


그림 9. 소음스펙트럼 (소음크기: 100dB)  
Fig. 9. Noise spectrum (noise level: 100dB).

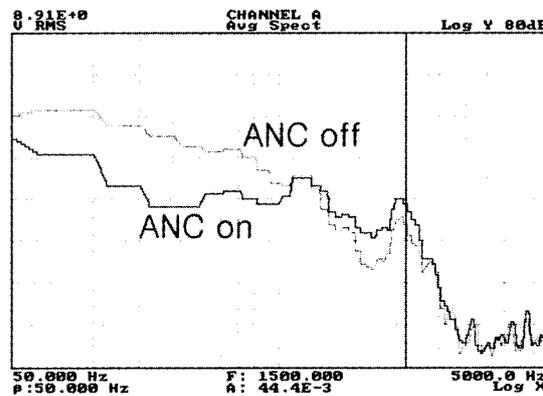


그림 10. 소음스펙트럼 (소음크기: 80dB)  
Fig. 10. Noise spectrum (noise level: 80dB).

#### 4.2. 실험에 이용된 증폭기와 마이크로폰 특성

다음에 위상보상 필터를 설계하기 위해서 그림 4의 블록도에서 보상필터를 제외하고 스피커와 증폭기, 마이크로폰, 그리고 헬멧 내의 음향특성까지를 포함한 진폭특성과 위상특성을 측정하였다. 이를 그림 7과 그림 8(위)에 나타내었다. 실험에 이용된 스피커와 증폭기, 마이크로폰을 포함한 이들 주파수 특성은 저주파수 영역에서 진폭특성(감도)이 우수하고 주파수가 높아질수록 진폭이 감소하는 특성을 갖는다. 그러나 그림 8의 위상특성을 살펴보면 진폭응답이 최대가 되는 150 Hz에서 위상차는 90°가 되기 때문에 스피커의 증폭도가 클 경우에는 불안정하게 된다. 따라서 이 주파수에서 위상차가  $\pm 180^\circ$ 가 되도록 위상을 천이시켜서 위상여유 (phase margin)을 크게 할 필요가 있다. 따라서 위상천이기를 이용해서 스피커를 포함한 마이크로폰까지의 진폭응답에서 최대가 되는 주파수 150 Hz에서  $\pm 180^\circ$ 가 되도록 위상을 천이시켰다. 이렇게 하여 측정된 위상응답을 그림 8의 아래 부분

에 나타내었다. 그러나 위상을 보정하기 전에는 소음을 감소시키고자 하는 주파수 대역 (50 Hz ~ 600 Hz)범위내에서 위상변화는 완만하게 변화했으나 보정 후의 위상 변화는 위상천이기에 의해 더해져서 오히려 더 급격히 변했다. 또 600 Hz인 경우에 위상차가  $\pm 360^\circ$ 가 되어 동상이 되었지만 헬멧에 의해서 외부에서 입력되는 소음이 약 20 dB 감소되기 때문에 시스템이 발산하지는 않는다.

#### 4.3. 실험 결과 고찰

마이크로폰과 스피커를 포함한 귀환제어기의 진폭특성이 그림 7과 같고 위상특성이 그림 8(아래)과 같을 때에 외부 소음레벨에 따른 소음감쇠를 실험했다. 소음발생기로 소음을 발생시킨 후에 음압레벨측정기 (B&K, Type 2237)로 측정하여 외부소음의 크기가 각각 100 dB, 80 dB인 경우, 소음감쇠 실험결과를 그림 9와 그림 10에 나타내었다. 50 Hz와 600 Hz 사이의 소음은 상당히 감소되지만 특히 800 Hz 이상 대역의 소음은 레벨이 낮기 때문

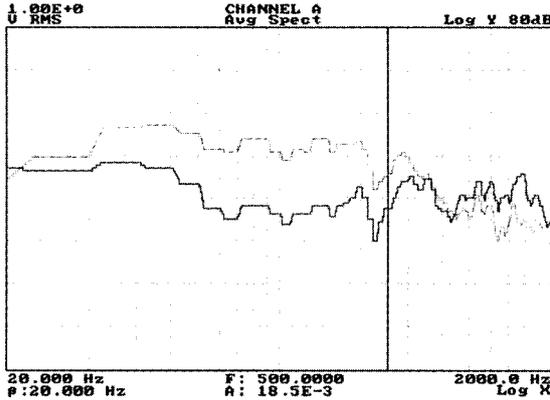


그림 11. 소음스펙트럼 (소음크기: 70dB)  
Fig. 11. Noise spectrum (noise level: 70dB).

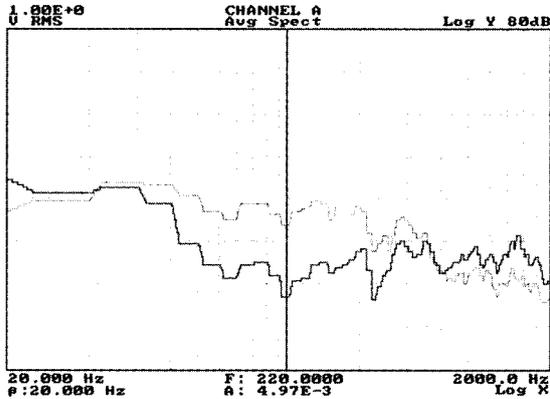


그림 12. 소음스펙트럼 (소음크기: 60dB)  
Fig. 12. Noise spectrum (noise level: 60dB).

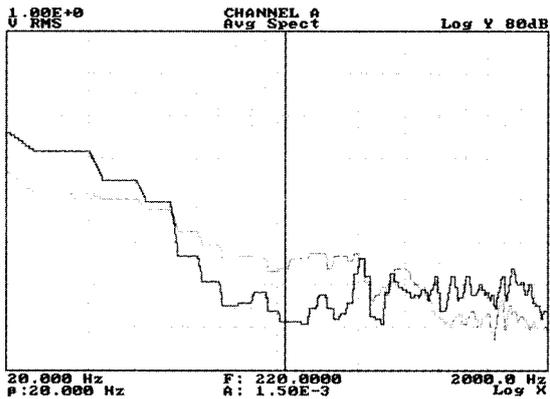


그림 13. 소음스펙트럼 (소음크기: 50dB)  
Fig. 13. Noise spectrum (noise level: 50dB).

에 감소되지 않으며, 약 1100 Hz의 주파수에서는 오히려 동상이 되어 약간 증폭되는 경향이 있다.

외부 소음레벨의 크기를 감소시키면서 소음감소레벨을 스펙트럼 분석기로 측정한 결과를 그림 11부터 그림 13까지 나타내었다. 여기서 주파수 범위를 20 Hz에서 2 kHz까지 나타내었다. 외부 소음레벨이 낮아짐에 따라 소음감소 주파수 범위가 좁아지는 것을 알 수 있다. 이것은

마이크로폰과 스피커의 증폭감도가 낮아지기 때문으로 해석된다.

마이크로폰과 스피커의 주파수 특성, 그리고 외부 소음의 크기가 언급되지 않아서 성능 결과를 참고문헌[5]의 결과와 직접적으로 비교할 수는 없지만 250 Hz에서 소음 감쇠는 약 20 dB, 200 Hz와 315 Hz에서는 약 15 dB의 소음감쇠 성능을 얻어서 본 연구에서 얻은 결과와 큰 차이는 없었다. 그러나 소음이 감소되는 주파수 대역은 넓어졌음을 알 수 있었다. 결과적으로 위상이  $\pm 180^\circ$ 인 150 Hz의 주파수를 중심으로 하위  $50^\circ$ 의 위상차가 생기는 60 Hz와 상위  $310^\circ$ 의 위상차가 생기는 500 Hz 사이의 소음은 감소되는 것을 알 수 있다. 그리고 외부 소음의 레벨이 낮아짐에 따라 소음감소 주파수 대역이 좁아짐을 알 수 있었다.

본 시스템을 이용하여 장시간 동안 실험 중 발산이나 불안정한 결과는 없었으며, 또 그림 11~그림 13에 나타난 것처럼 2 kHz 주파수 영역에서 간섭이 발생하지만 이는 궤환되는 신호의 크기가 작기 때문에 안정도에는 영향을 미치지 않는다.

## V. 결론

현재 소음공해 문제가 제기되고 있는 가운데 소음 감쇠기는 실생활에서 꼭 필요한 가치있는 분야로 부각되고 있다.

본 논문에서는 고주파수 영역에서 소음감쇠 성능이 우수한 수동방식과 저주파수 영역에서 우수한 능동방식을 혼용한 소음 감쇠 방법과 위상천이기를 사용하여 스피커와 마이크로폰의 진폭응답 중 최대가 되는 주파수에서 위상차가  $\pm 180^\circ$ 가 되도록 위상을 전이시켜서 소음레벨을 감소시키는 방법을 제안했다.

각각의 증폭기와 위상보상필터의 이득과 위상 특성을 해석하고 실시간 처리를 통한 실험으로 소음레벨의 감소 결과를 확인하였다.

실험 결과, 헬멧을 이용한 수동방식에서 소음은 100 Hz 부터 감소되어 최대 30 dB 정도 감소되었다. 그리고 수동 방식으로 감소된 소음을 기준으로 해서 능동방식의 경우에 약 15 dB에서 20 dB 정도의 소음 감쇠 결과를 얻었다.

외부 소음레벨이 낮아짐에 따라 소음감소 주파수 범위가 좁아졌으며, 위상이  $\pm 180^\circ$ 인 150 Hz의 주파수를 중심으로 하위  $50^\circ$ 의 위상차가 생기는 60 Hz와 상위  $310^\circ$ 의

위상차가 생기는 500 Hz 사이의 소음은 감소되는 것을 알 수 있었다. 그리고 외부 소음레벨이 낮아짐에 따라 소음감소 대역이 좁아짐을 알 수 있었다.

넓은 대역에서의 소음 감쇠 결과를 얻기 위해서는 스피커와 마이크로폰, 그리고 증폭기는 평탄한 특성을 갖도록 위상특성을 고려하여 제작되어야 한다. 그래서 이상적인 센서와 위상 지연이 없는 스피커와 증폭기를 이용하면 우수한 소음 감쇠 결과를 기대할 수 있다.

### 참고 문헌

1. D. Guicking, "Active noise control—achievement, problems and perspectives," *Inter-National Symposium on Active Control of Sound and Vibration*, Tokyo Japan, pp. 9–11, Apr. 1991.
2. J. 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. M. A. Gerzon, "Optimum reproduction matrices for multispeaker stereo," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 40, No. 7, pp. 571–589, July 1992.
5. V. Bartels, "Headset with active noise-reduction system for mobile applications," *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 40, No. 4, pp. 277–281, April 1992.
6. 城戸健一, ANCとは, *JAS Journal*, 12月号, pp. 9–14, 1992.
7. P. A. Nelson and S. J. Elliott, *Active Control of Sound*, Academic Press, pp. 204–230, 1992.
8. Ch. Carme, "A new filtering method by feedback for A.N.C. at the ear," *Proc. of Inter-Noise 88*, pp. 1083–1086, 1988.
9. P. D. Wheeler, "Voice Communications in the Cockpit Noise Environment—the Role of Active Noise Reduction," Ph.D. Thesis, University of Southampton, England, 1986.
10. L. Van Laere and P. Sas, "Principles and applications of active noise cancellation," *Proc. of Inter-Noise 88*, pp. 999–1002, 1988.
11. D. O' shaughnessy, *Speech Communication*, Addison-Wesley Publishing Company, 1987.

---

### 저자 약력

---

● 조 병 모 (Byung-Mo Cho)  
한국음향학회지 제20권 제1호 참조