

헤드셋 내부의 소음 감쇄를 위한 강인 제어기의 설계

°정태진* 박용식** 정찬수*

* 송실대학교 공과대학 전기공학과

** 명지대학교 전기정보제어공학부

Design a Robust Controller to Attenuate Residual Noise in a Headset

°Tae-Jin Chung* Young-Sik Park** Chan-Soo Chung*

* Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University

** Dept. of Control & Instrumentation Electrical Engineering, Myungji University

Abstract - This paper implements an active noise controller in a headset by solving Robust H_∞ control problem. In the H_∞ control framework, we can suppose the noise in a headset as disturbance and the noise control problem is cast on the well-known H_∞ regulation problem. By representing the system as LFT(Linear Fractional Transformaion) form, the controller is obtained using D-K iteraitons. The designed controller was implemented with operational amplifiers and it produced the desired noise reduction performance.

는 기법은 최근에 연구 중이나 아직 그 결과가 미흡한 실정이다. 본 논문에서는 설계된 제어기를 최적 Hankel 노음 근사법을 사용하여 저차화한 후에 이를 구현함으로써 저차의 제어기를 설계하였다. 최종적으로 설계된 제어기는 아날로그 필터를 사용하여 구현하였고 구현된 제어기로 실험을 해본 결과 능동소음제어기로서의 성능을 충분히 실현할 수 있음을 확인할 수 있었다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 헤드셋 시스템의 구성과 불확실성 및 설계사양을 정의한다. 3절에서는 설계사양을 만족하는 제어기를 D-K 반복법을 사용하여 구하고 이를 저차화한다. 4절에서는 최종적으로 설계된 제어기를 구현하고 이 제어기의 성능을 평가한다. 마지막으로 5절에서 결론을 맺는다.

1. 서 론

소음환경공해가 사람에게 미치는 영향은 신체적/정신적 피해 뿐만 아니라 근로자의 생산성에도 악영향을 준다고 알려져 있다. 통신용 헤드셋의 경우, 소음이 심한 환경에서 통신할 경우 외부에서 헤드셋의 내부로 유입되는 소음신호의 영향으로 통신내용이 불확실해질 수 있으며 장기간 지속되는 소음으로 인해 착용자가 쉽게 피로감을 느끼게 된다. 이런 문제는 특히 전투기나 전차의 조종사용 헤드셋에서 쉽게 발생된다.

외국의 경우 문제해결의 기초단계이라 할 수 있는 소형밀폐공간에서의 능동소음제어문제가 1956년도에 Olson에 의해 처음 제기되었고 이후 Wheeler(1986), Carme(1987) 그리고 Nelson과 Elliott(1992)에 의해 발전되어졌다[3]. 국내의 경우에는 1995년도에 그들의 방법을 응용한 연구결과[1]가 발표되어졌다. 하지만 이들 방법에서는 시스템의 모형을 정확하게 알고있다는 가정하에 제어기를 설계했으므로 모형화오차와 시스템 파라미터의 변화에 상당히 불안정하여 효과적인 성능을 기대할 수는 없었다. 이런 문제를 해결하기 위해 불확실성을 고려한 강인제어이론을 이용한 능동소음제어기의 설계방법이 연구되어졌다[2]. 이 연구에서는 제어스피커와 소형밀폐공간 구조의 특성에서 비롯되는 비선형 특성, 음향신호의 시간지연등을 불확정적요소로 두고 이들 요소에서 야기되는 불안정특성을 고려한 강인한 능동소음제어기를 설계하였다.

본 논문에서는 앞선 연구결과를 바탕으로 통신용 헤드셋에서 능동소음제어기를 설계한다. 우선 강인 H_∞ 제어이론을 도입하여 제어문제를 재정의하고 D-K 반복법을 사용하여 제어기를 구한다. 하지만 구해진 제어기는 가중합수 및 스케일링 함수의 차수가 더해진 고차의 제어기이므로 실제 구현하기에 어려움이 많다. 실제로 이런 고차의 제어기는 제어기의 계수에 작은 섭동이 발생할지라도 폐루프시스템을 쉽게 불안정하게 할 수 있음이 알려졌다. 설계사양을 만족하는 저차의 제어기를 설계하

2. 헤드셋 시스템 및 제어기 설계사양

2.1 헤드셋 시스템

사람이 헤드셋을 착용했을 때 작은 밀폐된 공간을 형성하게되고 음향학적으로 이 공간을 소형밀폐공간이라고 가정할 수 있다. 그림(1)는 헤드셋 시스템의 간략한 개념도이다.

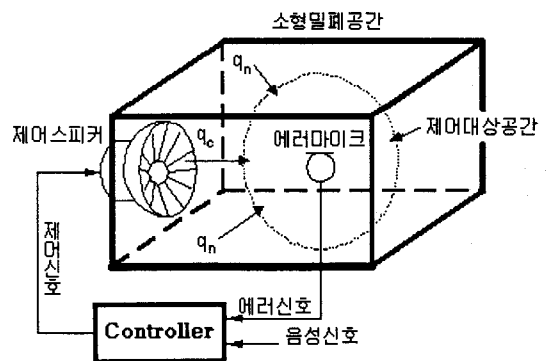


그림 1 헤드셋 시스템

그림에서 q_n 은 공간 외부의 소음원에서 공간 내부로 전달되어지는 소음신호이고 q_c 는 제어스피커를 통해 공간 내부로 전달되는 제어신호이다. 제어기는 에러마이크로 폰에서 측정된 에러신호의 에너지를 최소화하는 제어신호 q_c 를 발생하도록 설계되어져야 한다. 제어기 설계를 위한 첫 번째 단계로 우선 공칭모형을 구해야 한다. 헤드셋 시스템의 모형을 분석적으로 구하기는 상당히 복잡한 문제이기 때문에 제어스피커에서 오차마이크로폰까지의 음향전달특성을 측정하고 이를 근사화하는 전달함수

를 구함으로써 공칭모형을 구할 수 있다. 이를 위해서 제어스피커에 20Hz에서 10kHz의 sweep 정현파를 인가하고 오차마이크로폰에서 크기응답과 위상응답을 측정하였다. 그림(2)와 그림(3)의 점선은 측정된 주파수특성을 보인 것이다.

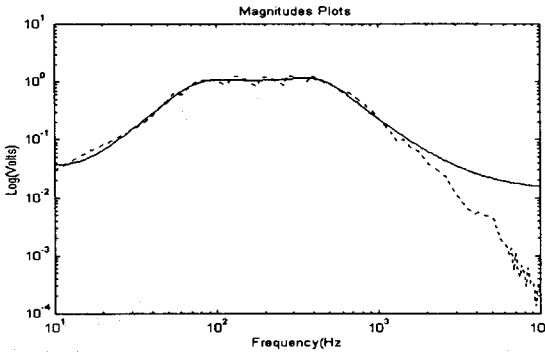


그림 2 크기응답곡선
(점선 : 측정데이터, 실선 : 근사함수)

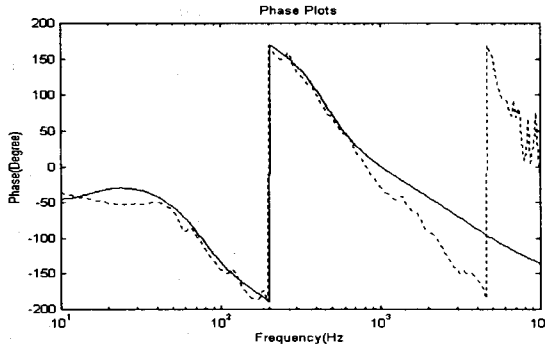


그림 3 위상응답곡선
(점선 : 측정데이터, 실선 : 근사함수)

위의 두 그림의 점선으로 나타낸 시스템의 특성을 근사적으로 표현하는 전달함수를 구하기 위해서 우선 크기응답특성을 근사화하는 전달함수를 curve fitting을 이용하여 구한다. 하지만 이 함수는 최소위상 전달함수이므로 실제 위상응답의 특성과는 상당한 차이를 갖는다. 이를 보상하기 위해서 구한 전달함수의 영점의 부호를 변화시키고 음향전달지연을 Pade근사함으로써 그림(2)와 그림(3)의 실선처럼 특성을 근사화하는 전달함수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Poles} &: \begin{pmatrix} -2.0109e+2 \pm j4.0951e+2 \\ -3.5747e+1 \pm j6.5969e+1 \\ -1.1111e+1 \end{pmatrix} \\ \text{Zeros} &: \begin{pmatrix} -9.3186e+0 \pm j1.2090e+1 \\ 2.2632e+3 \\ 2.6877e+3 \\ 1.1111e+1 \end{pmatrix} \\ \text{Gain} &: -3.0008e-2 \end{aligned} \quad (1)$$

2.2 제어기의 설계사양

헤드셋에서 능동소음제어기의 설계목적은 헤드셋 내부에 유기되는 소음의 에너지를 최소화하는 것이다. 그림(1)에서 알 수 있듯이 소음신호는 오차마이크로폰에 의해서 측정이 되므로 시스템의 감도함수 S 를 이용하여 다음과 같이 수학적으로 표현할 수 있고

$$\sup_{\|d\|_2 < 1} \|S\|_2 < \epsilon \quad (2)$$

설계자의 성능사양을 표현하기위해 가중함수 W_1 을 이용하여 다시 표현하면 식(2)와 같다.

$$\|S W_1\|_\infty < 1 \quad (3)$$

헤드셋에서는 내부로 유입되는 소음의 에너지가 주로 700Hz이하의 주파수 범위에 집중되어있고 원하는 소음의 감소를 약 20dB라고 정했을 때 가중함수 W_1 은 다음과 같이 정할 수 있다.

$$W_1 = \frac{0.3(s+31416)^2}{(s+3142)^2} \quad (4)$$

그림(2)와 그림(3)에서 알 수 있듯이 구한 모형은 저주파 영역에서는 실제 특성과 상당히 근접하지만 고주파영역에서는 그 특성에 차이가 발생하는 것이 알 수 있다. 모형의 차수를 증가시키면 고주파영역까지 근사화할 수 있는 모형을 구할 수 있으나 모형의 차수증가는 제어기의 차수증가를 가져오기 때문에 몇가지의 시행착오를 거쳐서 적당한 차수의 모형을 정하고 이후 발생하는 모형오차는 불확실성으로 두고 제어기를 설계할 수 있다. 고주파영역의 불확실성을 표현하기위해 다음과 같은 덧셈형 불확실 모형으로 가정할 수 있고

$$G = G_0(1 + \Delta W_2), \quad |\Delta| < 1 \quad (5)$$

상보감도함수 $T = 1 - S$ 를 이용하여, 만일 제어기가 식(6)의 조건을 만족한다면 위의 설계된 제어기는 위의 불확실 모형으로 표현된 시스템에서 강인안정 조건을 만족한다고 할 수 있다.

$$\|T W_2\| < 1 \quad (6)$$

가중함수 W_2 는 그림(2)와 그림(3)에서 표현되는 모형과 측정치와의 오차를 덧셈형 불확실 모형으로 충분히 표현할 수 있도록 다음과 같이 정할 수 있다.

$$W_2 = \frac{9(s+3142)}{(s+62832)} \quad (7)$$

따라서 식(3)과 식(6)의 조건을 만족하는 제어기를 구함으로써 원하는 소음제어기를 설계할 수 있다. 결과적으로 유도되는 설계문제를 다시 표현하면 다음과 같다.[4]

$$\begin{aligned} &\text{Find } K \\ &\text{subject to } \|S W_1\|_\infty < 1 \text{ and} \\ &\|T W_2\|_\infty < 1 \end{aligned} \quad (8)$$

위의 식으로 표현된 제어기설계문제는 기존의 DGKF, μ -synthesis, LMI 접근방법을 이용하여 구할 수 있다.

3. 제어기의 설계

강인 H_∞ 제어기 설계방법에서는 많은 제어문제를 LFT를 이용하여 표현한다. 헤드셋 시스템을 앞 절에서 구한 가중함수를 이용하여 LFT로 표현하면 그림(4)와 같다.

위의 그림에서 신호의 스케일링 가중함수 W_3 는 정의하지 않았기 때문에 1로 두었을 때, ω 에서 z 까지의 전달함수의 H_∞ 노음이 1보다 작은 제어기 K 를 구하는 것이 식(8)에서의 문제와 동일한 문제이다.

본 논문에서는 위의 문제를 D-K 반복법을 사용하여 풀었다. 하지만 이렇게 구한 제어기는 설계자의 성능조건을 만족하기는 하지만 모형의 차수에 가중함수의 차수와 D-K 반복법에서 사용하는 스케일링함수의 차수가 더해진 고차의 제어기이므로 실제로 구현하기 매우 힘들뿐만 아니라 구현할 수 없는 경우도 생길 수 있다. 최근에는 기존의 강인제어설계법으로 구한 제어기가 제어기 자체의 작은 변화에도 페루프 시스템을 쉽게 불안정하게 함을 보임으로써 구현상의 문제점이 지적되었다. 일반적으로 강인안정도와 성능조건을 만족하는 저차의 제어기를

설계하는 방법은 상당히 어려운 문제로 알려져 있다. 또

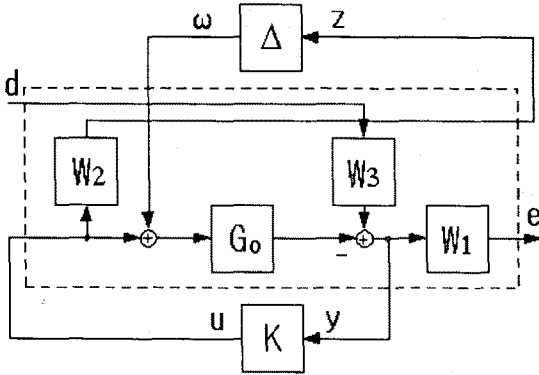


그림 4 헤드셋 시스템의 LFT 표현

다른 방법으로는 설계조건을 만족하면서 구현된 제어기의 차수를 저차화하는 방법을 이용할 수 있다. 식(8)의 문제를 만족하는 제어기의 차수는 16차의 제어기이다. 이 제어기를 저차화하기 위해 최적 Hankel 노름 근사법[4]을 사용하여 제어기의 차수를 설계사양을 만족하는 최소의 차수로 감소하였으며 그 결과로서 6차의 제어기를 구할 수 있었다. 그림(5)와 그림(6)은 강인안정도와 성능에 대한 SSV(Structured Singular Value)를 그린 것이다.

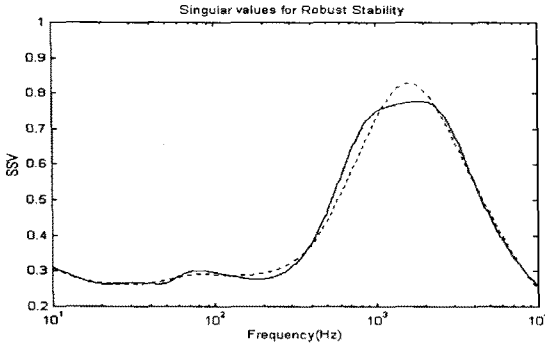


그림 5 강인안정도조건의 SSV
(점선 : 고차제어기, 실선 : 저차제어기)

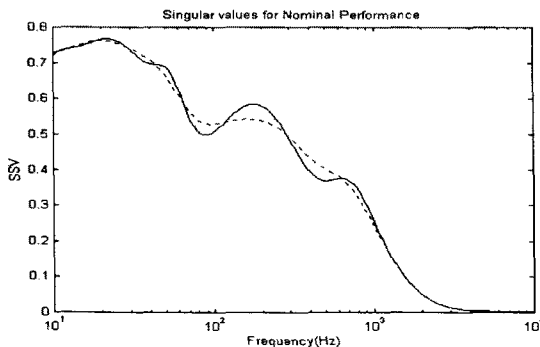


그림 6 성능조건의 SSV
(점선 : 고차제어기, 실선 : 저차제어기)

위의 그림에서 보면 고차제어기의 SSV와 저차 제어기의 SSV에 큰 차이가 나지 않으므로써 충분히 저차 제어기를 이용할 수 있음을 알 수 있다.

4. 실험

앞의 절에서 구한 최종의 제어기의 성능평가를 위해서 아날로그 능동소자를 사용하여 구현된 제어기를 구현하였다. 6차의 제어기를 4개의 Op-amp를 사용하여 구현하고 미세신호 증폭 및 저주파필터를 위해 2개의 Op-amp를 사용하였다. 성능실험을 위해서 헤드셋의 외부에 임의파형발생기를 이용하여 소음신호를 발생시키고 헤드셋 내부의 음압을 제어기를 가동했을때와 가동하지 않았을때 각각 측정하고 비교하였다. 그림(6)은 비교 결과이다. 그림에서 점선은 제어기를 가동하지 않았을 때이고 실선은 제어기를 가동했을 때 헤드셋 내부의 음압을 측정된 그림이다. 제어기는 설계사양(20dB의 소음감쇄)을 만족하는 것을 알 수 있다. 따라서 구현된 제어기는 헤드셋에서 능동소음제어기로서의 역할을 충분히 담당할 수 있을 것이라고 생각된다.

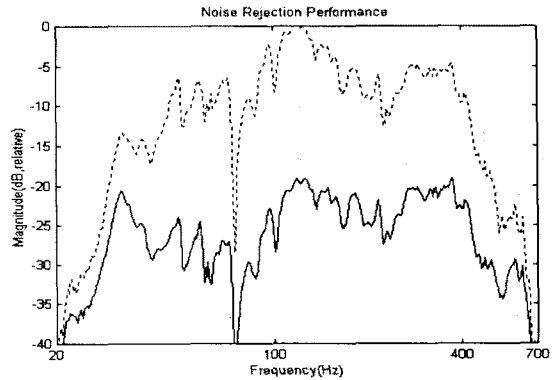


그림 7 소음감쇄성능
(점선 : 제어기 OFF, 실선 : 제어기 ON)

5. 결 론

본 논문에서는 헤드셋에서 능동소음제어기를 설계하였다. 헤드셋은 음향학적으로 소형밀폐공간으로 생각되어 질 수 있고 이 공간에서 능동소음제어기를 설계하기 위해 공간의 음향전달특성을 모형화하고 강인 H_∞ 제어문제로 표현한 후에 D-K 반복법을 사용함으로써 제어기를 설계할 수 있었다. 구현된 제어기는 실제로 구현하기에 적당하도록 저차화를 하였고 최종적으로 저차화된 제어기는 Op-amp 6개를 사용하여 구현할 수 있었다. 실험으로써 성능을 검증해본 결과 설계된 제어기는 소음에너지가 밀집된 저주파영역에서 20dB의 소음감쇄성능을 충분히 보임을 확인하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] 정태진, 정찬수, "Feedback Control of Noise in a Small Cavity," IEEE Singapore International Conference on Intelligent Control and Instrumentation, pp. 132-137, 1995
- [2] 정태진, 정찬수, "A Design of Ear Protector Using LMIs", 2nd ASCC 논문지, pp. 111-114, 1997
- [3] P. A. Nelson and S. J. Elliott, *Active Control of Noise*, London: Academic Press, 1992
- [4] K. Zhou, J. C. Doyle, and K. Glover, *Robust and Optimal Control*, Prentice-Hall, 1996
- [5] M. V. Valkenburg, *Analog Filter Design*, New York: Oxford University Press, 1982
- [6] G. J. Balas, J. C. Doyle, K. Glover, A. Packard, R. Smith, "mu-Analysis and Synthesis Toolbox, The MathWorks