

통신용 헤드셋에서 능동소음제어기의 설계

A Design of an Active Noise Controller in a Communication Headset

°정태진*, 정찬수*

*송실대학교 전기공학과(Tel:+82-2-820-0645;Fax:+82-2-820-0649;E-mail:tarzan@elec.pwr.soongsil.ac.kr)

Abstracts This paper studies an active noise controller in a communication headset. The system is a two inputs(communication signal and noise signal) and single output(error signal) system. The problem is to reduce noise level sufficiently lower than communication signal to receive the communication signal clearly. The approach to this problem is in two steps. In the first step, we solve the noise rejection problem without communication signals. In this step, the problem is transformed to the robust H_∞ regulating problem and solved using Linear Matrix Inequalities. In the second step, communication signal is introduced to the system. To verify the performance of the designed controller, a couple of experiments are performed.

Keywords Active Noise Control, Robust H_∞ control, Linear Matrix Inequalities(LMIs)

1. 서론

소음환경공해가 사람에게 미치는 영향은 신체적/정신적 피해뿐만 아니라 생산성에도 악영향을 준다. 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), Carne(1987) 그리고 Nelson과 Elliott(1992)에 의해 발전되어졌다[9]. 국내의 경우에는 1995년도에 그들의 방법을 응용한 연구결과[3]가 발표되어졌다. 하지만 이들 방법에서는 시스템의 모형을 정확하게 알고있다는 가정하에 제어기를 설계했으므로 모형오차와 시스템 파라미터의 변화에 상당히 불안정하여 효과적인 성능을 기대할 수는 없었다. 이런 문제를 해결하기 위해 불확실성을 고려한 강인제어이론을 이용한 능동소음제어기의 설계방법이 연구되어졌다[4,5]. 이 연구에서는 제어스피커와 소형밀폐공간 구조의 특성에서 비롯되는 비선형특성, 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 재정의를하고 선형 행렬 부등식을 이용하여 그 해를 구함으로써 강인한 능동소음제어기를 설계한다. 또 통신신호가 제어기의 입력으로 더해질 경우 통신신호에 가해지는 소음제어기의 영향을 줄이기위해 부가회로를 첨가하여 통신신호의 에너지에 비해 소음신호의 에너지를 충분히 감쇄시키는 제어기를 설계한다.

2. 예비 이론

2-1 강인 H_∞ 제어[6]

시스템이 그림(1)과 같이 표준계환블럭선도로 표현되었을 때 w 에서 z 까지의 페루프전달함수는 식(1)과 같이 표현된다.

$$F(P, K) = P_{11} + P_{12}K(I - P_{22}K)^{-1}P_{21} \quad (1)$$

강인 H_∞ 제어문제는 다음의 조건은 만족하는 안정한 제어기를 구하는 문제이다. 이 식에서 γ 는 H_∞ 성능지수이다.

$$\|F(P, K)\|_\infty < \gamma \quad (2)$$

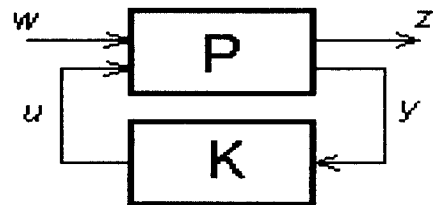


그림 1 표준계환블럭선도

Fig. 1 Standard feedback block diagram

이 문제를 푸는 방법으로 대수적인 방법과 수치적인 방법이 있는데 대수적인 방법에서는 2개의 선형 리카티방정식을 풀므로써 해를 구할 수 있고 수치적인 방법에서는 위의 문제를 선형 행렬 부등식의 형태로 재구성하고 이를 수치적으로 풀므로써 해를 구할 수 있다. 최근에는 선형 행렬 부등식의 해를 구하기 위한 효율적인 알고리즘의 개발로 후자의 방법이 많이 연구되어지고 있다. 본 논문에서는 후자의 방법을 이용하여 강인 H_∞ 제어 문제를 푼다.

2-2 강인 H_∞ 제어를 위한 선형 행렬 부등식

최근들에 선형 행렬 부등식의 관심이 높아지고 있는데 이는 기존의 제어문제들이 선형 행렬 부등식의 형태로 표현가능할 뿐만아니라 분석적이지 않은 제어문제들까지도 선형 행렬 부등식의 형태로 표현하여 이를 풀므로써 해를 구할 수 있고, 최소한 해의 존재유무를 파악할 수 있는 장점이 있기 때문이다. 게다가 부등식을 푸는 효율적인 알고리즘의 개발로 더욱 주목받게 되었다. 강인 H_∞ 제어문제도 선형 행렬 부등식의 형태로 변환하여 풀 수 있다.

표준계환블럭선도에서 플랜트와 제어기의 상태방정식이 식(3)과 식(4)로 표현된다면

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + B_1\omega(t) + B_2u(t) \\ z(t) &= C_1x(t) + D_{11}\omega(t) + D_{12}u(t) \\ y(t) &= C_2x(t) + D_{21}\omega(t) + D_{22}u(t) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_K(t) &= A_K x_K(t) + B_K y(t) \\ u(t) &= C_K x_K(t) + D_K y(t) \end{aligned} \quad (4)$$

페루프 전달함수는 식(5)로 표현된다.

$$T_{\omega c}(s) = D_{cl} + C_{cl}(sI - A_{cl})^{-1}B_{cl} \quad (5)$$

여기서

$$\begin{aligned} A_{cl} &= \begin{pmatrix} A + B_2 D_K C_2 & B_2 C_K \\ B_K C_2 & A_K \end{pmatrix} \\ B_{cl} &= \begin{pmatrix} B_1 + B_2 D_K D_{21} \\ B_K D_{21} \end{pmatrix} \\ C_{cl} &= (C_1 + D_{12} D_K C_2, \quad D_{12} C_K) \\ D_{cl} &= D_{11} + D_{12} D_K D_{21} \end{aligned}$$

이다.

강인 H_∞ 제어문제를 위한 선형 행렬 부등식의 표현은 다음의 정리로 표현된다.

정리 1. A가 안정적이라고 가정할 때, 다음의 선언은 동일하다.

- (a) $\|F(P, K)\|_\infty < \gamma$
- (b) 다음의 LMI를 만족하는 대칭 양정행렬 X가 존재한다.

$$\begin{pmatrix} A_{cl}' X + X A_{cl} & X B_{cl} & C_{cl}' \\ B_{cl}' X & -\gamma I & D_{cl}' \\ C_{cl} & D_{cl} & -\gamma I \end{pmatrix} < 0 \quad (6)$$

증명 : 참고문헌 참조[2,7,8]

선형 행렬 부등식의 해를 구하는 문제는 식(6)을 만족하는 K(s)와 X를 찾는 문제이고 이 문제는 효율적인 알고리즘으로 알려진 interior-point 알고리즘을 사용하여 푼다.

3. 시스템 소개

그림(2)는 통신용 헤드셋의 간단한 개념도이다.

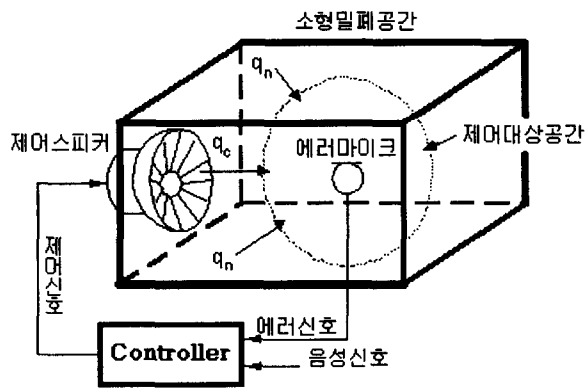


그림 2 소형밀폐공간시스템
Fig. 2 Small Cavity System

통신용 헤드셋을 착용했을 때 착용자의 머리와 헤드셋의 구조물 사이

$$G(s) = \frac{N_G(s)}{D_G(s)} \quad (9)$$

여기서,

$$\begin{aligned} N_G(s) &= 1.5839 \times 10^4 s^{13} + 2.6377 \times 10^8 s^{12} + 2.8089 \times 10^{12} s^{11} + 2.4151 \times 10^{16} s^{10} + 1.5244 \times 10^{20} s^9 + 7.5802 \times 10^{23} s^8 + 3.3841 \times 10^{27} s^7 \\ &\quad + 9.7806 \times 10^{30} s^6 + 3.1994 \times 10^{34} s^5 + 4.4480 \times 10^{37} s^4 + 1.0489 \times 10^{41} s^3 + 3.4276 \times 10^{42} s^2 \\ D_G(s) &= s^{14} + 1.5898 \times 10^4 s^{13} + 2.2188 \times 10^8 s^{12} + 2.2331 \times 10^{12} s^{11} + 1.5995 \times 10^{16} s^{10} + 1.1099 \times 10^{20} s^9 + 5.0087 \times 10^{23} s^8 + 2.4590 \times 10^{27} s^7 \\ &\quad + 2.2305 \times 10^{30} s^6 + 2.4776 \times 10^{34} s^5 + 4.4237 \times 10^{37} s^4 + 9.6508 \times 10^{41} s^3 + 7.6035 \times 10^{42} s^2 + 5.2925 \times 10^{46} s + 5.9396 \times 10^{46} \end{aligned}$$

에는 작은 밀폐된 공간이 존재한다. 보통 이 공간의 크기는 공간 내부에 유입되는 소음신호의 진폭의 크기보다 작다. 음향학적으로 이런 밀폐된 공간을 소형밀폐공간이라고 하며 이 공간 내부에서의 음압의 크기는 공간 내부의 위치에 관계없이 일정하다고 가정한다.

이러한 시스템에서 원하는 제어기는 외부에서 유입되는 소음신호의 에너지를 통신신호의 에너지보다 충분히 작게하여 명확한 통신신호의 전달을 하게 해야 한다. 제어기의 설계과정은 크게 2단계로 나누어지는데 첫 번째 단계에서는 통신신호를 무시하고 소형밀폐공간에서 공간 내의 소음신호를 제어하는 능동소음제어기를 설계한다. 두 번째 단계에서는 설계된 제어기에 통신신호를 입력으로 도입하고 통신신호에 대한 소음제어기의 영향을 줄이기 위해 부가제어기를 도입함으로써 전체적인 제어기의 설계를 한다.

4. 제어기의 설계

4-1 능동소음제어기의 설계

통신신호를 무시했을 때 그림(2)의 개념도는 그림(3)의 블록선도로 간략화되어 표현된다.

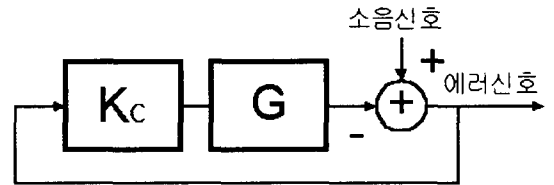


그림 3 소음제어기설계를 위한 블록선도
Fig. 3 Block diagram for noise controller design

그림에서 K_c 는 설계되어질 제어기, G는 소형밀폐공간의 음향전달경로를 나타내며 G는 비선형성, 시간지연등의 불확정성으로 인해 식(7)로 표현된다.

$$G = G_o(1 + \Delta W_2) \quad (7)$$

여기서 G_o , ΔW_2 는 각각 기준플랜트(nominal plant), 정규화된 불확정성을 나타내고 제작된 모형에서 구한 G_o 의 전달함수는 식(9)와 같다. 이런 불확정시스템에서 소음신호로부터 에러신호까지의 페루프전달경로는

$$T(s) = \frac{1}{1 + K_c(s)G(s)} \quad (8)$$

이고 능동소음제어문제는 식(2)를 만족하는 내부 안정 제어기를 찾는 것이다. 우선, 능동소음제어기를 위한 설계사양은 다음과 같이 정한다.

사양 1. 700Hz이하의 주파수 영역에서 감도함수의 크기를 -15dB 이하로 한다.

사양 2. 그 외의 고주파 영역에서 상보감도함수의 크기를 가능한 작게한다.

사양 1은 소음제어성능을 표현한 것으로 700Hz이하의 주파수대역에서 소음신호의 크기를 -15dB이하로 줄이겠다는 내용이고, 사양 2는 시스템의 불확정성의 한계를 정한 것으로 소음제어성능을 유지하면서 정해진 한계 이하의 불확정성에 대해서는 시스템의 안정성을 유지시키고자 하는 설계사양이다. 위의 설계사양은 식(10)과 같이 가중함수로 표현이 가능하고 이를 사용하여 그림(3)의 시스템을 표준제환시스템으로 변환한다.

변환된 표준제환시스템을 바탕으로 2장에서 강인 H_∞ 제어문제를 선형 행렬 부등식의 형태로 변환하고 이 해를 구한다. 본 논문에서는 Matlab의 LMI Control Toolbox를 이용하여 수치적으로 해를 구했다.

$$W_1 = \frac{20 \left(\frac{1}{195000} s + 1 \right)^2 \left(\frac{1}{197500} s + 1 \right)}{\left(\frac{1}{3000} s + 1 \right)^2 \left(\frac{1}{2500} s + 1 \right)} \quad (10)$$

$$W_2 = \frac{\left(\frac{1}{3529} s + 1 \right)^3}{100 \left(\frac{1}{75000} s + 1 \right)^3}$$

구해진 제어기는 전달함수는 그림(4)의 점선과 같다. 하지만 제어기의 차수가 너무 커서(20차) 하드웨어로 구현할 때에는 실선과 같이 저차화된 제어기(10차)를 사용한다. 그림(5)는 페루프시스템의 감도함수와 상보감도함수이다.

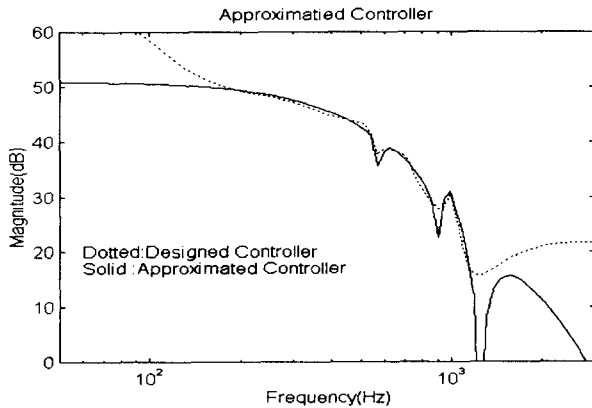


그림 4 수학적 제어기와 저차화된 제어기
Fig. 4 Mathematical controller and reduced-order controller

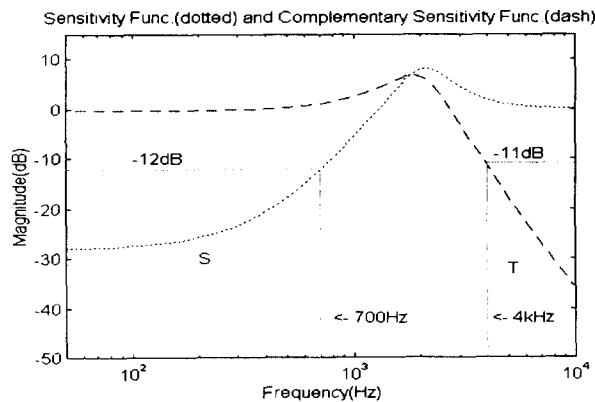


그림 5 감도함수와 상보감도함수
Fig. 5 sensitivity function and complementary sensitivity function

4-2 통신신호의 도입

대체적으로 음성신호의 주파수대역은 500Hz-8kHz로 알려져 있다. 따라서 설계된 소음제어기를 사용할 경우 음성신호의 일부(500Hz-800Hz)도 역시 제한되어 감쇄된다. 하지만 음성신호와 소음신호의 주파수대역이 일치하는 경우 소음신호만을 선택하여 제어하는 문제는 상당히 복잡하므로 다음과 같은 블록선도를 구성함으로써 문제를 해결한다.

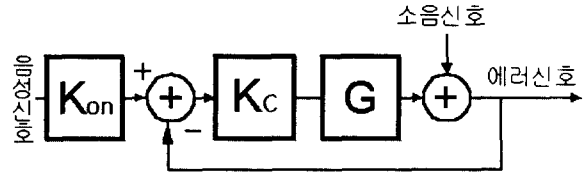


그림 6 통신신호 첨가시의 블록선도
Fig. 6 block diagram with communication signal

그림(6)의 블록선도에서 제어기가 가동되었을 경우 통신신호는 K_{on} 에 의해서 증폭되어짐으로써 K_c 에 의한 감쇄분이 보상되어진다. 이 결과로서 외부로부터 유기되는 소음신호만을 제어하고 통신신호에는 영향을 주지않는 효과를 얻을 수 있다.

5. 실험 및 결과

설계된 제어기의 성능을 평가하기 위해 제어기를 하드웨어로 구현하고 실제 소음에 대한 소음제어성능을 평가해 본다.

우선 설계된 제어기는 하드웨어로 구현하기에는 너무 큰 차수를 가지므로 이를 저차화하여 저차화된 제어기를 Op-Amp와 수동소자를 사용하여 구현한다. 실험에서 사용된 소음신호는 자동차주행시 발생하는 소음을 녹음하여 실험용 소음신호로 사용하였다.

첫 번째 실험으로 제어기의 소음제어성능 평가를 위해 소음환경에서 통신신호는 없이 제어기를 가동했을 때와 가동하지 않았을 때 오차신호의 스펙트럼을 비교하였다. 그림(7)는 실험결과이다. 그림에서 점선은 제어기를 가동하지 않았을 때, 실선은 제어기를 가동했을 때 오차신호의 스펙트럼을 나타내었다. 대체적으로 소형밀폐공간에 유입되는 소음신호는 700Hz이하에 에너지가 밀집되어 있음을 알 수 있다. 약 200Hz-700Hz의 주파수대역에서 제어기를 가동했을 때 소음신호의 크기는 가동하지 않았을 때보다 약 -20dB정도 감소되는 것을 알 수 있다.

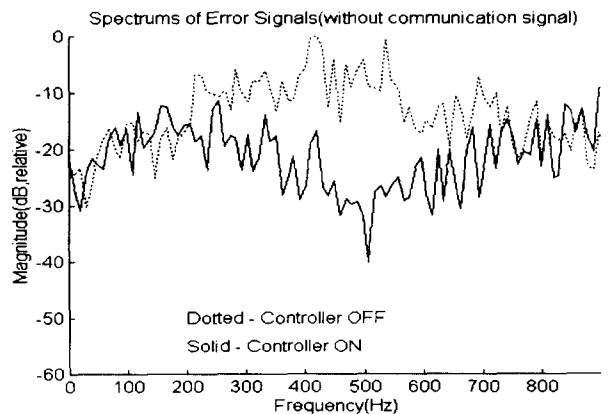


그림 7 능동소음제어기의 소음제어성능 : Case I
Fig. 7 Noise control performance of ANC : Case I

두 번째 실험으로 통신신호가 유입된 상태에서 제어기를 가동했을 때와 가능하지 않았을 때에 소음제어성능을 평가하고 통신신호의 크기변화를 비교하였다. 통신신호로는 530Hz, 680Hz, 870kHz의 단일 주파수 신호를 사용하였다. 그 결과가 그림(8), (9), (10)에 각각 보인다. 그림에서 점선은 제어기를 가동하지 않았을 때 헤드셋 내부의 음향신호의 스펙트럼이다. 이 경우 그림(7)의 점선에서 보인 소음신호에 통신신호로 가정된 530Hz의 단일주파수 신호가 복합된 음향신호임을 알 수 있다. 만일 이 음향을 듣는다면 외부소음의 영향으로 통신신호의 구별이 상당히 어려울 것이라는 것을 알 수 있다. 반면에 그림의 실선은 제어기를 가동했을 때의 스펙트럼이다. 이 경우에는 통신신호의 에너지가 소음신호의 에너지보다 충분히 크므로 통신신호의 구별을 쉽게 할 수 있을 것이다. 나머지 2경우도 첫 번째 경우와 동일한 결과를 같다. 제어기를 가동하지 않았을 때 소음신호의 스펙트럼에 가려져있던 통신신호가 제어기를 가동함으로써 그 구별이 확연해지는 것을 알 수 있다. 또 이 세 경우의 결과로 미루어 광대역 통신신호에 대해서도 같은 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

따라서 본 논문에서 설계한 능동소음제어기를 통신용 헤드셋에 응용함으로써 통신신호의 수신을 명확하게 할 수 있는 헤드셋을 제작할 수 있을 것이다.

6. 결론

본 논문에서는 소형밀폐공간에서의 능동소음제어기술을 응용하여 통신용 헤드셋에서 통신신호에 대한 소음신호의 영향을 줄이므로써 성능이 우수한 통신용 헤드셋을 위한 능동소음제어기를 설계·구현하였다. 설계방법으로는 우선 통신신호를 무시하고 강인 H_{∞} 제어이론과 선형행렬 부등식을 이용하여 소형밀폐공간에서의 능동소음제어기를 설계하고, 설계된 제어기에 통신신호를 입력으로 첨가한다. 이때 통신신호에 미치게 될 제어기의 영향을 보상하기 위해 제어기를 가동했을 때 통신신호를 적당히 증폭해주는 부가회로를 구성하였다. 설계된 제어기의 성능은 소음환경 내에서 단일주파수신호로 가정한 통신신호와 소음신호의 스펙트럼 변화를 비교함으로써 검증하였고 그 결과 설계된 제어기는 통신신호의 스펙트럼은 제어하지 않고 외부 소음신호의 스펙트럼만 제어함으로써 그 효율성을 증명하였다.

참고문헌

- [1] S.Boyd, L. ElGhaoui, ElFeron and V.Balakrishnan, *Linear Matrix Inequalities in system and Control Theory*. SIAM, 1994
- [2] Mahmoud Chilali and Pascal Gahinet, " H_{∞} Design with Pole Placement Constraints: An LMI Approach," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 41, 1996
- [3] Tae-Jin Chung and Chan-Soo, "Feedback Control of the Noise in a Small Cavity," *IEEE singapore International Conference on Interlligent Control and Instrumentation*, pp.132-137, July 1995, Singapore
- [4] Tae-Jin Chung, Woo-Hyun Ann, Chi-Hyoung You and Chan-Soo Chung, "A Robust Control of Noise in a Small Cavity," *High New Techology and Traditional Industry*, pp.487-492, July 28-31, 1996, China
- [5] Tae-Jin Chung and Chan-Soo Chung, "A Design of Ear Protector using LMIs," *proc. 2nd ASCC*, pp.111-114, July 22-25, 1997, Seoul
- [6] J. C. Doyle, B. A. Francis, and A. R. Tannenbaum, *Feedback Control Theory*. Macmillan Publishing Company, 1992

- [7] Pascal Gahinet and Pierre Apkarian, "A Linear Matrix Inequality Approach to H_{∞} Control," *Internation Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 4, pp.421-488, 1994
- [8] Pascal Gahinet, Arkadi Nemirovski, Alan J. Laub, and Mahmoud Chilali, *LMI Control Toolbox User's Guide*. Mathworks Inc., 1995
- [9] P. A. Nelson, S. J. Elliott, *Active Control of Noise*, London:Academic Press, 1992

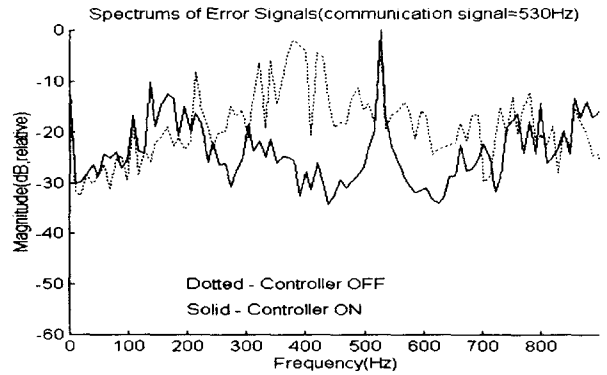


그림 8 능동소음제어기의 소음제어성능 : Case II
Fig. 8 Noise control performance of ANC : Case II

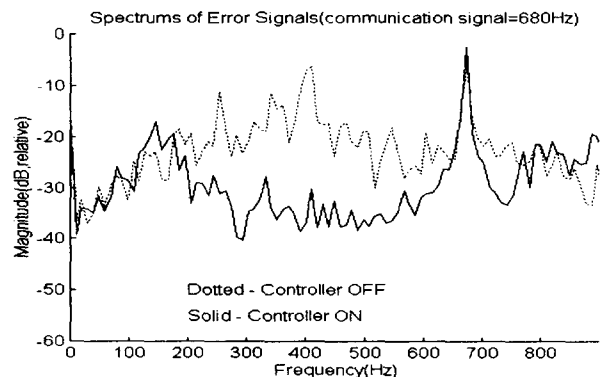


그림 9 능동소음제어기의 소음제어성능 : Case III
Fig. 9 Noise control performance of ANC : Case III

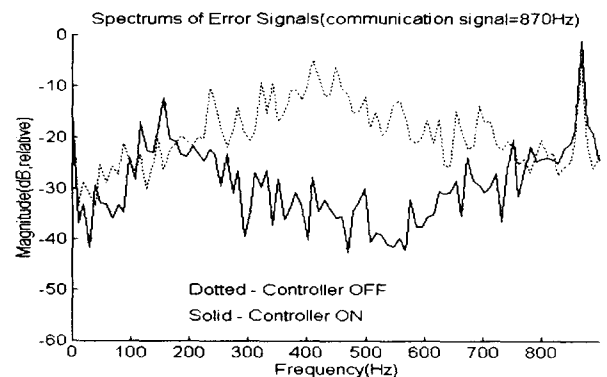


그림 10 능동소음제어기의 소음제어성능 : Case IV
Fig. 10 Noise control performance of ANC : Case IV