

광 디스크 드라이브 서보 설계를 위한 강건 제어

이론의 적용 및 평가: H_∞ vs. QFT

Robust Servo Design and Application for Optical Disk Drive Using Robust Control Theory : H_∞ vs. QFT

최진영† · 이광현* · 양현석* · 박노철** · 박영필**

Jin-Young Choi, Kwang-Hyun Lee, Hyunseok Yang, No-Cheol Park and Young-Pil Park

(2005년 5월 10일 접수 : 2005년 8월 29일 심사완료)

Key Words : Optical Disk Drive(광 디스크 드라이브), Robust Control(강건 제어), QFT, H_∞ , Mixed Sensitivity(혼합 감도), Disturbance(외란)

ABSTRACT

In this paper, the various uncertainties generated in an optical disk drive (ODD) and the robust servo designs considering the uncertainties are studied. First, the brief introduction an ODD and the servo error tolerance of it are discussed. Then, the classifications of uncertainty and the concept of relative stability are introduced. Considering the uncertainty of an ODD, two robust control approaches are applied: (i) mixed sensitivity approach in H_∞ control theory for unstructured uncertainty, (ii) QFT for structured uncertainty. Finally, the designed controllers are realized by DSP, and these controllers are applied to a commercial DVD-ROM drive. From these experiments, we prove that the designed robust controllers have more good disturbance rejection performance and robustness when it is compared to the conventional lead-lag controller.

1. 서론

광 디스크 드라이브(optical disk drive, ODD)는 다양한 물리적 특성을 가지는 광 디스크를 여러 배속에서 재생하므로, 각각의 경우 발생하는 외란은 서로 다른 정량적/정성적 특징을 보인다. 또한 광학적/기계적/전기적인 요소들로 구성된 광 픽업(optical pick-up)은 대량 생산에 따른 부품의 공차 및 조립 등에서 발생하는 불확실성(uncertainty)이 항상 존재

한다. 이러한 이유로 실제 시스템의 ODD 서보계의 설계는, 발생 외란의 불확실성과 광 픽업의 불확실성을 고려하여 제어기 루프를 상당한 여유를 두고 설계하고 있다. 그러나 필요 이상의 높은 제어 루프의 설계는 일반적으로 제어 입력을 크게 할 뿐만이 아니라, 광 디스크 표면의 스크래치(scratch)나 흑점(black dot)등에 너무 민감하게 반응하여 광 픽업이 발전할 수 있다.⁽¹⁾ 따라서 발생하는 불확실성을 보다 구체적으로 파악하여 이를 설계에 반영한다면, 보다 효율적이고 안정적인 제어기 설계가 가능하다.

불확실성을 고려한 제어 기법을 강건제어(robust control)라 하며, H_∞ 제어, μ -합성법(μ -synthesis), 그리고 QFT(quantitative feedback theory) 등이 대표적이다. ODD 서보 설계 분야에서 이러한 강건제어 이론이 다수 적용되어 왔으며^(7~10), 현재까지도 다양한 강건제어의 활용이 연구되고 있다.^(13~15) 그러나

† 책임저자 : 정희원, 연세대학교 CISD
E-mail : mithra@yonsei.ac.kr
Tel : (02)2123-4677, Fax : (02)365-8460

* 연세대학교 CISD

** 정희원, 연세대학교 CISD

기존의 대부분의 선행 연구에서 주로 광 픽업의 불확실성만을 주로 다루어 왔고, 외부에서 발생하는 외란의 불확실성에 대한 고려는 상대적으로 미흡하였다. 일부 문헌에서 ODD의 작동 중 발생하는 ODD의 외란과 서보 루프의 관계를 언급한바 있으나,^(9,12) ODD에서 발생하는 다양한 외란을 구체적으로 측정하고 이를 바탕으로 제어기를 설계하고 평가한 연구는 아직까지 없었다. 또한 강건 이론을 이용하여 설계된 기존의 대부분의 제어기 구조는, 제어기의 차수 및 구조적인 측면에서 상용 ODD의 서보 IC에 의한 구현이 적합하지 못한 점이 문제점으로 지적되어 왔다.

따라서 이 논문에서는 기존의 연구에서 심층적으로 다루지 않았던 ODD의 불확실성을 보다 정량적/정성적으로 다루고, 외란의 불확실성 및 광 픽업의 불확실성을 고려하여 H_∞ 및 QFT 강건제어 기법을 이용하여 제어기를 설계/평가하였다. 시스템에서 발생하는 불확실성을 구조적인 불확실성(structured uncertainty)과 비구조적인 불확실성(unstructured uncertainty)으로 분류하고, 비구조적인 불확실성에 대하여 H_∞ 의 혼합감도(mixed sensitivity) 기법을 그리고 구조적인 불확실성에 대하여 QFT 이론을 적용하였다. 설계된 제어기는 모델 축소(model reduction)을 통하여 상용 제어기 구조와 유사하게 하였으며, DSP를 이용하여 상용 12배속 DVD-ROM 시스템에 구현하였다. 실험을 통하여 강건 제어이론을 이용하여 설계된 제어기가 외란 저감 성능 향상에 도 불구하고, 충분한 강건 안정성이 보장됨을 보였다.

2. ODD 서보 루프의 구성 및 허용 오차

2.1 ODD 서보 루프의 구성

광 픽업의 구동에 따른 포커싱 방향과 트래킹 방향의 간섭은 매우 작으므로, 각각의 서보 루프는 Fig. 1과 같이 단일 입출력(single input single output) 시스템으로 간주할 수 있다. 이 때 해석의 편리를 위하여 노이즈는 없는 것으로 가정하였다. 시스템에 대한 개루프 전달함수를 $L(s)$ 그리고 폐루프 전달함

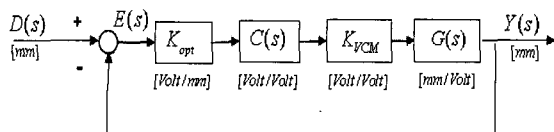


Fig. 1 Schematic servo block diagram of an ODD

수를 $T(s)$ 라 하면, 각각의 루프는 식 (1)과 (2)로 표현된다.

$$L(s) = K_{opt} \cdot C(s) \cdot K_{VCM} \cdot G(s) \quad (1)$$

$$T(s) = L(s)/(1+L(s)) \quad (2)$$

여기서 K_{opt} 는 광학 이득으로 오차 $E(s)$ 를 전압으로 변환시켜 주며, $C(s)$ 는 제어기를 그리고 K_{VCM} 는 전압 드라이브 이득을 각각 의미한다. 마지막으로 $P(s)$ 는 광 픽업으로 인가되는 전압에 비례하여 구동한다. 이와 같이 정의된 시스템에서, 감도 전달함수 $S(s)$ 의 정의 및 폐루프 전달함수 $T(s)$ 와의 관계는 식 (3)과 같다.

$$S(s) = 1/(1+L(s)), \quad S(s)+T(s) = 1 \quad (3)$$

이들 식으로부터 외란 $D(s)$ 와 시스템의 출력 $Y(s)$, 그리고 오차 $E(s)$ 의 관계를 유도하면 식 (4)와 식 (5)가 얻어진다.

$$Y(s)/D(s) = L(s)/(1+L(s)) \quad (4)$$

$$E(s)/D(s) = 1/(1+L(s)) \quad (5)$$

식 (4)는 외란 저감을 위하여 광 픽업의 출력 $Y(s)$ 가 외란 $D(s)$ 에 대하여 제어 대역까지 잘 추종해야 한다는 것을 의미한다. 이때 디스크의 외란

Table 1 Optical parameters vs. error tolerances in an optical disk

| ODD | NA | λ [nm] | Error tolerance[μm] | |
|-----|------|-------------------|----------------------------------|----------|
| | | | Focusing | Tracking |
| CD | 0.45 | 780 | 1 | 0.1 |
| DVD | 0.6 | 650 | 0.23 | 0.022 |
| BD | 0.85 | 405 | 0.045 | 0.009 |

CD: compact disk DVD: digital versatile disk
BD: blu-ray disk

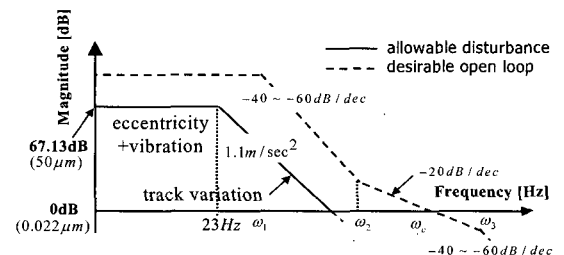


Fig. 2 Disturbance regulation value (DVD, tracking direction, reference speed)

$D(s)$ 에 대하여 추종하지 못하는 양은 오차 신호 $E(s)$ 로 나타나게 된다. 이 과정에서 해석에 유의할 점은, 일반적인 제어 시스템과 달리 오차 $E(s)$ 가 허용 정밀도 이상으로 발생하면 서보에 실패한다는 것이다. 이것은 제한된 영역에서만 서보에 필요한 유효한 오차 신호를 생성할 수 있기 때문이다.

2.2 외란 특성과 허용 오차와의 관계

ODD에서 발생하는 외란은 다양하지만 제어계를 통하여 보상되는 외란은 기계적인 외란이 지배적이므로, 이 논문에서는 관심 대상을 기계적인 외란만으로 한정하였다. 이때 각 ODD의 허용 오차는 빔의 초점심도(focal depth) h 및 빔 웨이스트(beam waist) d 그리고 피트(pit)의 폭과 밀접한 관련이 있다. 레이저 다이오드의 파장 λ 와 광 픽업 대물 렌즈의 개구율(numerical aperture) NA 가 주어질 때, 빔의 초점심도 h 와 빔 웨이스트 d 는 다음과 같이 각각 정의된다.

$$h = \pm \lambda / (NA)^2, \quad d = \lambda / NA \quad (6)$$

이때 각각의 허용 오차는 각 ODD의 규격집(specification book)을 통하여 규제하고 있으며, 광 디스크의 종류에 따른 허용 오차를 Table 1에 제시하였다. 또한 규격집을 통하여 광 디스크가 기준 배속에서 만족시켜야 할 외란 특성을 규정하고 있으며, 이 논문에서 사용된 DVD 계열의 트래킹 방향의 외란 규제치를 Fig. 2에서 보여준다. 여기서 0dB는 각 허용 오차인 $0.022 \mu\text{m}$ 이며, 시스템의 올바른 작동을 위해서 설계된 제어기는 규격집에서 제시한 외란 규격보다 최소한 큰 값을 가져야 한다.

3. 시스템 불확실성의 표현 및 강건제어와의 관계

3.1 제어 시스템에서의 불확실성의 분류

시스템의 불확실성은 여러가지 형태로 존재하며, 이 논문에서는 불확실성을 (a) 구조적인 관점과, (b) 불확실성이 존재하는 영역에 따라 분류하였다^(2~4).

먼저 불확실성의 구조적인 관점에서 (i) 구조화된 불확실성과 (ii) 비구조화된 불확실성으로 분류할 수 있다. 구조화된 불확실성이란 어떤 구체적인 파라미터 변동으로 표현되는 불확실성을, 그리고 비구조화된 불확실성이란 구체적인 파라미터 변동으로 정의하

기 어렵고 어떤 범위로만 한정되는 경우를 말한다.

다음으로 불확실성이 발생하는 영역의 분류에서 (i) 신호의 불확실성(signal uncertainty)과 (ii) 모델의 불확실성(model uncertainty)으로 구분할 수 있다. 여기서 말하는 신호의 불확실성이란 노이즈 및 외부에서 발생하는 외란의 불확실성을 의미하며, 모델의 불확실성이란 플랜트 그 자체의 불확실성을 의미한다.

ODD에서 발생하는 구조화된 불확실성은 구체적인 파라미터 변동, 즉 DC 게인, 공진주파수 그리고 감쇠비 등 어떤 구체적인 값의 변화를 포함한다. 이와 별개로 비구조화 불확실성은 어떤 구체적인 파라미터의 변동 값으로 정의하기 힘들고, 변동 범위로 대략적으로 표현 가능한 불확실성을 말한다. 대표적으로 광 픽업의 고주파 부공진 등이 이 영역에 속한다. 또한 시스템의 관점에서 분류되는 신호의 불확실성은 외부 노이즈 및 발생 외란의 불확실성을, 그리고 모델의 불확실성은 광 픽업의 불확실성을 의미한다.

3.2 광 픽업의 불확실성

이 논문에서 채택한 12배속 DVD-ROM 드라이브의 광 픽업의 사양은 Table 2와 같다. 따라서 이들 파라미터로부터, 구조화된 불확실성을 확인할 수 있다. 불확실성과 모델과의 관계를 보다 상세히 알아보기 위하여, 광 픽업의 전기/기계적 운동방정식에서 전압 $V(s)$ 에 대한 광 픽업의 변위 $X(s)$ 에 대한 수학적 모델의 전달 함수 $G_{math}(s)$ 는 식 (7)과 같다.

$$G_{math}(s) = \frac{X(s)}{V(s)} = \frac{1}{R + Ls} \frac{Bln}{ms^2 + cs + k} \quad (7)$$

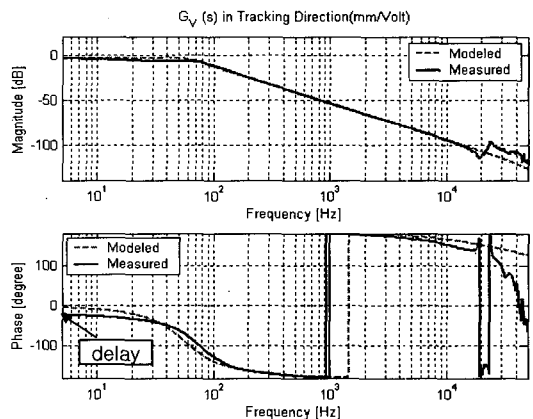


Fig. 3 Optical pick-up FRF: tracking direction

여기서, R 과 L 은 각각 구동 코일의 저항과 구동 코일의 인덕턴스를, 그리고 m 은 가동부의 질량, c 및 k 는 지지 스프링의 감쇠 계수 및 강성 계수를 의미한다. 또한 B 는 전자기 회로의 자속 밀도, l 은 전자기 회로내의 코일의 유효 길이, n 은 코일의 권선수, 그리고 i 는 구동 전류를 나타낸다. LDV(OFV 3001, Polytec)와 동적신호분석기(HP 35670A, Agilent)를 통하여 얻은 광 픽업의 모델은 Fig.3과 같으며, 3차의 모델로 곡선 적합(curve fitting)하여 얻어진 실험적 모델의 전달함수 $G_{exp}(s)$ [mm/Volt] (8)과 같다.

$$G_{exp}(s) = \frac{0.6}{3.4e-11s^3 + 7.61e-6s^2 + 0.002825s + 1} \quad \text{[mm/Volt]} \quad (8)$$

실험을 통하여 얻은 동특성은 Table 2의 사양을 만족하지만, 공칭 모델과 비교하였을 때 저역 감도 $S_L(s)$ 및 고역 감도 $S_H(s)$ 측면에서 낮은 성능을 보였다.

시스템의 구조적/비구조적인 불확실성을 고려한 광 픽업의 불확실성을 Bode 선도로 나타내면 Fig.4와 같다⁽⁶⁾. Fig.4에서 굵은 실선으로 표현된 것은 공칭

Table 2 Specifications of the optical pick-up

| Articles | | Specification |
|---------------------|--------------------|----------------------|
| Movable distance | | ± 0.5 mm or more |
| DC Resistance | | $4.0 \pm 0.4 \Omega$ |
| Sensitivity | $S_L(s)$ at 5 Hz | 1.0 ± 0.3 mm/V |
| | $S_H(s)$ at 200 Hz | 0.07 ± 0.01 mm/V |
| Resonance frequency | | 70 ± 6 Hz |
| Q-Value | | Below 10 dB |
| Phase delay | | Below 20° |

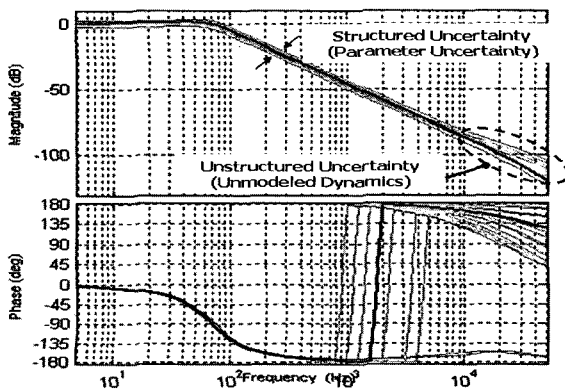


Fig. 4 Nominal plant vs. plant uncertainty

파라미터로 구성된 모델을 보여주며, 나머지 실선으로 표현되는 모델은 구조화 불확실과 비구조화 불확실성을 포함한 모델을 나타낸다.

3.3 발생 외란의 불확실성

플랜트 자체의 불확실성이 완벽하게 고려되었다하더라도, 외부에서 발생하는 외란이나 노이즈에 대한 고려가 적절히 이루어지지 않으면 성공적인 제어 구현이 불가능하다. 따라서 특정 배속에 대하여 발생할 수 있는 외란의 범위를 예측하여, 이 외란을 제어기 루프에 반영하는 것은 매우 중요하다. 디스크로부터 발생하는 외란 추정을 위하여 다양한 알고리즘이 사용되고 있으며, 근래 광 픽업의 동역학과 제어 입력을 이용하여 ODD에서 발생하는 외란을 효과적으로 예측하는 방법이 제안된바 있다.⁽¹²⁾ 제안된 방법을 기초로 편중심 질량(unbalance mass)을 가지는 test DVD-ROM 디스크(ABEX Inc.)의 트래킹 방향의 실측 외란을 Fig.5에 제시하였다. 여기서 재생은 CAV(constant angular velocity) 모드로 4.68배속에 대하여 실험을 수행하였다. 실험 결과로부터 개루프의 이득 자체가 외란의 크기를 그대로 반영하는 것이 아니라는 것을 알 수 있다. 즉, ODD의 개루프는 전형적으로 광 픽업의 공진 이후 완만하게 -40 dB/sec의 기울기를 가지는데, 외란 특성은 그렇지 않다는 것이다.

이 논문에서 제시하지 않았지만 여러가지 조건의 실험을 통하여 편중심 특성이 강한 디스크가 동시에 편심(eccentricity)성분 큰 경우 다음과 같은 특징이 있음을 찾아내었다. (i) 디스크의 회전 주파수의 2~3차 하모닉성분의 외란이 상당히 크며, (ii) 첫 번째 외란 성분의 피크 점으로부터 -40 dB/sec 선을 긋는

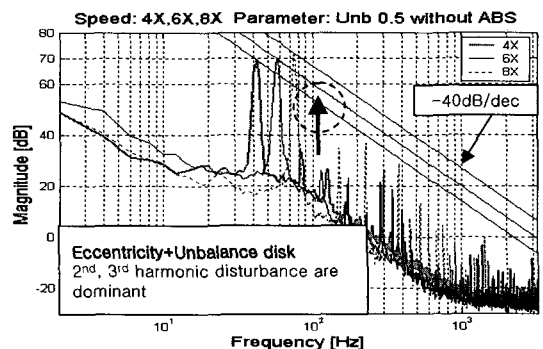


Fig. 5 Real disturbance characteristics: unbalance disk case

경우, 그 제한 범위를 침범하는 경우가 다수 발생하였다. 이러한 사실은 효율적인 외란 저감을 위하여 회전자과수의 2~3배 되는 주과수 영역의 서보 루프 이득을 높게 설계해야 함을 의미한다.

3.4 불확실성과 상대 안정도

강건 제어의 목적은 시스템에 불확실성이 존재함에도 불구하고, 제어 대상계의 강건 안정성 및 강건 성능의 확보에 있다. 고전 제어에서는 이러한 강건성의 평가를 위하여 간접적으로 이득 여유(gain margin), 위상 여유(phase margin)를 통하여 평가하고 있다. 그러나 이 파라미터들은 각각의 파라미터가 독립적으로 변화할 때 시스템의 상대 안정도(relative stability)를 표현하는 지표일 뿐, 동시에 이득과 위상이 변하는 경우를 반영하지 못한다. 개개의 지표는 상당한 여유를 가짐에도 불구하고, 이득과 위상이 동시에 변할 경우, 강건성에 매우 취약해 질 수 있음이 지적된 바 있다.^(2,3,6) 이와 같은 이유로 시스템의 상대 안정도를, Nyquist 선도상의 -1 점에서 시스템 루프와 떨어진 거리를 이용하여 상대 안정도를 평가하는 방법이 근래 제시되었다. 이 척도를 모듈러스 여유(modulus margin) 또는 벡터 여유(vector margin)라고 하며, 이득과 위상이 동시에 변하는 경우에 대한 안정도를 평가함에 있어 보다 유용하다.⁽⁶⁾ 따라서 이 논문에서는 이 방법을 채택하였다.

4. 강건 제어를 위한 H_∞ vs. QFT

시스템의 불확실성은 여러 형태로 표현할 수 있으나, 이 논문에서는 불확실성을 식 (9)와 같은 곱셈형 오차 형태로 표현하였다. 여기서 $G_a(s)$ 는 실제 플랜트, $G_n(s)$ 는 공칭 플랜트를 나타내며, $W(s)$ 는 불확실성에 대한 가중치 함수를 그리고 $\Delta(s)$ 는 $\|\Delta\|_\infty \leq 1$ 의 조건을 충족하는 안정한 전달 함수를 나타낸다.^(3,4)

$$G_a(s) = G_n(s)(1 + \Delta(s)W(s)) \quad (9)$$

ODD의 강건 제어기 설계를 위해 H_∞ 제어 이론과 QFT 이론을 적용하였으며, H_∞ 의 다양한 접근 방법에서 비교적 적용이 손쉬운 혼합감도 방법을 이 논문에서 채택하였다. 제어기의 설계 절차는 먼저 혼합감도 방법을 이용하여 강건 제어기를 설계한 이후, 설계

된 제어기를 이용하여 최종적으로 QFT 제어 이론으로 세부 조정(tuning) 하였다. 다시 정리하면, 혼합감도 방법에 의하여 비구조화된 불확실성에 대해 먼저 제어기를 설계하고, QFT를 통하여 H_∞ 로 부터 설계된 제어기를 구조화된 불확실성 관점에서 재설계하였다. QFT로 설계된 H_∞ 제어기를 세부 조정한 또 다른 이유는, 가중치 함수 선정에 의한 H_∞ 설계법은 설계자가 원하는 루프 특성을 정확히 충족시키기 힘들기 때문이다. 따라서 강건성을 확보하면서 설계자가 최종적인 제어기 설계를 수정할 수 있는 QFT 기법을 적용하였다.

4.1 H_∞ 제어 이론 및 제어기 설계 절차

H_∞ 제어는 시스템의 불확실성이나 외란의 저감 성능에 대한 가중치 함수(weighting function)를 설정하고, 이들의 일출력 무한 놈(infinite norm)을 최소화하는 설계 방법이다(Fig. 6 참조). 가장 일반적인 해법은 γ -반복(iteration) 과정을 통하여 식 (10)을 만족하는 제어기를 설계하는 것이며, 해가 존재하기 위한 가정 및 조건들은 문헌에서 상세히 찾을 수 있다.^(2~4) T_{zw} 은 식 (11)과 같은 전달함수 형태를 지니며, 전체적인 시스템의 구성은 Fig. 7과 같다.

$$\|T_{zw}(s)\|_\infty \leq 1 \quad (10)$$

$$T_{zw}(s) = P_{11}(s) + P_{12}(s)[I(s) - K(s)P_{22}(s)]^{-1}K(s)P_{21}(s) \quad (11)$$

이 때 $P(s)$ 는 플랜트 $G(s)$ 와 가중치함수 $W_1(s)^{-1}$, $W_2(s)^{-1}$, $W_3(s)^{-1}$ 를 포함한 전달 함수로서 일반화 플랜트(generalized plant)라 한다. 가중치 함수 $W_1^{-1}(s)$, $W_2^{-1}(s)$, $W_3^{-1}(s)$ 를 통하여 외란의 저감 성능, 제어 입력, 그리고 곱셈형 불확실성에 대한 사항을 고려한다. 이 방법을 S/T/KS 혼합 감도 설계라 하며, γ 값을 반복하면서 식 (12) 조건을 충족하는 제어기를 찾게 된다.

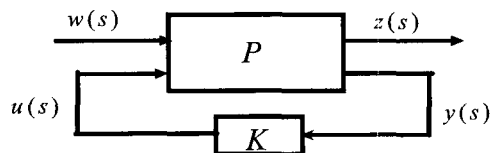


Fig. 6 General control configuration $w(s)$: exogenous inputs, $z(s)$: regulated output $u(s)$: control input, $y(s)$: measured input

$$\begin{aligned} |I/(I+PK)| \leq W_1(s)^{-1}, \quad |K/(I+PK)| \leq W_2(s)^{-1}, \\ |PK/(I+PK)| \leq W_3(s)^{-1} \end{aligned} \quad (12)$$

가중치 함수는 상용 제어기인 진상-지상(lead-lag) 제어기 및 2.3절에서 해석한 외란 해석을 근거로 다음과 같이 선정하였다. 외란 저감 성능에 대한 가중치 함수 $W_1^{-1}(s)$ 는 외란 측정의 결과를 바탕으로 10 Hz~1 kHz 대역에 외란 저감 성능을 기존 제어기 보다 강화하도록 설정하였고, 강건 안정성에 대한 가중치 함수 $W_3^{-1}(s)$ 는 광 픽업의 불확실성 및 제어 대역을 고려하여 선정하였다. 마지막으로 제어 입력에 대한 가중치 함수 $W_2^{-1}(s)$ 는 제어 입력의 포화를 고려하여 선택 하였으며, 이들을 나타내면 식 (13)과 같다.

$$\begin{aligned} W_1(s)^{-1} &= 1.8 \times \frac{(s+565.5)^3}{(s+1.194e004)^3}, \\ W_2(s)^{-1} &= 1.50e+011, \\ W_3(s)^{-1} &= (1.12e+015)/s^3 \end{aligned} \quad (13)$$

선정된 가중치 함수를 기반으로 Fig. 7과 같이 일반화 플랜트를 구현하여, 혼합감도 기법을 이용하여 5차의 제어기를 얻어냈다. 설계된 제어기를 기반으로 시스템의 감도함수 및 페루프 전달함수를 가중치 함수 $W_1^{-1}(s)$ 와 $W_3^{-1}(s)$ 와 함께 나타내면 Fig. 8과 같다. 따라서 이들 결과로부터 설계된 제어 루프는 식 (12) 조건을 만족함으로써 강건 안정성과 제어 성능이 보장됨을 알 수 있다. 최종적으로 제어기의 차수를 상용 ODD의 펌웨어(firmware)에 내장된 4차의 기존 제어기와 동일하게 하기 위하여, 4차로 축소(reduction)하여 식 (14)와 같은 최종적인 제어기를

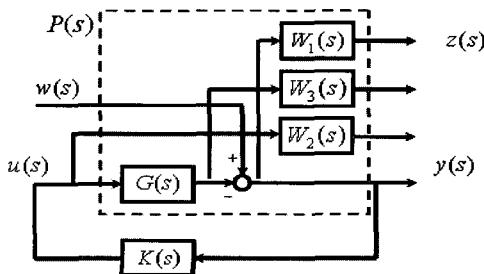


Fig. 7 S/T/KS mixed sensitivity optimization in standard form

얻어내었다.

$$\begin{aligned} C(s)_{mixed} &= 13781.74 \times \frac{(s+2.235e005)(s+48.6)}{(s+1536)(s+35.06)} \\ &\times \frac{(s^2 + 1.18e004s + 4.761e007)}{(s^2 + 2.092e005s + 2.181e010)} \end{aligned} \quad (14)$$

이 논문에서 사용된 12배속 DVD-ROM 디스크의 제어기 구조는 식 (15)와 같다.

$$\begin{aligned} C(s)_{lead_lag} &= 24950 \\ &\times \frac{(s+1.78e4)(s+1.265e4)(s+6289)(s+921.4)}{(s+9.748e4)(s+2.418e4)(s+1.107e4)(s+162.1)} \end{aligned} \quad (15)$$

각각의 설계된 제어기의 극점과 영점을 비교하여 보면, 기존 제어기는 실수(real)의 극점과 영점을 사용한 반면 S/T/KS 혼합 감도에 의하여 설계된 제어기는 복소(complex) 극점과 영점을 지니고 있음을 알 수 있다.

4.2 QFT이론 및 제어기 설계 절차

Horowitz에 의하여 1960년 초에 제안된 강건제어 이론으로, 시스템의 불확실성 및 제어 요구 성능을 공칭 개루프 전달함수가 가질 수 있는 영역(bound)으로 변환하고, 이 영역을 만족하도록 개루프 전달함수를 Nichols 차트에서 루프 정형(loop shaping)하는 설계 기법이다.⁽⁵⁾ QFT의 가장 큰 특징은 제어기의 구조를 미리 지정하여 설계할 수 있다는 점이며, 또한 선형/비선형 및 단일 입출력 시스템 및 다중 입출력(multi input multi output) 시스템에 확대 적용이

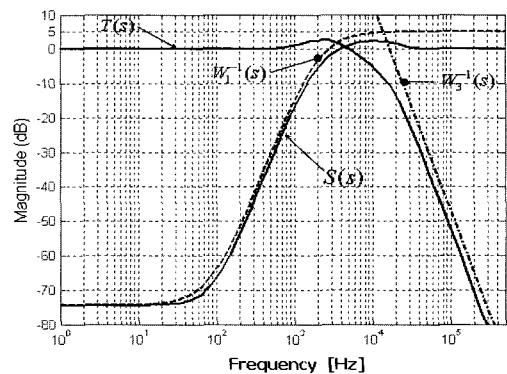


Fig. 8 Weighting functions vs. designed loop by mixed sensitivity

용이하다는 점이다. 제어기 구조를 미리 지정할 수 있다는 특징으로 인하여, 최소의 대역폭을 가지는 저차의 강건 제어를 설계할 수 있다. 또한 설계자가 직접 루프 정형을 하므로 설계 과정이 보다 명확한 특징이 있다.

먼저 모델의 불확실성을 고려하여, 이 논문에서는 광 픽업의 불확실성을 나타내는 집합 $G(s)$ 를 다음과 같이 표현하였다.

$$G(s) = \{S_L, S_H, R, \omega_n \in [low, high]\} \quad (16)$$

여기서 $S_L(s)$ 과 $S_H(s)$ 는 각각 5 Hz 및 200 Hz의 전압 입력에 대한 각각의 변위 출력을 의미한다 (Table 2 참조). 또한 R 과 ω_n 은 광 픽업 코일의 저

항과 광 픽업의 공진 주파수를 각각 나타내며, 그 변동 범위는 Table 2에 기술되어 있다.

시스템의 불확실성을 Nichols 차트 상에 표현하는 것을 템플릿(template)라 하며, Fig. 9는 광 픽업의 구조화된 불확실성만을 이용하여 템플릿으로 구성한 것이다. 이때 플랜트는 광학 이득(optical gain) 및 드라이브 IC 이득(driver IC gain)을 포함하여 표현하였다. 다음으로 강건 안정성과 강건 성능을 위한 가중치 함수를 설정하여야 하는데, 이 때 감도함수의 가중치는 앞서 설계한 $S/T/KS$ 혼합 감도의 가중치 함수를 그대로 적용하였다. 이 때 감도 함수 $S(s)$ 의 최대값과, 시스템의 이득 여유와 위상 여유는 다음과 같이 일정한 관계를 가진다.⁽⁵⁾

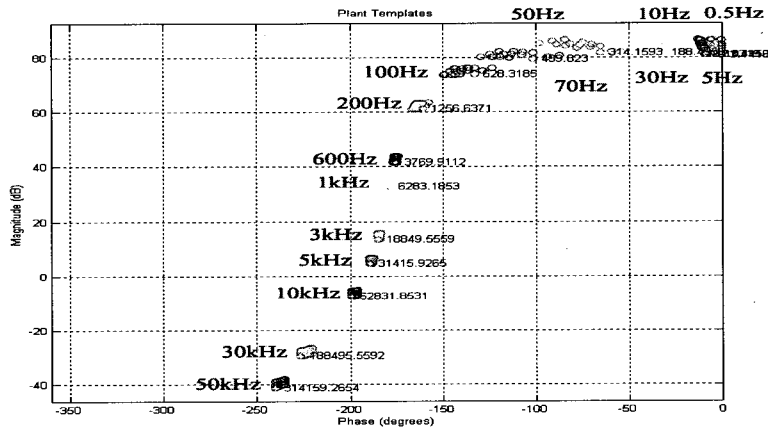


Fig. 9 Plant template for structured uncertainty

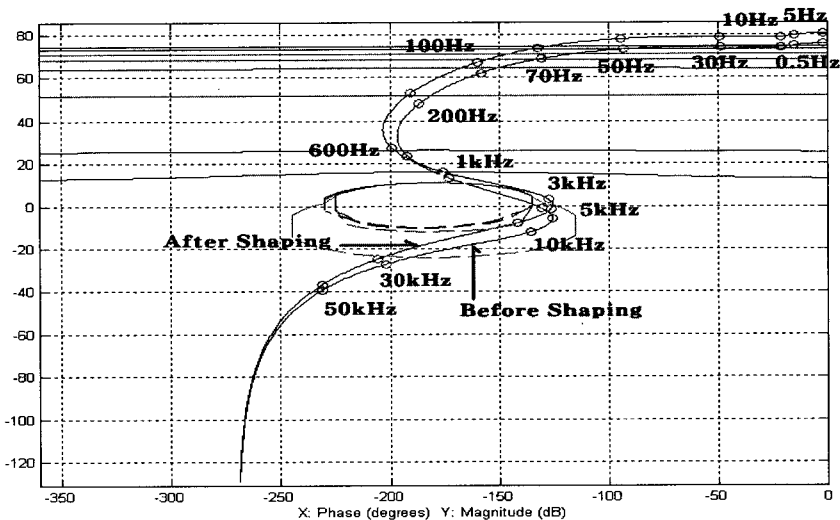


Fig. 10 Loop shaping in Nichols chart: before(mixed sensitivity), after(QFT)

$$|S(s)|_{\max} = \frac{1}{\alpha}$$

$$GM \cong \frac{1}{1-\alpha}, \quad PM \cong 2\sin^{-1}\frac{\alpha}{2} \quad (17)$$

구조화된 파라미터의 불확실성과 강건 안정성 및 강건 성능은 최종적으로 바운드(bound) 형태로 표현되며(Fig. 10), 설계자는 루프 정형(loop shaping)을 통하여 각 주파수에 해당되는 바운드를 침범하지 않게 설계하여야 한다. QFT 설계는 제어기를 Nichols 차트에서 설계하므로, 처음부터 극점과 영점을 선정하여 루프를 정형하는 것은 직관적이지 못하다. 따라서 이 논문에서는 초기 설계된 $S/T/KS$ 혼합 감도 설계에 의한 제어기를 기반으로 하였다. Fig. 10은 $S/T/KS$ 혼합 감도에 의하여 설계된 제어기(before shaping)와 QFT를 이용하여 루프 정형을 거친 제어기(after shaping)을 동시에 보여준다. $S/T/KS$ 혼합 감도에 의하여 설계된 제어기는 Fig. 10에 보여지듯이, 일부 주파수 대역에서 플랜트 변동에 따라 외란 저감 및 안정성이 보장되지 않음을 알 수 있다. 따라서 QFT로 전체 계인의 조정 및 감쇠비 조절을 통하여, 강건 안정성 및 강건 성능이 보장되는 제어기를 설계하였다. 최종적인 제어기 형태는 다음과 같다.

$$C_{QFT}(s) = 13832 \times \frac{(s+2.235e005)(s+48.5)}{(s+1535)(s+35.08)}$$

$$\times \frac{(s^2 + 9322s + 4.763e007)}{(s^2 + 2.182e005s + 1.771e010)} \quad (18)$$

4.3 기존 상용 제어기와 혼합감도, QFT 제어기의 비교

지금까지 설계된 개루프 전달함수들의 bode 선도를 그려보면, Fig. 11과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 $S/T/KS$ 혼합감도 및 QFT 설계는 대략 40 Hz~1 kHz 대역의 이득에 기존 제어기에 비하여 가중치를 두었으며, 이는 이 대역에서 발생하는 외란 저감을 위한 것이다. 그러나 이득 증가에 따른 고주파 대역의 노이즈의 증폭을 막기 위하여, 시스템의 대역폭(bandwidth) 및 고주파 대역의 루프 게인은 원래의 제어기와 유사하게 설계하였다. 외란 저감 성능을 보다 구체적으로 알아보기 위하여, 설계된 각 제어기의 감도 함수를 그려보면 Fig. 12와 같다. 이로부터 $S/T/KS$ 혼합감도 및 QFT로부터 설계된 제어기가

저주파수 대역의 외란 저감 성능이 우수함을 알 수 있으며, 고주파 대역의 노이즈에 대한 증폭은 기존 제어기와 거의 유사함을 알 수 있다.

설계된 제어기의 구현에 앞서, 시뮬레이션을 수행하였으며 그 구성은 Fig. 13에 나타내었다. 이때 외란은 150 μm 의 편심이 주 성분이고 이와 관련된 하모닉 성분이 존재하는 것으로 가정하였다. 또한 실제 상황에서 시스템에 영향을 주는 전기적/광학적인 노이즈의 고려를 위해, 랜덤 노이즈를 루프에 반영하였다. 각 제어기의 구체적인 평가를 위해 동일 외란에 대하여 시간이 지남에 따라 각 제어기 루프로 스위칭되는 구조를 채택하였으며, 시뮬레이션 결과를 Fig. 14에 나타내었다.

강건성의 평가는 이 논문에서는 앞서 언급한 바와 같이, Nyquist 선도상의 -1점에서 개루프와 접하는

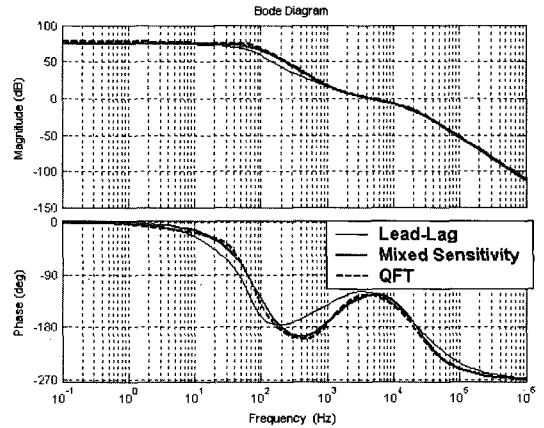


Fig. 11 Open loop functions: (i) lead-lag, (ii) mixed sensitivity, (iii) QFT

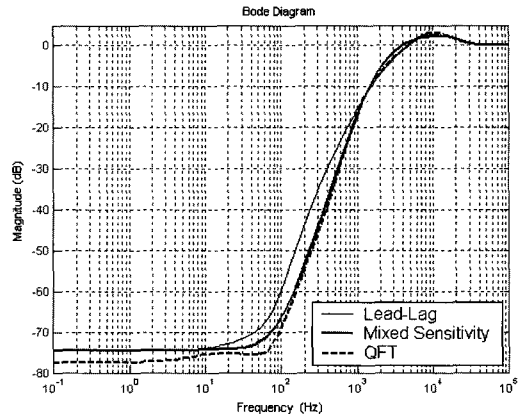


Fig. 12 Sensitivity functions: (i) lead-lag, (ii) mixed sensitivity, (iii) QFT

원의 최대 크기를 강건성의 기준으로 하는 모듈러스 여유를 기준으로 하였다. Table 3은 설계된 제어 루프의 이득 여유, 위상 여유, 그리고 이득 차단 주파수 (gain cut-off frequency) 및 DC 이득을 각각 보여준다. 여기서 한가지 유의하여야 할 점은 광 픽업의 실제 모델과 수학 모델이 5kHz 근방에서 8° 정도 차이가 나므로, 실제의 위상 여유는 모든 제어기의 값에서 공통적으로 8° 정도의 값을 낮추어 계산해야 한다(Fig. 3 참조). 또한 이산계로 변환하면서 발생하는 위상 처짐들을 고려하면, 실제 상황에서 위상 여유가

더 줄어들게 됨을 예상할 수 있다.

Fig. 15는 기존의 진상 지상 제어기가 설계된 강건 제어기에 비하여 이득 여유와 위상 여유가 더 좋음에도 불구하고, 모듈러스 여유는 그렇지 않다는 것을 보여준다. 따라서 이 결과로부터 $S/T/KS$ 혼합감도 및 QFT를 통하여 설계된 제어기가 기존의 제어기에 비하여 외란 저감 특성은 우수하면서도, 강건성이 보장됨을 확인할 수 있다.

설계된 제어기의 형상 및 극점과 영점을 비교하여 보면, 다음 2가지의 차이점이 있다.

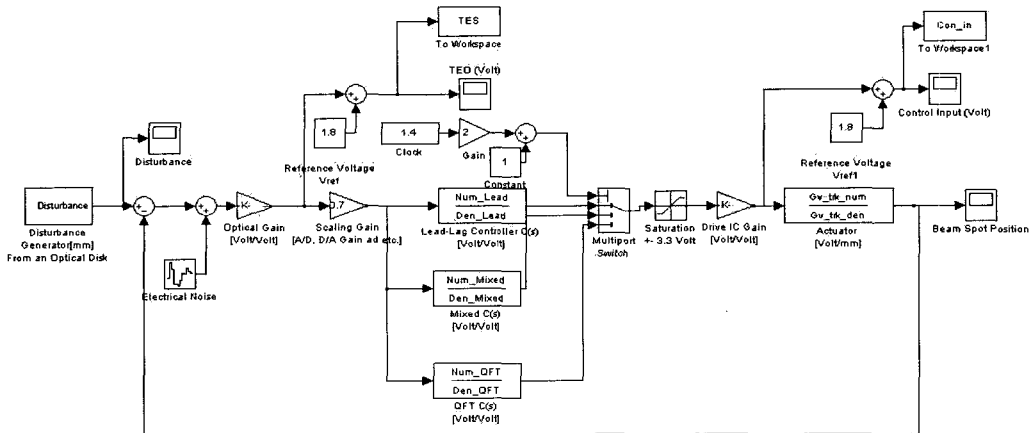


Fig. 13 Simulation structure to evaluate the designed controllers

Table 3 Summary of the designed controllers: performance vs. relative stability

| Controller | Performance | | Relative stability | |
|------------|--------------|------------------------|--------------------|--------------------|
| | DC Gain [dB] | Cutoff frequency [kHz] | Gain margin [dB] | Phase margin [deg] |
| Lead-lag | 74.63 | 4.92 | 19.1 | 58 |
| H_∞ | 74.48 | 4.47 | 16.8 | 54.8 |
| QFT | 77.5 | 5.24 | 15.4 | 53.6 |

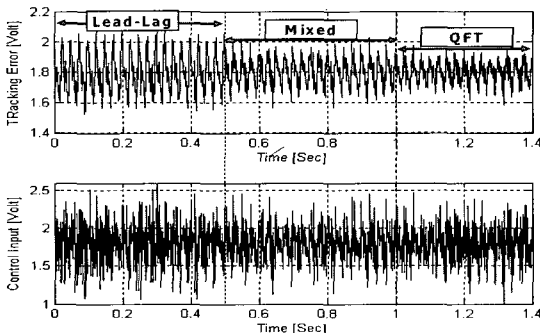


Fig. 14 Simulation results

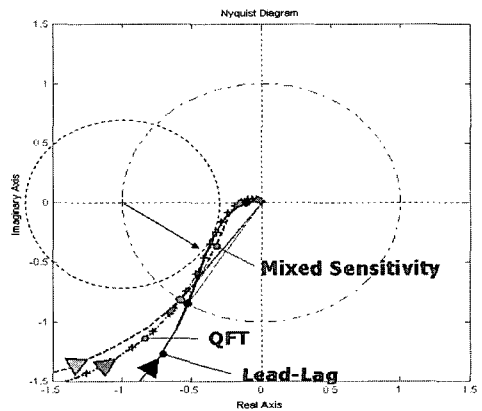


Fig. 15 Modulus margin for the designed controllers

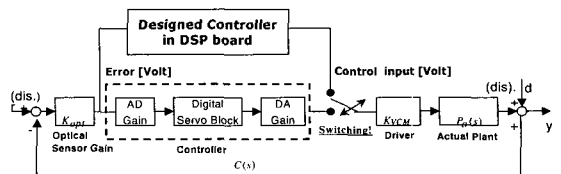


Fig. 16 The realization of designed controller by bypass method

(i) 기존 상용 제어기는 실수(real)의 극점과 영점을 사용한 반면, 혼합감도 및 QFT는 복소(complex) 극점과 영점을 사용하였다.

(ii) 기존 상용 제어기에서는 저역 부스터(low frequency booster, 즉 lag part)의 역할에 비하여, 강건 제어이론을 이용하여 설계한 제어기는 저역 부스터의 기능을 대폭 강화하였다(Fig. 12의 감도 함수에서, 100 Hz~1 kHz대역의 루프 이득 참조).

4.4 강건제어기의 구현

설계된 강건제어기의 검증을 위하여, Fig. 16과 같은 방법을 이용하였다. 실험에 사용된 상용 시스템의 제어기는 다중 샘플링을 하는 평행구조의 IIR(infinite impulse response) 필터로 각 디지털 계수의 매핑(mapping)을 통하여 제어기의 특성을 설계할 수 있다. 그러나 이 논문에서는 제어기는 설계의 자유도를 높이기 위하여, 설계된 제어기 외부 DSP(DS-1103, D-Space 社)를 이용하여 구현하였으며, 스위칭하는 구조를 채택하였다. 실험에 사용된 DSP의 성능 한계에 의하여 샘플링 주파수 f_s 는 100 kHz로 선택하였다. 보통 상용의 ODD제어기가 176.4 kHz 또는 352.8 kHz의 샘플링을 사용하는 것을 고려할 때, 상당히 낮은 샘플링이지만 설계된 제어기 대역이 5 kHz 내외이므로 이 영향은 무시할 수 있다. 연속계로 설계된 각 제어기는 matched pole-zero 방법을 이용하여, 연속계에서 이산계로 변환시 제어기 루프 특성 변동이 최소화 하도록 하였다. 이 때 디스크의 발생 외란을 정량화하기 위하여, 150 μ m의 편심 성분을 가지는 테

스트용 DVD-ROM 디스크를 사용하였다. 배속은 DVD-ROM 드라이브에서 기준 배속으로 선정되어 있는 4배속, 즉 2400 rpm을 기준으로 하였으며, 그때의 적용 결과를 Fig. 17와 Fig. 18에 제시하였다. Fig. 17은 기준 배속에서 시간에 따라 기존 시스템에 내장된 제어기, H_∞ 의 혼합 감도 설계에 의한 제어기, 그리고 QFT를 이용한 제어기를 시간의 흐름에 따라 스위칭 한 결과를 보여준다. Fig. 18은 Fig. 17의 결과를 동적신호분석기를 통하여 파워 스펙트럼 분석한 결과이다. 결과에서 알 수 있듯이, 수십 Hz에서 약 1 kHz 대역의 외란 성분이 기존 제어기 설계에 비하여 강건 제어기로 설계한 제어기가 보다 외란 저감 성능이 우수함을 알 수 있다. 이 결과는 Fig. 12의 감도 함수 결과와 잘 일치한다.

4.5 결과 분석 및 고찰

이상의 시뮬레이션 및 실험을 통하여 H_∞ 제어 및 QFT를 이용하여 설계된 강건제어기가 외란 저감 성능이 기존 제어기에 비하여 우수하며 또한 강건 안정성이 보장됨을 보였다. 외란 제거 성능은 외란이 발생하는 대역에서의 개루프 전달 함수의 이득이 크면 클수록 우수하나, 특정 대역의 이득의 증대는 다른 대역 주파수의 이득에 영향을 미치게 되어 안정성의 저감 및 노이즈에 취약하게 된다. 이를 물침대 효과(water bed effect)라 하며, 궁극적으로 이것이 의미하는 바는 외란이 발생하는 대역과 노이즈가 발생하는 대역을 잘 구분하여 제어기를 설계하여야 함을 의미한다.

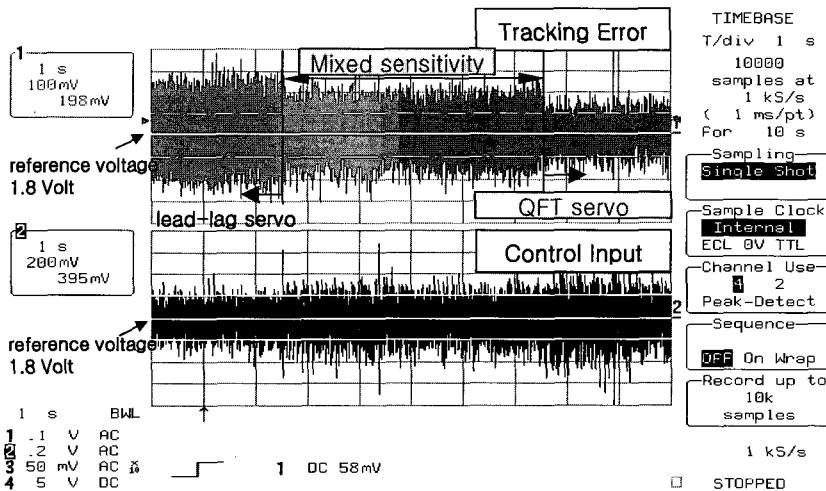


Fig. 17 Experiment results: time domain

Fig. 10의 경우, 혼합감도에 의하여 설계된 제어기가 QFT 기준으로 설계된 강건안정성과 강건 성능을 충족시키지 못하였다. 이는 설계시 외란 저감성능은 같은 가중치 함수를 사용하였지만, 강건 안정성의 평가는 다르게 사용하였기 때문이다. 즉, 혼합감도에서는 비구조화된 가중치 함수를 사용하여 불확실성에 대한 강건성을 평가하였고, QFT는 구조화 불확실성 및 페루프 전달함수에 대한 크기만 규제하여 강건성을 평가하였기 때문이다. 기존의 상용 진상-지상 제어기 구조가 Nyquist 선도상에서 안정성을 평가할 때, 상당한 강건성을 확보하고 있으므로 제어 루프가 거의 유사한 강건제어기도 상당한 강건 안정성을 확보하고 있음을 Fig. 15를 통해 알 수 있다.

마지막으로 설계된 강건제어기의 구조는 총 4차의 극점과 영점을 가지는데, 복소 극점과 영점은 극부적인 위상 변화나 이득 변동에 유리하다. 따라서 기존의 실수 극점/영점구조의 제어기보다 우수하다고 할 수 있다. 또한 근래 ODD 서보 IC의 디지털 필터 구

조가 복소 극점/영점을 이용할 수 있는 2차의 구조이므로, 설계된 제어기를 직접 상용 시스템에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

ODD에서 발생하는 불확실성을 체계적으로 분류하고, 이를 기반으로 H_∞ 제어 이론의 혼합감도 기법 및 QFT를 이용하여 강건제어기를 설계하고 상용 12배속 DVD-ROM 드라이브에 설계/평가하였다. 시뮬레이션 및 실험을 통하여 이 논문에서 제안한 강건 제어 기법이, 기존의 제어기 보다 외란 저감 능력이 향상되었으며, 충분한 강건 안정성이 보장됨을 보였다. 설계된 제어기는 외부 DSP를 이용하여 제어기 루프를 스위칭 하는 구조를 택하였으며, 재생 배속 설정이 자유롭지 않은 관계로 기존 배속으로 설정된 4배속에 대한 트래킹 제어기를 설계하였다.

이 논문에서 설계된 제어기는 기존 제어기 구조와 유사하게 하기 위하여 설계된 제어기이므로, 부가적인 제어기 구조는 고려하지 않았다. 그러나 부가적인 제어기를 형태를 통하여 반복제어, 학습제어 그리고 외란 관측기와 같이 사용된다면 보다 좋은 외란 저감 효과를 기대할 수 있다. 이에 대한 연구는 추후 연구를 통하여 진행할 계획이며, 이상 이 논문을 통하여 진행된 주요 사항을 정리하면 다음과 같다.

(1) ODD에서 발생하는 외란을 분석하여, 발생하는 외란은 디스크의 회전 주파수 및 그 주파수의 2, 3차 하모닉 성분임을 찾아내었다.

(2) 외란 측정 결과 및 시스템의 불확실성을 고려하여 H_∞ 의 혼합감도 기법 및 QFT를 이용하여 4차의 강건제어기를 설계하였다.

(3) 설계된 제어기를 DSP로 구현하여 상용 12배속 DVD-ROM 드라이브의 기준 배속인 4배속 트래킹 서보에 적용하였다. 실험을 통하여 외란 저감 성능 향상과 충분한 강건 안정성이 확보됨을 보였다.

후 기

이 연구는 한국과학재단(R11-1997-042-11002-0) 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

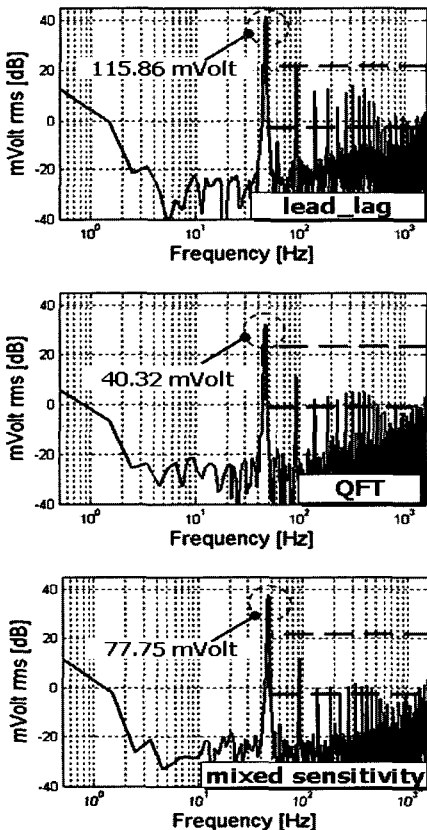


Fig. 18 TES spectrum for each servo loop

참 고 문 헌

- (1) Bouwhuis, G., et al., 1986, Principle of Optical Disk Systems, Adam Hilger Ltd, MA.
- (2) Skogestad, I., Postlethwaite, I., 1996, Multivariable Feedback Control, John Wiley & Sons, England.
- (3) Mackenroth, U., 2004, Robust Control Systems, Springer, Germany.
- (4) Zhou, K. and Doyle, J. C., 1998, Essential of Robust Control, Prentice-Hall, New Jersey.
- (5) Borghesani, C., Chait, Y. and Yaniv, O., 2001, The QFT Frequency Domain Control Design Toolbox: User's Manual, Tera soft, Inc.
- (6) Gray, B., et al., 2004, Robust Control Toolbox: User's Manual, MathWorks.
- (7) Lee, M. L., et al., 1998, "Robust H_∞ Control with Multiple Constraints for the Track-following System of an Optical Disk Drive", IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 45, No. 4, pp. 638~645.
- (8) Steinbuch, M., et al., 1998, " μ -synthesis for a Compact Disc Player", International Journal of Robust and Nonlinear Control, Vol. 8, No. 2, pp. 169~189.
- (9) Lim, S. and Jung, T. -Y., 1999, "Dynamics and Robust Control of a High Speed Optical Pickup", Journal of Sound and Vibration, Vol. 221, No. 4, pp. 607~621.
- (10) Lee, J. W., Chait, Y. and Steinbuch, M., 2000, "On QFT Tuning of Multivariable μ Controllers", Automatica, Vol. 36, pp. 1701~1708.
- (11) Akkermans T. H., Sorin, G., S., "Digital Servo IC for Optical Disk Drive", Control Engineering Practice, Vol. 9, No. 11, pp. 1245~1253.
- (12) Choi, J. -Y., et al., 2002, "Disturbance Measurement of an Optical Disk and the Servo Loop Design Related to This Result", 6th MOVIC, Japan, pp. 326~331.
- (13) 이문노, 진경복, 김진수, 2004, "다중 제한 조건을 고려한 강인 트랙 추종 제어기의 설계", 한국소음진동공학회논문집, 제 14 권, 제 9 호, pp. 827~836.
- (14) Lee, M. -N., Jin, K. B. and Lee, J. K., 2004, "Design of a Robust Track-Following Controller for Optical Disk Drives", IEEE Transaction on Consumer Electronics, Vol. 50, No. 2, pp. 723~731.
- (15) Ryoo, J. R., Doh, T. -Y. and Chung, M. J., 2004, "Robust Disturbance Observer for the Track Following Control System of an Optical Disk Drive", Control Engineering Practice, Vol. 12, No. 5, pp. 577~585.