

광 디스크 서보 설계를 위한 강건 제어 이론의 적용 및 평가: QFT vs. H_∞

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

최진영* · 이광현** · 양현석** · 박노철** · 박영필**

Jin-Young Choi, Tae-Wook, Park, Hyunseok, Yang, No-Cheol Park, Young-Pil Park

Key Words : Optical Disk Drive (광 디스크), Robust Control (강건 제어), QFT, H_∞ .

ABSTRACT

In this paper, the various uncertainties, which are generated in working of an optical disk drive, are discussed in details and the robust servo design considering the uncertainties are discussed. First, the classification of the uncertainties and the modeling process including that are treated. Then, the robust servo designs using QFT and H_∞ theory are performed. Finally, the designed servo loops realized by DSP are applied to the real system. From these experiments, we proved that the robust servo design using QFT and H_∞ have a good performance and a good robust stability when it compared with the conventional servo loop.

1. 서론

광 디스크 드라이브(Optical Disk Drive, ODD)는 다양한 물리적 특성을 가지는 광 디스크 미디어를 다양한 배속에서 작동하므로, 발생하는 외란은 매우 다양한 정량적/정성적 특징을 가진다. 또한 광학적/기계적/전기적인 요소들로 구성된 광 픽업은, 대량 생산에 따른 부품의 공차 및 조립 등에서 발생하는 불확실성(uncertainty)이 항상 존재한다. 이러한 이유로 ODD 서보계 루프를 설계함에 있어, 발생하는 외란의 크기와 광 픽업의 불확실성을 고려하여 제어기 루프의 상당한 여유를 가지고 설계할 필요성이 있다. 그러나 필요 이상의 높은 루프 게인은 제어 입력을 크게 할 뿐만 아니라, 미디어의 스크래치나 흑점(Black dot) 등에 너무 민감하게 반응하여 광 픽업의 발진할 수 있는 우려가 있다.

이러한 불확실성이 존재함에도 불구하고, 제어계의 안정성을 보장하며 원하는 목표 성능에 맞게 제어기를 설계하는 하므로 본 논문에서는 강건 제어를 다루기로 한다. 그러나 효율적인 강건 제어기 설계를 위해서, 먼저 시스템의 불확성을 파악하고 이를 적절히 반영하는 것이 필수적이다.

(1,2,3)

대표적인 강건 제어 기법에는 H_∞ , μ 합성 및 해석, QFT(Quantitative Feedback Control) 등이 있고, 실제 이러한 제어 이론은 ODD 서보계 설계에 꾸준히 적용되어 왔다.^(3,4,5) 그러나 기존의 연구들에서는, 주로 광 픽업의 불확실성만을 고려하고 디스크의 외란 특성에 대한 고려는 상대적으로 미흡하였다. 따라서 본 논문에서는 광 픽업의 불확실성 뿐만 아니라 광 디스크의 외란 특성을 반영하여 강건 제어기를 설계하고 이를 평가하였다. 적용된 강건 제어 이론은 QFT와 H_∞ 의 혼합 감도 설계 기법으로, 설계된 제어기는 DSP로 구현하였다.

2. 광 디스크 서보 루프 vs. 외란

2.1 광 디스크 서보 루프

단일 제어 루프를 갖는 일반 제어 시스템과 달리, 외란 특성의 변동이 심한 ODD에서는 다중 제어 루프를 채택하고 있다. 포커스/트래킹 제어계는 독립적인 것으로 가정할 수 있으므로, 각각의 제어기 루프는 단일입력 단일출력 시스템으로 표현할 수 있다. 이것을 간략히 표현하면 Fig.1과 같고, 이 때 해석의 편의를 위하여 노이즈는 없는 것으로 가정하였다. 시스템에 대한 개루프 전달함수를 $L(s)$ 와 폐루프 전달함수 $T(s)$ 라 하면

*연세대학교 대학원 정보저장공학협동과정
E-mail : mithra@yonsei.ac.kr
Tel : (02) 2123-4677, Fax : (02) 365-8460

** 연세대학교 CISD

각 루프는 식(1)과 (2)로 표현된다.

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

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

여기서 $K_{opt}[V/mm]$ 는 광학 이득으로 오차 $E(s)[mm]$ 를 전기적인 신호로 변경하며, $C(s)[V/V]$ 는 제어기를 그리고 $K_{VCM}[V/V]$ 과 $P(s)[mm/V]$ 는 각각 드라이버 IC 계인과 광 픽업 전달 함수를 의미한다. 이 때 감도 함수 $S(s)$ 는 페루프 전달 함수 $T(s)$ 와 식(3)과 같은 관계를 가진다.

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

이들 식으로부터, 외란 $D(s)$ 와 시스템의 출력 $T(s)$ 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)로부터, 디스크의 외란 $D(s)$ 에 대하여 제어 대역까지 광 픽업의 출력 $Y(s)$ 이 잘 추종해야 한다는 것을 알 수 있다. 이때 디스크의 외란 $D(s)$ 에 대하여 추종하지 못하는 양은 오차 신호 $E(s)$ 로 나타나게 되는데, 오차의 허용 정밀도는 디스크의 종류 및 서보의 종류에 의존한다. Table.1에서 현재 상용화된 ODD 트래킹 제어기의 허용 정밀도를 제시하였다. 여기서 NA 와 λ 는 대물 렌즈의 개구율(Numerical Aperture)와 레이저의 파장을 각각 의미한다.

이때 중요한 것은 오차 $E(s)$ 가 허용 정밀도 이상으로 발생하면, 단순히 액츄에이터가 외란 $D(s)$ 를 그 차이만큼 발생하면서 추종하는 것이 아니라 서보에 실패한다는 것이다. 이것은 제한된 영역에서만 서보에 필요한 오차 신호를 생성할 수 있기 때문이다.

2.2 외란 특성과 여러 허용 정밀도와의 관계

ODD 발생하는 외란을 다양하지만, 제어계를 통하여 보상되는 외란은 기계적인 외란(미디어의 진동)이 지배적이다.

따라서 본 논문에서는 관심 대상을 기계적인 외

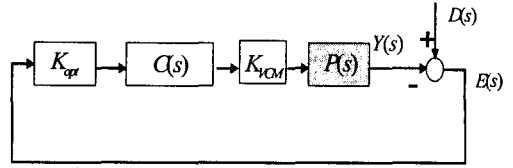


Fig. 1 Schematic Servo Loop in an ODD

Table 1 Error Tolerances in Various ODD

	NA	λ	Focus Tolerance	Tracking Tolerance
CD	0.45	780 nm	1 μm	0.1 μm
DVD	0.6	650 nm	0.23 μm	0.022 μm
BD	0.85	405 nm	0.045 μm	0.009 μm

란만으로 한정 지었다. ODD에서 발생하는 기계적인 외란은 디스크의 강성이나 회전속도, 그리고 디스크의 크기 및 디스크의 진동 방향에 영향을 받는다. 또한 오차의 허용 정밀도는 빔 스폿의 높이 h , 빔의 크기 d 및 각 미디어의 트랙 피치와 밀접한 관련을 가지며, h 와 d 를 수식으로 정리하면 다음과 같다.

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

Fig.3 본 논문에서 사용된 DVD 계열의 1 배속의 기준 서보 루프를 보여준다. 그러나 여기서 제시한 기준 서보는, 제어기의 설계 기준을 제시한 것이라기 보다는 미디어의 제작에 있어 발생할 수 있는 디스크 외란의 한계치에 대한 규정으로 생각할 수 있다. 따라서 배속 및 시스템의 특성을 고려하여 이에 알맞은 제어기 설계가 필수적이다.

3. 시스템 불확실성의 표현 및

강건제어와의 관계

3.1 광 디스크 시스템의 불확실성

시스템의 불확실성(uncertainty)은 여러가지 형태로 존재하며, 본 논문에서는 (a) 불확실성의 구조적인 관점과, (b) 불확실성이 존재하는 영역에 따라 분류하였다.^(1,2,3)

먼저 불확실성의 구조적인 관점에서 (i)구조화된 불확실성(structured uncertainty)과 (ii)비구조화된 불확실성(unstructured uncertainty)으로 분류할 수 있다. 구조화된 불확실성이라 어떤 구체적인 파라미터 변동으로 표현되는 것을 의미하며, 비구조화된 불확실성이란 구체적인 파라미터 변동으로 정의하기 어렵고 어떤 범위로만 한정되

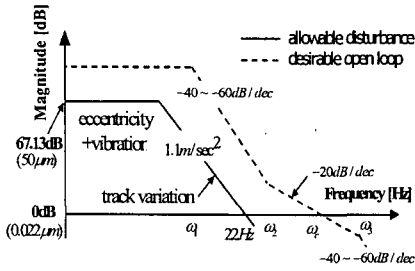


Fig.3 Tracking Reference Servo Loop

는 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.

ODD 에서 발생하는 구조화 불확실성은 구체적인 파라미터 변동, 즉 DC 게인, 공진주파수 그리고 감쇠비 등 어떤 구체적인 값의 변화를 의미한다. 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 되는 신호의 불확실성은 외부 노이즈 및 발생 외란의 불확실성을, 그리고 모델의 불확실성은 제어 대상계 모델 자체의 불확실성을 의미한다.

3.1.1 모델의 불확실성

외부 외란의 불확실성을 제외하였을 때, 본 논문에서 사용되는 DVD-ROM 드라이브의 모델 자체의 불확실성은 Table 2 와 같다. 불확실성과 모델과의 관계를 보다 상세히 알아보기 위하여, 광 픽업의 전기/기계적 운동방정식에서 전압 $V(s)$ 에 대한 광 픽업의 출력 $X(s)$ 의 전달 함수를 수학적으로 유도하면 식(7)과 같다.

$$G_v(s) = \frac{X(s)}{V(s)} = \frac{1}{R + Ls} \cdot \frac{Bl n}{ms^2 + cs + k} \quad (7)$$

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,

Table 2 Various Uncertainties in an Optical Pick-up

Tracking	Movable Distance		$\pm 0.5\text{mm}$ or more
	DC Resistance		$4.0 \pm 0.4 \Omega$
	Sensitivity	5Hz	$1.0 \pm 0.3 \text{ mm/V}$
		200Hz	$0.07 \pm 0.01 \text{ mm/V}$
	Resonance Frequency		$70 \pm 6 \text{ Hz}$
	Q-Value		Below 10dB
Phase Delay		Below 20°	

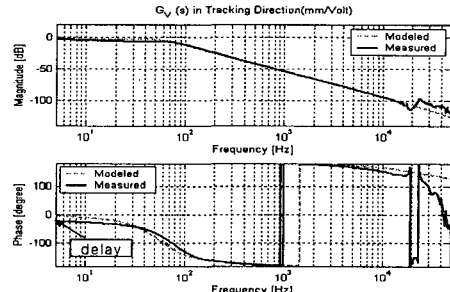


Fig.4 optical pick-up FRF: tracking direction

n 은 코일의 권선 회전수, 그리고 i 는 구동 전류를 나타낸다.

실험적으로 얻은 광 픽업의 모델은 Fig.4 와 같으며, 실험데이터로부터 수학적 근거로 3 차의 모델로 곡선 적합하여 식 (8)을 얻어내었다.

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

실험을 통하여 얻은 동특성은 Table .2 의 사양을 만족하지만, 공칭 모델과 비교하였을 때 저역 감도 및 고역 감도 측면에서 보다 낮은 성능을 보였다.

시스템의 구조적/비구조적인 불확실성을 고려한 광 픽업 모델을 Fig.5 에 제시하였다.⁽⁶⁾ Fig.5 에서 굵은 실선으로 표현된 것은 공칭 파라미터로 구성된 모델을 보여주며, 나머지 실선으로 표현되는 모델은 구조화 불확실성을 포함하는 모델과 비구조화 불확실성을 포함한 모델을 나타낸다.

3.1.2 신호의 불확실성

플랜트 자체의 불확실성이 완벽하게 고려되었다고 하더라도, 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. 실제 ODD 에서 디스크에서 발생하는 외란 추정을 위하여 다양한 알고리즘을 구현하고 있으며, 광 픽업의 동역학과 제어 입력을 이용

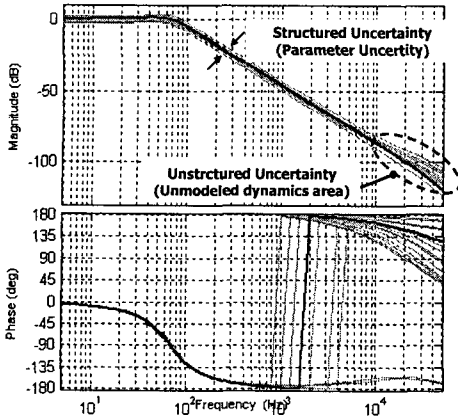


Fig.5 Nominal Plant vs. Uncertainty Modeling

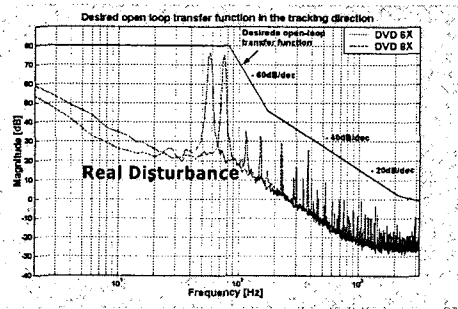


Fig.6 Real Disturbance vs. Servo Loop

하여 ODD 에서 발생하는 정확히 예측하는 방법이 근래에 보고된 바 있다. (7)

제안된 방법을 기초로 임의의 DVD 디스크의 트래킹 방향의 발생 외란의 실측 결과를 Fig.6 에 제시하였다. 여기서 재생 배속은 CAV(Constant Angular Velocity) 모드로 각각 6 배속과 8 배속이다. 이 실험 결과로부터 루프의 게인 자체가 외란의 크기를 그대로 반영하는 것이 아니라는 것을 알 수 있다.

3.2 불확실성을 고려한 강건 제어 이론

강건 제어의 목적은 시스템에 불확실성이 존재함에도 불구하고 안정성 및 성능을 확보하는데 있다. 그러나 이 파라미터들은 각각의 파라미터가 독립적으로 변화할 때 시스템의 상대 안정도를 표현하는 지표일 뿐, 동시에 이득과 위상의 변하는 경우를 반영하지 못한다. 개개의 지표는 상당한 여유를 가짐에도 불구하고, 이득과 위상이 동시에 변할 경우, 강건성에 매우 취약해 질 수 있음이 지적된 바 있다. (6) 이와 같은 이유로, 시스템의 상대 안정도는 Nyquist 선도상에서 -1 점에서 시스템 루프와 떨어진 거리를 이용하여 상대 안정도를 평가하는 방법이 근래 제시되었다. 이 척도를 modulus 여유 또는 벡터 여유라고 하며, 이득

과 위상이 동시에 변하는 경우에 대한 안정도를 평가함에 있어 보다 유용하다. 따라서 본 논문에서는 이 방법을 채택하였다.

4. 강건 제어를 위한 QFT vs. H_inf

앞서 3 절에서 유도한 불확실성을 고려한 실제 모델링은 식 (9)와 같이 곱셈형 오차 형태로 표현하였다. 이 표현은 모델링 되지 않은 고주파 동역학 및 S/T 혼합감도 설계에서 강건 안정성을 평가하는데 적합하다.

$$G_n(s) = G_n(s)(1 + \Delta(s)W_3(s)) \quad (9)$$

QFT 와 H_∞ 강건 제어 이론을 먼저 각각 간략히 정리하면 다음과 같다.

4.1 QFT 이론 및 제어기 설계 절차

Horowitz 에 의하여 1960 년 초에 제안된 제어 이론으로, 시스템의 불확실성 및 제어 요구 성능을 공칭 개루프 전달함수가 가질 수 있는 영역 (bound)으로 변환하고, 이 영역을 만족하도록 개루프 전달 함수를 Nichols 차트에서 정형 (shaping)하는 설계 기법이다. (8) QFT 의 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)에 확대 적용이 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, 실제 광 픽업의 전달함수 $G_n(s)$ 를 다음과 같이 표현하였다.

$$G(s) = \begin{cases} G_n(s) = k_{low} G_{irk}(s)(1 + \Delta m(s)) \\ S_{LF}, S_{HF}, R, \omega_n \in [low, high], \\ |\Delta m(j\omega)| < R_m, \Delta m(s) \text{ stable} \end{cases} \quad (10)$$

공칭 모델에 대한 실제 플랜트의 변동은 Table.2 와 같은 구조화 불확실성과, 모델링 되지 않은 비구조화 불확실성을 함께 반영하였다. 제어기 설계를 위하여 먼저 강건 안정성 및 요구되는 강건 성능을 각 주파수 대역에서 변동 가능한 영역으로 변환하고, 이들의 경계로부터 강건 안정성과 강건 성능이 보장되는 제어기를 Nichols 선도에서 설계하였다. 이때 감도 함수 $S(s)$ 의 최대값과, 시스템의 이득 여유와 위상 여유는 다음과 같이 일정한 관계를 가진다. (9)

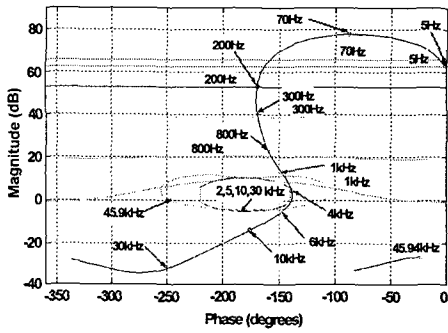


Fig.7 Open Loop Shaping using QFT

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

$$GM \cong \frac{1}{1-\alpha}, \quad PM \cong 2\sin^{-1} \frac{\alpha}{2} \quad (11)$$

따라서 이 수치들을 고려하여 성능 함수의 가중치를 선정하였다. QFT 제어기는 Nichols 선도에서 설계하므로, 처음부터 극점과 영점을 선정하여 루프를 정형하는 것이 직관적이지 못하다. 따라서 본 논문에서는 초기 설계된 진상-지상기(lead-lag)를 기반으로 QFT 설계하였고, 그 전달함수는 식 (12)와 같다.

$$C(s)_{lead_lag} = 24950 \times \frac{(s+1.78e4)(s+1.265e4)(s+6289)(s+922)}{(s+9.748e4)(s+2.418e4)(s+1.107e4)(s+162.1)} \quad (12)$$

식 (12)의 제어기는 광학 게인 K_{opt} 및, 드라이브 IC 게인 K_{DRV} 그리고 A/D, D/A 게인 및 이산계를 연속계로 등가화 한 최종적인 제어기 형태이다. 논문에서는 제시하지 않았지만 단순한 지상-진상 제어계를 사용하는 경우, 일부 외란 주파수 대역에서 게인에 대한 충분히 확보되지 않았다. 따라서 최종적으로 설계된 QFT에서는 제어기 계수를 조정하여, 안정성을 손상시키지 않는 범위에서 저주파수 게인 및 수백 Hz 대역의 게인을 재설계 하였다. 설계된 최종 결과는 Fig.7에 보여진다.

4.2 H_{∞} 제어 이론 및 제어기 설계 절차

구조화된 파라미터의 구체적인 값을 바탕으로 제어기를 설계하는 QFT와 달리, H_{∞} 시스템의 불확실성이나 외란의 저감 성능에 대한 가중치 함수를 주고, 이들 임출력 무한 놈(infinite norm)을 최소화 하도록 제어기를 설계한다. 표준화 H_{∞} 설계는 다음의 페루프 전달함수를 최소화하는 제어기를 γ -반복(iteration) 과정을 통하여 식 (13)

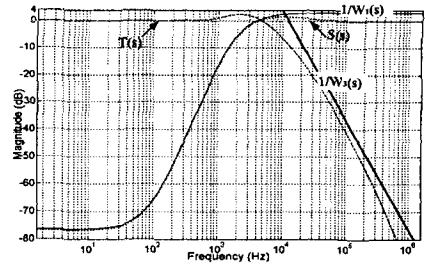


Fig.8 Weighting Functions in Mixed Sensitivity

을 만족하는 제어기를 설계한다.

여기서 T_{zw} 은 식 (14)과 같은 전달함수 형태를 가진다.

$$\|yT_{zw}(s)\|_{\infty} \leq 1 \quad (13)$$

$$T_{zw}(s) = G_{11}(s) + G_{12}(s)[I(s) - K(s)G_{22}(s)]^{-1}K(s)G_{21}(s) \quad (14)$$

이 때 가중치 함수 $W_1(s)$ 와 $W_3(s)$ 를 통하여 각각 외란의 저감 성능과 곱셈형 불확실성(multiplicative uncertainty)의 범위를 선정한다. 이 방법을 S/T 혼합 감도 설계라 하며 γ 값을 반복하면서 제어기를 찾게 된다. 설계된 제어기는 최종적으로 식(15)의 조건을 따라야 한다.

$$|S(s)| \leq W_1(s)^{-1}, \quad |T(s)| \leq W_3(s)^{-1} \quad (15)$$

가중치 함수의 선정은 기존의 지상-진상제어기와 디스크에서 발생하는 실측 외란 특성을 반영하였으며, 각 가중치 함수 및 얻어진 제어기 루프를 Fig.8에 제시하였다. 초기 설계로 얻어진 제어기 차수는 9 이나, 시스템의 구현 측면을 고려하여 최종적으로 4 차의 제어기로 축소 하였다.

4.3 QFT 및 H_{∞} 제어기 비교

QFT와 H_{∞} 의 가장 큰 차이점은 파라미터 변동의 영향을, 제어기 설계 과정에서 직접적으로 확인하며 설계할 수 있는지 여부이다. QFT 설계는 파라미터 변동을 제어기 설계 과정에서 직접 확인할 수 있는 반면, H_{∞} 의 제어기 설계는 파라미터 변동을 어떤 영역으로 표현하고 이 모든 경우에 대하여 안정된 제어계를 설계한다는 차이점이 있다. QFT는 제어기 설계 절차가 보다 직관적이거나 설계자가 직접적으로 루프 정형(shaping)을 해야 하므로 설계자의 경험 및 감각이 필요한 특징이 있다. 반면 H_{∞} 제어기 설계는 가중치 함수를 적절히 선정하면 최적제어 알고리즘을 통하여, 제어기를 설계한다는 차이가 있다.

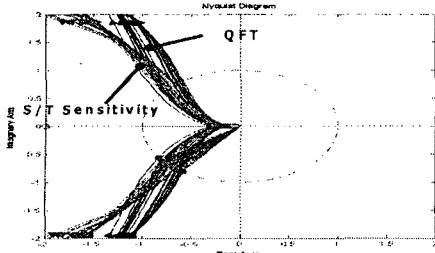


Fig.9 Nyquist plot: QFT vs. S/T Mixed

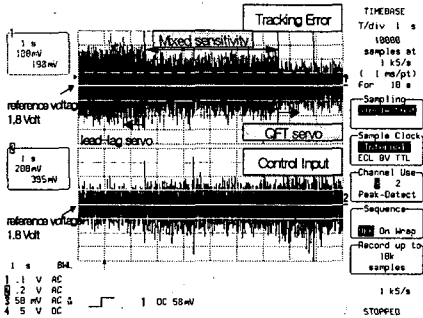


Fig.10 Realization Results

디스크 외란의 분석을 통하여, 100Hz~500Hz 대역에 루프 게인이 상대적으로 미흡하다는 것을 찾아내었다. 이를 근거로 QFT 및 H_∞ 의 설계에서 인위적으로 이 대역의 루프 게인을 크게 제어기를 설계하였다. 또한 강건 안정성을 평가하기 위하여, 불확실성이 존재하는 경우의 QFT와 S/T 혼합감도로 얻어진 루프를 Nyquist 선도를 통하여 확인하였다. Fig.9에 결과에서 알 수 있듯이, 모든 불확실성에도 불구하고 안정성이 보장됨을 확인할 수 있다.

4.4 강건 제어기의 구현

설계된 제어기는 A/D 12 bit, D/A 14bit를 가지는 d-SPACE 사(社)의 DS-1103을 이용하여 디지털로 구현하였다. 이 때 샘플링 주파수는 DSP가 가지는 한계로 인하여 100 kHz로 선택하였다. 보통 상용의 ODD 제어기가 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.

설계된 각 제어기의 성능을 파악하기 위하여 제어기를 스위칭 하도록 구성하였으며, Fig.10은 구현된 결과를 보여준다. 모든 제어기의 차수는 4차로 제어 대역이 5 kHz ~ 6 kHz, 위상 여유 40°~60° 그리고 이득 여유는 15 dB ~ 20 dB 내외의 값을 갖도록 설계하였다.

4.5 결과 분석 및 고찰

ODD의 제어 성능은 안정성이 보장된다면, 외란이 존재하는 대역에서 루프 게인이 큰 것이 외란 저감 측면에서 유리하다. 외란 분석으로부터 기존의 지상-지연 제어기의 100Hz~500Hz 대역의 게인이 부족한 것을 분석하고, 이를 반영하여 Fig.10과 같은 결과를 얻었다.

외란 분석으로부터 판단하여 볼 때, 저주파수 대역의 루프 게인 증대를 위해 저역 부스터(low frequency booster)를 복소수 형태로 구성하고, 감쇠를 통하여 게인을 조정하는 것이 바람직하다고 생각된다.

5. 결론

이상을 통하여, 광 디스크 제어계 설계에서 발생하는 구조화/비구조화된 불확실성을 고려한 강건 제어기를 QFT 및 H_∞ 제어 이론을 이용하여 설계하고 적용 평가하였다. 설계된 강건 제어기는 강건성 뿐만이 아니라 우수한 제어 성능을 가지고 있음을 실험적으로 검증하였다.

후기

본 연구는 한국과학재단(R11-1997-042-11002-2) 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

- (1) Sigurd Skogestad, Ian Postlethwaite, 1996, "Multivariable Feedback Control", John Wiley & Sons, England.
- (2) U. Mackenroth, 2004, "Robust Control Systems", Springer, Germany.
- (3) Crag Borghesani, Yossi Chait, Oded Yaniv, 2001, "The QFT Frequency Domain Control Design Toolbox: User's Manual", Terasoft, Inc.,
- (4) Lee. M. L. et al., 1998, "Robust H_∞ control with multiple constraints for the track-following system of an optical disk drive", IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 45, No.4, pp. 638-645.
- (5) M. Steinbuch et al., 1998, " μ -synthesis for a compact disc player", International Journal of Robust and Nonlinear Control, Vol.8, No.2, pp.169-189.
- (6) Gray Balas et al., 2004, "Robust Control Toolbox: User's Manual", MathWorks.
- (7) Jin-Young Choi et al., 2002, "Disturbance measurement of an optical disk and the servo loop design related to this result", MOVIC 2002, Japan