

광학 디스크 드라이브를 위한 강인 제어 알고리즘의 구현

정희수, 최현택, 배홍문, 서일홍,  
한양대학교 전자공학과

Implementation of a robust control algorithm for Optical Disk Drive

Hee-Su Joung, Hyun-Taek Choi, Hong-Moon Bae, and Il Hong Suh  
Dept. of Electronics Engineering, Hanyang University

**Abstract** - This paper presents approaches to the control of the DVD (Digital Video Disk) system using DSP (Digital Signal Processor) in order to improve the precision and robustness. To improve the performance of the Pick-Up servo actuator of the digital video drive, the tracking and focusing servo control algorithms is applied to this system. Simulation results show the performance of the robust control algorithm applied the pick-up servo system comparing to the linear controller.

터 허용 가능한 오차 범위 내에 있도록 유지해야 한다.

1. 서론

디지털 오디오(digital audio) 시스템에서 디지털 기록과 재생기술 분야는 매우 중요한 분야이다. 최근 콤팩트 디스크(compact disc)의 개발에 따라 대용량의 신호를 기록하고 재생할 수 있는 기술이 빠른 속도로 발전하고 있다. 또한, 디지털 비디오 디스크(Digital Video Disc)는 오디오 및 비디오(Audio & Video) 정보 전달 수단으로써 매우 중요한 부분을 차지하고 있으며, 이에 따라 대용량의 신호를 기록하고 재생하기 위한 기술이 더욱더 요구되고 있다[8]. 광 디스크에 저장되어 있는 정보를 읽기 위해서는 CD나 DVD나 공통적으로 Optical Head(Pick-up)가 사용되는데, 이것은 아주 정밀한 특성을 요구하기 때문에 외란에 강인한 제어 방법이 요구되고 있다.

본 논문에서는 포커싱 구동기에 대한 모델링을 바탕으로 설계한 디지털 광 픽업 서보 시스템에 강인 제어 알고리즘을 적용하여 성능을 확인하고, 기존의 선형제어기를 사용한 경우와 비교하였다.

2. 광 디스크 드라이브 시스템

광 픽업 서보 시스템은 포커싱 서보(focusing servo)와 트래킹 서보(tracking servo)를 중심으로 구성되어 있는데, 각각에 대한 블록도는 그림 1과 그림 2에 나타내었다. 포커싱 서보는 렌즈와 디스크와의 신호 면의 거리를 일정하게 유지시켜 디스크의 기록 층에 광 초점이 정확히 맺히도록 수직 방향의 움직임을 제어하기 위한 서보이고, 트래킹 서보는 디스크가 수평으로 흔들림에도 불구하고 트랙을 놓치지 않고 따라가도록 하는 서보이다. 또한, 광 픽업 액추에이터는 두 개의 VCM(Voice Coil Motor)으로 구성되어 있다. 광 디스크에 저장되어 있는 정보를 읽기 위해서는 레이저빔의 광 스팟이 트랙으로부터

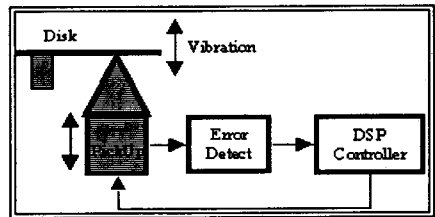


그림.1 포커싱 서보 블록도.

Fig. 1. Block diagram for focusing servo.

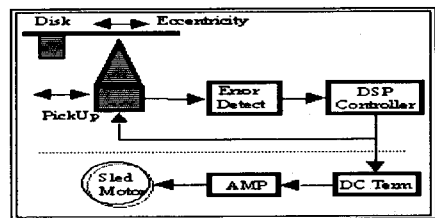


그림.2 트래킹 서보 블록도.

Fig. 2. Block diagram for tracking servo.

표 1. 디스크의 면진동 및 편심 사양(4.7GB DVD).

Table 1. Specification of 4.7GB DVD.

최대 면 진동(μm)	±300
면 진동 최대 가속도(m/s <sup>2</sup> )	8
최대 편심량(μm)	±35
최대 편심 가속도(m/s <sup>2</sup> )	1.1

디스크의 신호 면은 실제로 상당히 많은 휘어짐과 요철이 있다. 이런 상태로 디스크가 회전했을 때 발생하는 면진동 및 편심 사양은 표 1과 같고, 광학 렌즈에 있어서 광 스팟 직경 d는 식(1)과 같고, 초점 심도 h는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$d \cong \frac{\lambda}{NA} \tag{1}$$

$$h \cong \frac{\lambda}{(NA)^2} \tag{2}$$

여기서 λ와 NA는 각각 광의 파장과 렌즈 개구율을 나타낸다.

파트 정보를 정확하게 읽어 내기 위해서는 위의 관계에서와 같이 광 스팟의 직경이 작고, 초점의 범위가 넓은 것이 요구되지만, NA는 상반되는 특성이 있다.NA를 작

게 하면 초점의 심도가 깊어져서 설계는 쉬워지지만 스팟 직경이 크게 되어 인접 트랙에 영향을 받기 쉬워진다. 반대로 NA를 크게 하면 스팟의 직경은 작아지지만 초점의 심도가 얕아져서 피트에서 떨어지기 쉬우므로 서보의 설계가 어렵게 된다. 디스크의 규격에 의하면 DVD의 트랙 피치는 0.75 $\mu\text{m}$ 이므로 인접트랙의 영향을 받지 않기 위해서는 스팟의 직경을 같은 크기가 되도록 해야 한다. 포커싱 서보는 디스크가 상하 방향으로 먼 진동하고 있을 때 그 디스크와 픽업 구동기의 렌즈 사이의 거리를 일정하게 유지 시켜, 디스크와 렌즈 사이의 상대 거리를 0.23 $\mu\text{m}$  이내로 하는 것이 목표이다. 이때 최대 먼 진동량은 표1에서 기술한 것처럼 300 $\mu\text{m}$ 이다.

디스크의 트랙에 생기는 편심은 제조시에 생기는 왜곡과 디스크를 장착하기 위한 구멍의 부정확성이 원인이 되는데, 트랙킹 서보 제어기 설계시 이러한 편심량을 고려해서 설계해야 하고, 피트의 폭과 신호를 얻어내기 위한 광 스팟의 초점을 고려하면 트랙킹의 제어목표는 0.022m 이내로 해야 한다. 또한, 트랙킹 서보로 트랙 추종을 하지만, 픽업 구동기의 좌우 이동이 가동범위가 제한되어 있기 때문에 코어스 서보(Coarse Servo)를 이용하여 이동 범위가 큰 DC성분을 제어한다. 즉 코어스 서보는 픽업 구동기 전체를 이동시키는 역할을 한다.

한편, CD와 같이 일정 선 속도의 기록방식을 채택하고 있는 DVD는 디스크의 회전수는 약 600~1300 rpm까지의 연속적인 선속도 변화를 가진다. 스피들 서보는 기록할 때의 속도를 재생할 때 정확히 복원하기 위해 광 픽업으로부터 나오는 RF(radio frequency)신호를 정형한 후 이를 디지털 PLL 회로를 이용하여 동기를 맞춘다.

광 디스크 드라이브는 아래의 그림 3에서 보이는 바와 같이 크게 제어기와 플랜트, 그리고 외란으로 구분할 수 있다. 광 디스크 구동기의 제어기는 원하는 위치 입력( $r$ )에 대한 PES 출력( $y$ )의 관계를 결정하며 이것을 방해하는 외란(disturbance :  $w, d, n$ )에 대한 분석과 이들이 PES에 미치는 영향을 해석하는 것이 매우 중요하다.

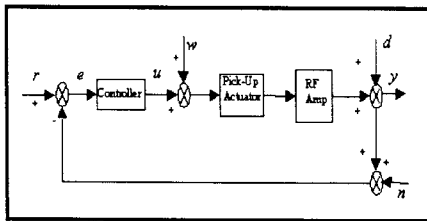


그림3 DVD 시스템의 블록도.

Fig. 3. Block diagram for DVD system.

그림 3에서  $w$ 는 토크외란(torque disturbance)을 나타내며, 주로 외부진동 및 충격에 기인하고,  $n$ 은 전력 증폭기 잡음, 아날로그/디지털 변환기(ADC)와 디지털/아날로그 변환기(DAC)의 제한된 해상도(resolution)에 의한 양자화 오차에 의해 나타난다. 스피들 모터와 디스크 회전 에 따른 디스크의 움직임은 기계적 외란(mechanical disturbance)  $d$ 에 직접적인 영향을 미친다. 특히 스피들

속도의 증가는 디스크의 진동을 더욱 증폭시키며, 안정적인 트랙 추종의 신뢰도를 낮추게 된다[2][3].

표. 2 픽업 구동기의 사양.  
Table 2. Specification of pick-up actuator.

구분	포커싱	트랙킹
항목		
코일 직류 저항	5.3 $\Omega$ ±0.9 $\Omega$	5.3 $\Omega$ ±0.9 $\Omega$
저역 감도( $G_0$ )	3.5±1.1 mm/v	0.7±0.27 mm/v
공진 주파수( $f_0$ )	20±4Hz	45±5Hz
Q값	20dB 이하	28dB 이하

광 픽업 구동기는 스프링이 달려있는 물체로 모델링할 수 있는데 표 2의 값들을 기준으로 전달함수를 유도하면 다음과 같이 나타낼 수 있다[9].

$$G_A(s) = \frac{49891}{s^2 + 18s + 31273} \cdot \frac{20800}{s + 20800} \quad (3)$$

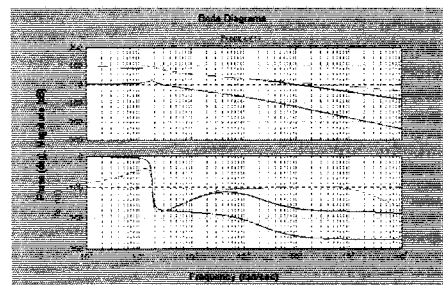


그림 4. 제어기를 포함한 시스템의 보데 선도.  
Fig. 4. Bode plot of the control system.

포커싱 초점심도(0.9 $\mu\text{m}$ )에 대한 허용오차(0.23 $\mu\text{m}$ )와 트랙킹 트랙폭(0.6 $\mu\text{m}$ )에 대한 허용오차(0.022 $\mu\text{m}$ )를 고려하여 그림 4와 같은 특성을 얻을 수 있도록 제어기를 설계하면, 개루프의 Cutoff frequency  $f_c \geq 2\text{kHz}$ 와 Phase Margin  $P_m \geq 40\text{deg}$ 의 요구 조건을 만족시킬 수 있게 된다.

### 3. 강인제어 알고리즘 및 모의 실험

모델에 기초한 방법으로는 내부 모델 제어기(Internal Model Controller, IMC)와 외란 관측기(Disturbance Observer, DOB), 그리고 강인 내부 보상기(Robust Internal-loop Compensator, RIC)를 사용한 방법이 있는데, 이러한 방법들은 서보 제어기와는 별도로 플랜트 모델의 불확실성, 플랜트의 변화, 그리고 외란 등으로 인해 발생하는 플랜트 모델과의 오차를 모두 통합된 등가 외란(equivalent disturbance)으로 간주하여 보상하는 보상을 갖는다는 관점에서는 동일한 제어 방식으로 볼 수 있으나, 구현하는 방식에는 조금씩 차이가 있다. RIC는 시스템이 설계한 공칭 모델과 같이 동작하도록 하는 역할을 한다. 따라서 구조적인 모델의 불확실성, 시스템의 변화, 외란 등에 대하여 강인성을 갖는 특징이 있다.

본 논문에서는 그림 7과 같은 강인 내부 보상기를 갖는 제어기를 설계하고, 다른 방법들의 성능과 비교하고자 한다. 포커싱 서보의 모의 실험을 위하여 식(4)와 같

은 토크 외란과 식(5)와 같은 출력 외란을 각각 인가하였다.

$$\rho(t) = 63 \mu \cdot 9.8 + 0.5m \cdot \sin(300Hz) + 0.3m \cdot \sin(100Hz) \quad (4)$$

$$d(t) = 200 \mu \cdot \sin(200Hz) + 100 \mu \cdot \sin(85Hz) \quad (5)$$

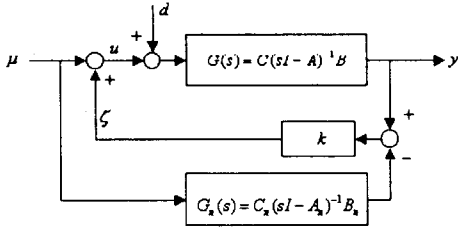


그림 5. 강인 내부 보상기의 구조.  
Fig. 5. Structure of IMC.

일반적인 선형 제어기만을 사용한 경우와 선형제어기에 DOB를 포함시킨 경우, 그리고 선형제어기에 RIC를 포함시킨 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 각각 그림 6, 그림 7 그리고 그림 8에 나타내었다. 이러한 결과로부터 강인 제어기를 기존의 선형제어기에 추가적으로 사용한 경우가 선형제어기만을 사용한 경우보다 10배 이상의 성능이 개선됨을 확인할 수 있다. 여기서 DOB를 적용할 경우 역함수로 인한 제약이 존재하는데, 이를 효과적으로 피할 수 있는 Q-filter를 설계가 중요한 관건이 된다.

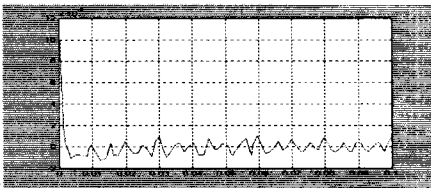


그림 6. 선형 제어기에 대한 응답.  
Fig. 6. Response by linear controller.

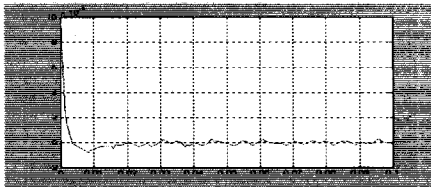


그림 7. 선형 제어기와 DOB를 사용한 응답.  
Fig. 7. Response by linear controller and DOB.

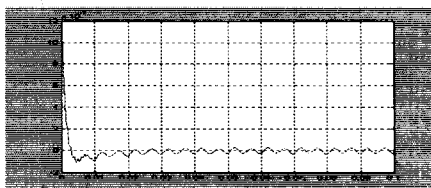


그림 8. 선형 제어기와 RIC를 사용한 응답.  
Fig. 8. Response by linear controller and RIC.

#### 4. 결론

본 논문에서는 광 디스크 드라이브의 포커싱 구동기에 대한 모델링을 바탕으로 설계한 디지털 광 픽업 서보 시스템의 정밀 위치 제어를 위한 강인 제어 알고리즘을 설계하고, 이를 적용하여 그 성능을 확인하였다. 그리고 기존의 선형제어기를 사용한 경우와 비교하였다.

추후의 연구에서는 제안한 강인 제어 알고리즘을 실제 시스템에 적용하고자 한다.

#### (참고 문헌)

- [1] M. T. White and M. Tomizuka, "Increased Disturbance Rejection in Magnetic Disk Drives by Acceleration Feedforward Control", Preprints of the 13th World Congress of IFAC(San Francisco, California), Volume O, pp. 489-494, July 1996
- [2] L. Guo, H. S. Lee, A. Hudson, and S.-h. Chen, "A Comprehensive Time-Domain Simulation Tool for HDD servo Control Design and Mechanical Enhancement", Asia Pacific Magnetic Recording Conference (APMRC : Singapore), July 1998
- [3] J. S. McAllister, "Disk Flutter: Causes and Potential Cures", Data Storage, Vol. 4, pp. 29-34, May/June 1997
- [4] D. Abramovitch, T. Hurst, and D. Henze, "An Overview of the PES Pareto Method for Decomposing Baseline Noise Sources in Hard Disk Position Error Signals", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 34, No. 1, pp. 17-23, January 1998
- [5] 강창익, 하인중, "브러쉬없는 직류전동기의 제한 선형화 제어" 대한전기학회 논문지, 제43권, 제x호, pp. 982-990, 7. 1994.
- [6] H. S. Lee and L. Guo, "Servo Performance Prediction for High Capacity Disk Drives", Proceedings of the American Control Conference (Philadelphia, Pennsylvania), June 1998
- [7] Benjamin C. KUO, "Automatic Control Systems," Prentice-Hall International Editions, 7th Edition
- [8] SANKYO, "Optical Pick-up SPU3131 Product Specifications for DVD/CD,"
- [9] 배홍문, 최현택, 서일홍, "고밀도용 광학디스크 픽업의 모델링 및 서보 성능 향상을 위한 기술 조사 연구," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 1999. 7
- [10] 최현택, 서일홍, 김봉근, 정완관, 배홍문, 정홍상, "강인 내부 보상기의 설계와 해석," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 1999. 7