

고밀도용 광디스크 드라이브의 제어기술에 관한 연구

°배 흥 문* 최 현 택** 서 일 흥** 정 흥 상*
 * 대우전자 디지털 정보통신 연구소 ** 한양대학교 전자공학과

A study on the control method of the high density optical disk drive

°Hong-Moon Bae* Hyun-Taek Choi** Il-Hong Suh** Heung-Sang Jung*
 * DIT Reserch Center, DAEWOO Electronics
 ** Dept. of Electronics Engineering, Hanyang University

Abstract - Recently, there is a strong need of DVD (Digital Versatile Disk) system of high density, high speed, and high accuracy. System performances mostly depend on not only optical system, but also servo technology to drive it. Therefore, we investigate main technology concerned with optical pick-up unit based on 4.7 GB DVD-RAM and analyzes technology of optical and servo systems that are required for high density, high speed and high accuracy from the viewpoint of control. And then, we design a linear controller based on specification of 4.7GB DVD-RAM that is commercially available now. We analyze the dynamic characteristics of optical system that is coupled with control system and verify effect on performance indices of servo due to parameter variation of pick-up by simulation. Finally, we will propose controller design specifications and provide direction of technical development for servo system and problems coupled with high capacity for 15GB level in the future.

1. 서 론

초고속 정보화 시대를 지향하는 사회적인 요구로 고속, 대용량, 소형, 저 비용으로 기록 가능한 정보 저장 장치가 요구되고 있다. 이러한 요구사항을 만족하는 장치로 주목받는 상변화 광디스크는 그 규격을 결정함에 있어 일본의 소니 (DVD+RW)와 도시바(DVD-RAM) 간에 치열한 경쟁을 하고 있다. 소니 측은 용량은 조금 떨어지지만 하위 호환성(Backward Compatibility)을 주장하고 있는 반면 도시바 측은 호환성보다는 고용량을 주장하고 있다. 현재 상용화 제품으로는 단면 2.6GB 및 4.7GB용 DVD-RAM이 출시되어 있고, 향후 고 선명(High Definition: HD)급의 동화상을 2시간 이상 저장할 수 있는 15GB용 DVD-RAM을 국내, 외 각 업계에서 개발을 진행하고 있는 단계이다. 본 논문에서는 현재 상용화되고 있는 4.7GB DVD-RAM을 기초로 광 픽업의 요소 기술과 고 밀도, 고속 및 고정도화에 요구되는 광학계 및 서보계의 기술을 제어 기술 관점에서 살펴보고자 한다. 먼저 광디스크 구동에 관련된 기술 중 광 픽업의 위치 제어와 관련된 요소 기술을 소개하고, 픽업의 모델링 오차가 제어기의 성능에 미치는 영향을 모의실험을 통해서 평가하고, 이를 근거로 해서 현재 연구 중인 고급 제어기 설계 방향을 살펴보고자 한다.

2. 고밀도용 광 디스크 드라이브 제어 관련 기술

2.1 광디스크의 고밀도화에 따른 요소기술

광디스크의 고밀도화를 실현하기 위해서는 다양한 요소 기술의 다면적인 검토가 필요하다. 그 중 광 픽업(pick-up)에 부여된 광 초점의 미소화와 관련된 기술을 보면, 광 초점의 직경은 광의 파장에 비례하고, 대물렌즈의 개구수(NA)에 반비례한다. 파장은 광원과 관련되어 있고, 픽업 개발자 입장에서는 개발시점에서 최적의 파장 사양을 입수하는 것이 최선이다. 한편 대물렌즈의 NA를 얼마까지 높일 수 있는지에 관해서는 새로운 광디스크를 개발할 때의 설계 사양과 연관 있는 문제이며, 광디스크 장치 기술의 중심 과제중 하나이다. DVD-RAM 규격에서는 고 NA화를 방해해온 디스크 기판의 기울기의 영향을 억제하기 위해서 기판의 두께를 0.6mm로 하였다. 광학계의 성능 지수 중에서 광출력 효율과 밀접한 관계가 있으며 또한 여러 신호 검출부에서 보다 정확한 오차 신호를 검출하는데 악영향을 미치는 수차를 줄이려는 노력이 진행되고 있다. 이렇게 0.6mm 기판을 배경으로 NA를 크게 하고, 광 초점의 미소화를 추구하는 4.7GB의 DVD-RAM 규격은 무리 없이 실현할 수 있도록 되어 있다.

한편으로, 디스크의 종류가 다양해짐으로 인해서 호환성 문제가 대두된다. 그중 하나가 동일 광 초점으로 CD와 DVD를 재생하는 것이다. 이처럼 동일 광 초점으로 CD와 DVD 양쪽을 재생하려면 여러 가지 장애가 발생하게 된다. 이에 0.6mm 디스크와 1.2mm 디스크를 읽을 수 있는 홀로그래픽 광소자를 부착한 2중 초점 광학 헤드가 개발되어 있다[1].

2.2 광디스크 픽업 위치 제어계의 기본사항

고밀도의 기록이 가능한 광디스크 시스템에는 다섯 종류의 서보 시스템이 있다. 디스크의 기록층에 광 초점이 정확히 맺히도록 디스크 면에 수직 방향으로 포커스 구동기를 제어하는 포커싱(focusing) 서보, 여러 외란이 있음에도 불구하고 정확히 트랙 중심을 광 초점이 추종하도록 디스크 반경 방향으로 트래킹 구동기를 제어하는 트래킹(tracking) 서보, 요구된 정보를 얻기 위해서 광 초점을 디스크의 특정 트랙으로 빠르게 이동 시켜주는 슬래드(sled) 서보, 고밀도로 가면서 광 초점의 크기가 작아지고 디스크의 두께가 얇아지는 등 여러 가지 요인으로 인해서 디스크 면과 대물렌즈 면이 평행이 안되고 기울어지게 되는데 이것을 보상하는 틸트(tilt) 서보, 디스크의 회전 속도를 기록/재생 위치에 따라 선속도를 일정하게 유지시켜주는 스피들(spindle) 서보 등이 있다.

그림 1에서 보는 바와 같이 광디스크 구동기의 제어기는 원하는 위치 입력(r)에 대한 위치에러신호(PES) 출력(y)의 관계를 결정하며 이것을 방해하는 3가지의 외란(w, d, n)에 대한 분석과 이들이 PES에 미치는 영향을 해석하는 것이 매우 중요하다. w 는 토크 외란을 나타내며, 주로 외부 진동 및 충격에 기인한다[2].

스피들 구동기와 디스크 회전에 따른 디스크의 움직임은 기계적 외란, d 에 직접적인 영향을 미친다. 특히 스

핀들 속도의 증가는 디스크의 진동을 더욱 증폭시키며, 안정적인 트랙 추종의 신뢰도를 낮추게 된다[3][4]. 전기적 잡음, n 은 전력 증폭기 잡음, 아날로그/디지털 변환기(ADC)와 디지털/아날로그 변환기(DAC)의 제한된 해상도에 의한 양자화 오차에 기인한 것이다. 이들 각 요소가 PES에 미치는 영향에 대한 해석의 예는 [4][5][6]에서 볼 수 있다.

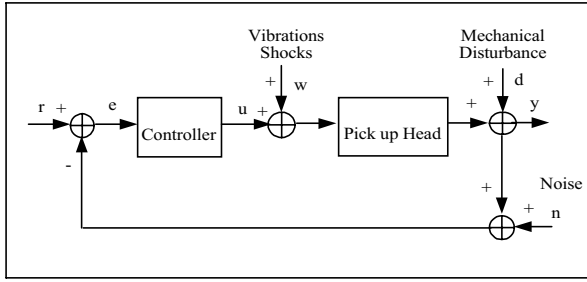


그림 1. 광디스크 구동기의 위치제어계 블록도

이들 기계적, 전기적 외란에 의한 오차를 이탈(run-out)이라 하며, 다음과 같은 두 가지 요소로 분류된다. 주기적인 이탈(repeatable run-out: RRO)은 구동기에 가해지는 외란 중 디스크의 회전주기와 일치하는 주기적인 성분으로 정의되는데, 주로 디스크의 편심, 디스크 회전 진동에 의한 픽업 어셈블리의 진동 등의 요인에 의해 유발된다. 그리고 회전수의 정수 배에 무관하게 나타나는 부분을 비주기적인 이탈(non-repeatable run-out: NRRO)이라 한다. RRO는 대부분 기계적인 외란에 의한 것이며, NRRO는 기계적, 전기적 외란의 합성에 의해 나타난다[3][7]. 표1에 각종 디스크의 면진동 규격과 디스크의 편심 규격, 그리고 디스크의 잔류 허용 오차를 나타내었다

표 1. 디스크의 면진동, 편심, 잔류 허용 오차

항목 \ 디스크	CD (650MB)	DVD (4.7GB)	DVD-RAM (4.7GB)
최대 면진동	±500 μm	±300 μm	±300 μm
면진동 최대 가속도	10 m/s ²	8 m/s ²	8 m/s ²
최대 편심량	±70 μm	±35 μm	±50 μm
최대 편심 가속도	0.4 m/s ²	1.1 m/s ²	1.8 m/s ²
포커싱(초점 심도)	1(3.85) μm	0.23(0.9) μm	0.23(0.9) μm
트래킹(트랙 폭)	0.1(1.6) μm	0.022(0.6) μm	0.022(0.595) μm

광 디스크 시스템에서는 트랙 탐색 시 접근 시간 단축이 핵심 설계 사양이 되는데 이에 해가되는 요소가 결합(coupling)문제이다. 이는 미동 구동기가 조동 구동기 상에 얹혀져있는 2단 구동기 구조이기 때문이다. 즉 1단은 위치 센서가 없는 조동 구동기, 2단은 위치 센서가 있는 미동 구동기로 구성된다. 설계의 원리는 조동 구동기는 저주파의 트랙 움직임을 추종하고, 미동 구동기는 고주파의 트랙 움직임을 추종하게 된다. 그 한 예로 하나의 저주파 필터를 추가하여 2-입력/2-출력 2단구동 시스템을 1-입력/1-출력 시스템으로 단순화하여, 트랙 추종의 정확도를 높이고, 이동 범위를 크게 한 방법이 나와 있다[8]. 또한, 광디스크 기술이 고용량, 고밀도로 가면서 디스크 틸트(tilt) 문제가 대두된다. 틸트는 세계의 중심 즉, 질량 중심, 힘 중심, 지지 중심이 같지 않기 때문에 발생한다. 와이어(wire) 스프링형 구동기는 저항성 때문에 비틀림 외란을 저지할 수 없다. 이것에 대한 대책으로 평행한 두 자석을 이용해서 두 개의 포커싱 힘 및 방향을 조정해서 틸트 서보를 하는 방식이 나와 있다[9].

2.3 구동기 모델링

본 논문에서는 광디스크 서보계 중 포커싱과 트랙킹 서보를 중심으로 언급하고자 한다. 픽업의 포커싱, 트랙킹 구동기의 설계 사양 및 모델을 제시하고 이를 근거로 전달 함수를 유도한다.

와이어 스프링 형 2축 구동기의 모델은 두가지로 분류하여 모델링할 수 있다. 이는 스프링-질량-댐퍼 형태의 기계 시스템과 전자기계로, 식 (1)과 같이 3차 시스템으로 나타낼 수 있다. 그런데 전자기계의 극점은 서보대역에서 매우 멀리 떨어져 있으므로 여기서는 고려하지 않기로 한다. 따라서 전달 함수는 식 (2)와 같이 단순화할 수 있다.

$$G(s) = \frac{\omega^2}{s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2} \frac{R/L}{s + R/L} \quad (1)$$

$$G(s) \approx \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2)$$

표 2에 (주)삼협(SANKYO)정밀제작소에서 제조하는 DVD/CD용 광 픽업의 사양을 근거로 전달함수를 얻을 수 있다[10].

표 2. DVD/CD용 광 픽업 사양 예

구분 \ 항목	포커싱 구동기	트래킹 구동기
코일 직류 저항	5.3Ω ± 0.9Ω	5.3Ω ± 0.9Ω
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

표 2의 포커싱 구동기 사양을 이용하여 식(2)에 대입하면 포커싱 구동기 전달함수는 다음과 같이 구해진다.

$$G_f(s) = \frac{56124}{s^2 + 22s + 16036} \quad (3)$$

같은 방법으로 표 2의 트랙킹 구동기 사양을 이용하여 트랙킹 구동기의 전달함수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$G_t(s) = \frac{56282}{s^2 + 30s + 80403} \quad (4)$$

2.4 모의실험

먼저 구동기의 매개 변수의 변화에 따른 구동기의 주파수 응답 특성의 변화를 보이고, 식 (3), (4)와 같은 모델에 대한 진상-지상(lead-lag) 선형 제어기를 설계한다. 이를 MATLAB을 이용하여 구동기의 매개 변수 변화에 따른 제어기의 성능을 상대평가하고, 향후 고밀도화에 따른 제어기 설계의 고려사항을 언급하고자 한다.

2.4.1 구동기의 주파수 응답 특성 분석

표 3, 4의 설계 사양에 의한 포커싱과 트랙킹 구동기의 보데 선도를 그림 2, 3에 나타내었다. 이러한 특성의 큰 변화는 모델의 불확실성으로 나타나게 된다. 향후 고밀도화로 기술이 전개됨에 따라서 이러한 모델 불확실성이 제어기 설계에 큰 부담으로 작용하게 될 것으로 사료된다.

2.4.2 제어기 설계 및 결과 분석

본 논문에서는 주파수 영역에서 진상 지상 보상기를 설계하여 모델 불확실성에 대한 선형제어기의 한계 성능

을 보인다. 앞에서 제시한 구동기의 사양 및 제어기 성능 규격을 고려해서 다음과 같이 설계하였다. 최대 위상 여유는 80도 정도로 하였고, 개루프 전달함수의 교차주파수 f_{fc} 는 2kHz로 하였다. 이러한 포커싱 서보의 저역 부스트 및 위상 보상기의 전달함수 특성은 식 (5)와 같다.

$$G_{fc}(s) = \left\{ \frac{0.0008s+1}{0.0075s+1} \right\} \cdot \left\{ \frac{1070s+1184640}{s+142728} \right\} \quad (5)$$

또한 트래킹 서보의 저역 부스트 및 위상 보상기의 개루프 전달함수의 교차주파수 f_{fc} 는 2.3kHz로 하였고, 전달함수 특성은 식 (6)과 같다.

$$G_{tc}(s) = \left\{ \frac{0.0007s+1}{0.0307s+1} \right\} \cdot \left\{ \frac{6555s+8305888}{s+164799} \right\} \quad (6)$$

포커싱 서보의 모의 실험에서는 식 (7)과 같은 토크 외란을, 식 (8)과 같은 출력 외란을 인가하였다.

$$\rho(t) = 63 \mu \cdot 9.8 + 0.5m \cdot \sin(300Hz) + 0.3m \cdot \sin(100Hz) \quad (7)$$

$$d(t) = 200 \mu \cdot \sin(200Hz) + 100 \mu \cdot \sin(85Hz) \quad (8)$$

표 3과 같은 규격을 갖는 세가지 종류의 구동기를 대상으로 외란 제거 성능을 비교하였다. 각각의 위치 오차를 그림 4에 나타내었다. 한편 트래킹 서보의 모의 실험에서는 식 (9)와 같은 토크 외란을, 식 (10)과 같은 출력 외란을 인가하였다.

$$\rho(t) = 63 \mu \cdot 9.8 + 0.5m \cdot \sin(300Hz) + 0.3m \cdot \sin(100Hz) \quad (9)$$

$$d(t) = 30 \mu \cdot \sin(200Hz) + 20 \mu \cdot \sin(85Hz) \quad (10)$$

표 4와 같은 규격을 갖는 세가지 종류의 구동기를 대상으로 외란 제거 성능을 비교하였다. 각각의 위치 오차를 그림 5에 나타내었다.

표 3. 포커싱 구동기의 세가지 설계 변수

구동기	규격	저역감도(mm/v)	공진 주파수(Hz)	Q 값 (dB)
(1)		2.4	16	5
(2)		3.5	20	15
(3)		4.6	24	20

표 4. 트래킹 구동기의 세가지 설계 변수

구동기	규격	저역감도(mm/v)	공진 주파수(Hz)	Q 값 (dB)
(1)		0.43	40	20
(2)		0.7	45	28
(3)		0.97	50	10

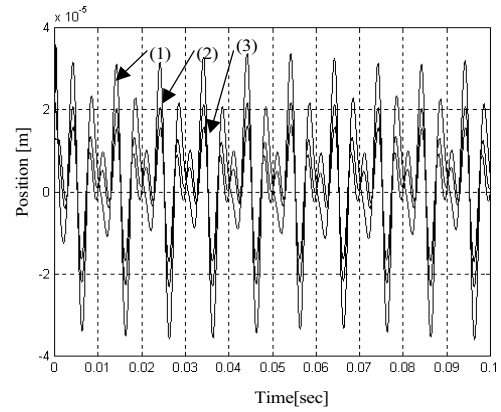


그림 4. 포커싱 서보의 위치 오차

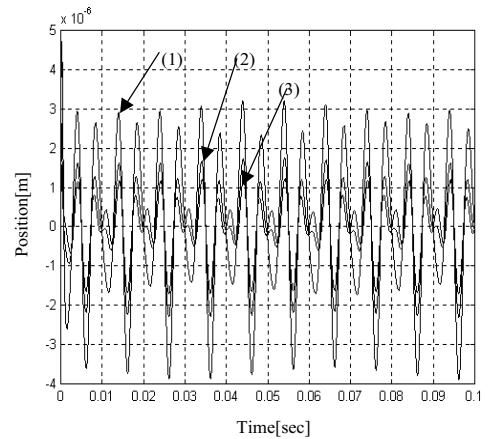


그림 5. 트래킹 서보의 위치 오차

그림 2. 포커싱 구동기의 사양변동에 따른 보데 선도

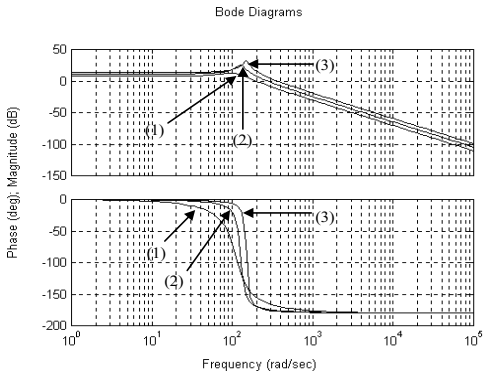
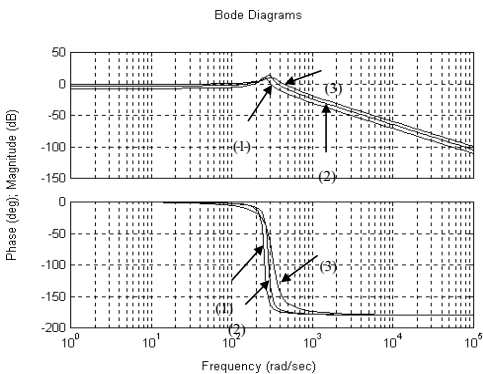


그림 3. 트래킹 구동기의 사양변동에 따른 보데 선도



DVD용 픽업의 포커스/트래킹 서보의 모의실험 결과 외란의 억제 성능 규격을 만족시키지 못하고 있다. 외란 억제 성능은 보통 제어기의 이득을 좀더 키워 대역폭을 보다 넓게 해서 개선하거나, 보상기를 주파수 대역 별로 설계하는 방법이 있다. 여기서 현재 대역폭과 이득은 DVD 규격을 따르고 있기 때문에 더 이상 고려치 않고, 제어기의 차수를 증가시키는 방법이 있는데 이 경우에는 연산시간이 길어져 또 다른 문제를 야기할 수 있다. 또한 제어기 설계에 많은 시간을 필요로 하고, 구동기의 모델링 오차에 따른 영향에 더 민감할 수 있다. 따라서 본 모의 실험 결과에서 유추 할 수 있는 것은 고차 제어기를 설계하여 외란 억제 성능 규격을 만족시킨 경우에도 구동기의 매개 변수의 변동에 따라서 외란 억제 성능

에 큰 차이가 있을 것이라는 점이다. 결국 고 정밀 위치 제어를 요구하는 상황에서 고전 선형 제어기만으로는 모델링 오차에 따른 외란 보상 능력에 한계가 있다는 것을 알 수 있으며, 모델의 불확실성에 대한 강인한 서보 알고리즘을 개발해서 적용해야한다는 결론을 얻을 수 있다.

3. 향후 제어기 설계 동향

이에 따른 향후 연구 방향은 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫번째는 2단 구동기 구조를 효과적으로 제어하기 위해 강인한 다변수 시스템 설계를 고려해 볼 수 있다. 지금까지는 2단 구동기의 상호 영향을 무시하거나, 제거시켜 단순화 한 후 제어하려는 의도로 제어기를 설계하였다. 그러나 효과적인 제어를 하기 위하여 2단 구동기를 협조 제어의 형태로 구동하여야 하므로 다변수 제어기가 필요하다. 다변수 제어기법으로는 고전적인 LQG/LTR기, H_∞ 등이 적용될 수 있다[11,12]. 최근 강인성에 시간 영역의 응답 특성을 함께 고려한 다 목적 강인 제어기 설계가 연구되어 지고 있다[13].

두번째는 외란 및 모델링 오차를 제거하는 강인한 제어기의 설계이다. 고전 제어기도 어느 정도 강인성을 가지고 있지만 이를 직접 고려하여 설계하지는 않는다. 따라서 이러한 강인성을 목적으로 하는 설계가 이루어져야 한다. 이와 같은 연구에는 외란 관측기(Disturbance Observer: DOB)[14], 내부 모델 제어(Internal Model Control: IMC)[15] 등을 들 수 있으며, 이를 발전시킨 DOB에 근거한 내부 모델 제어기가 제안되었으며[16], 이 강인 제어기의 일반적인 형태로 구현한 강인 내부 보상이 제안되었다[17]. 일반적으로 외란의 주기가 변하는 시스템에 반복제어를 적용하기는 어려움이 있으나, 최근 기본적인 반복 제어기를 개선한 연구 결과가 발표되었고[18], 반복 제어기의 안정성을 보장하는 연구도 진행되고있다[19].

세번째로 제어기 구현에 관한 것으로, 광 디스크 시스템의 상용화에 매우 중요한 요소이다. 이는 가격대 성능비를 높이기 위해 저가의 정수 연산만 가능한 DSP를 사용하는 데 기인한다. 앞에서 언급한 현대 제어 알고리즘을 구현함에 있어 정수 연산에 의한 양자화 효과는 크게 나타난다. 따라서 개발된 고급 제어 알고리즘을 저비용으로 구현하는 방법에 대한 연구가 필요하며, 이에 대한 연구 결과도 발표되고 있다[20].

4. 결 론

지금까지의 광디스크 드라이브의 제어 기술은 고전 제어 방법에 근거한 제어기가 주류를 이루었다. 고속, 대용량 소형 광 디스크 드라이브 시스템에 대한 요구가 증가함에 따라 발생한 여러 가지 기술적인 문제점, 특히 제어기의 성능에 영향을 주는 문제점은 제어기에 높은 강인성을 필요로 하게 되었다. 따라서 앞으로의 광디스크 드라이브의 제어 알고리즘은 지금까지의 고전 제어 방식을 탈피하여 설계 단계에서부터 강인성에 대한 고려가 포함된 제어기가 적용될 것이다. 물론 제어 방식이외에 제어에 영향을 주는 여러 가지 난제들도 함께 해결하여야한다. 21세기의 정보 저장 장치 산업의 주도를 위해 제어기술자들 뿐만 아니라 기계, 전자, 재료, 소프트웨어 기술자들의 부단한 협력과 노력이 절실히 요구된다.

(참 고 문 헌)

[1] Y. Komma, Y. Tanaka, K. Urairi, S. Nishino, S. Mizuno, "Dual Focus Optical Head with a Hologram-Integrated Lens," Jpn. J. Appl. Phys. vol.

36, pp 474-480, 1997

[2] M. T. White, M. Tomizuka, "Increased Disturbance Rejection in Magnetic Disk Drives by Acceleration Feedforward Control," The 13th World Congress of IFAC, vol. O, pp 489-494, July, 1996

[3] 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," APMRC, July, 1998

[4] J. S. McAllister, "Disk Flutter: Causes and Potential Cures," Data Storage, vol. 4, pp 29-34, May/June, 1997

[5] 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 Trans. on Magnetics, vol. 34, No. 1, pp 17-23, January, 1998

[6] H. Ho, "Noise Impact on Servo TMR," Proc. of the ACC, pp 2906-2909, June, 1997

[7] H. S. Lee and L. Guo, "Servo Performance Prediction for High Capacity Disk Drives", Proc. of the ACC, June, 1998

[8] J.-D. Yang, L.-F. Pan, X.-D. Pei, D.-Y. Xu, "Coupling-Enhanced Control for Optical Disk Drives," J. of Applied Physics, vol.37, pp 2203-2205, April 1998

[9] J.-Y. Kang, M.-G. Yoon, "Robust Control of an Active Tilting Actuator for High-Density Optical Disk," Proc. of the ACC, pp 861-865, June, 1998

[10] SANKYO, "Optical Pick-up SPU3131 Product Specifications for DVD/CD"

[11] S. Weerasooriya, "Discrete-Time LQG/LTR Design and Modeling of a Disk Drive Actuator Tracking Servo System," IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 42, No. 3, pp 240-247, June, 1995

[12] J.-Y. Yen, K. Hallamasek, R. Horowitz, "Track-following controller design of a compound disk drive actuator," J. of DSMC, vol. 112, pp. 391-402, Sept., 1990

[13] M. N. Lee, J. H. Moon, K. B. Jin, M. J. Chung, "Robust H_∞ Control with Multiple Constraints for the Track-Following System of an Optical Disk Drive," IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol 45, no 4, August, 1998

[14] K. Ohnishi, "A new servo method in mechatronics," T.IEE Jpn., vol.107-D, pp 83-86, 1987

[15] Manfred Morari, Evangelos Zafiriou, "Robust Process Control," Reading, Prentice-Hall, 1989

[16] 최현택, 서일홍, "비선형 요소를 갖는 정전 마이크로 구동기의 외란 관측기에 기초한 디지털 추종 제어기 설계," 대한 전기 학회 논문집 제 48권 6호, 1999년 6월

[17] 최현택, 서일홍, "강인 내부 보상을 이용한 새로운 강인 제어기 설계," 대한 전기 학회 논문집, 게재 예정

[18] T. Katayama, M. Ogawa, M. Nagasawa, "High-Precision Tracking Control System for Optical Disc Players Employing Adaptive Repetitive Compensator with Long-term Memory," T.IEE Japan, vol. 116-C, no. 5, 1996

[19] J. H. Moon, M. N. Lee, M. J. Chung, "Repetitive Control for the Track-Following Servo System of an Optical Disk Drive," IEEE Trans. on Control System Technology, vol 6, no. 5, Sept., 1998

[20] M. Steinbuch, G. Schootstra, H. T. Goh, "Closed-Loop Scaling in Fixed-Point Digital Control," IEEE Trans. on Control System Technology, vol 2, no. 4, December, 1994