

정보저장기기에서의 제어 이론의 응용

양현석

연세대학교 기계공학부, 정보저장기기연구센터(CISD)

1. 서론

현재 하드 디스크 드라이브(HDD)와 광 디스크 드라이브(ODD)로 대별되는 정보저장기는 정보사회를 살고 있는 우리의 일상 생활에서 빼놓을 수 없는 기기가 되었으며, 산업면에서 볼 때도 ODD는 국내 양대 전자업체가 전세계 시장의 40% 이상을 점유하고 있고 HDD는 국내 한 전자업체가 세계 시장점유율에서 상위를 차지하고 있는 중요 상품 중의 하나이다. 기술적으로 볼 때, 정보저장기는 데이터의 입/출력을 위한 초정밀 위치제어 문제가 드라이브 작동의 핵심기술 중의 하나이다. 본 논문에서는 HDD와 ODD에 이용이 되고 있는 다양한 제어 이론에 대하여 살펴본다.

2. 하드 디스크 드라이브와 광 디스크 드라이브의 비교

정보저장기의 여러 종류에서 자기와 광을 이용한 대표적인 하드 디스크 드라이브와 광 디스크 드라이브의 세부적인 소개에 앞서 간단히 이들의 특징을 비교 분석하는 것은 흥미 있는 일일 것이다[0]. 이들의 특징을 표 1을 통해 간략히 제시하였으며, 가장 두드러진 특징은 하나는 자기를 다른 하나는 광을 이용하여 정보저장을 한다는 특징일 것이다. 그리고 하드는 인터페이스 부에 표준화를 그리고 광디스크는 미디어 및 인터페이스 모두의 표준화를 만족 시켜야 한다는 점을 찾을 수 있다.

이 외에 하드 디스크의 경우 슬라이더가 디스크 표면을 공기 베어링 효과에 의하여 부상하므로 포커스 제어가 필요 없으며, 디스크가 고정된다는 특징을 들 수 있다. 이에 반하여 광 디스크는 디스크 교체에 따른 외란 특성이 많이 변동되고 다수의 재생/기록 재생 속도가 존재하며, 모터의 회전 속도 제어계가 하드 디스크 보다 복잡한 면을 보인다.

시스템의 올바른 제어계를 설계하기 위해서는 반드시 대상계의 동특성 및 외란 특성 그리고 작동 환경 등에 대한 고려가 필요하며, 이에 따라 적용되는 이론 및 구현시 고려 사항이 달라지게 될 것이다. 예를 들어 랜덤 액세스를 위하여 하드 디스크는 스윙 암의 형태를 그리고 광 디스크 드라이브는 슬레드 모터와 VCM(voice coil motor) 2단 액츄에이터 구조를 가진다. 전자는 회전에 의한 운동을 그리고

후자는 디스크의 반경 방향으로 직선 운동을 하게 되며, 이 때 발생하는 외란 특징들도 상이한 점을 가지게 된다.

따라서 본 논문에서는 하드 디스크 드라이브와 광 디스크 드라이브를 구분하여 각각의 동특성에 대한 간략한 소개와 더불어 적용되는 다양한 제어 이론에 대한 소개로 구성하였다. 먼저 Part I에서 하드 디스크 드라이브를 다음의 Part. II에서 광 디스크 드라이브에 대하여 다루었다.

표 1. 하드 디스크와 광 디스크의 비교

	Hard Disk Drive Control	Optical Disk Drive Control
Media mechanics:	Multiple fixed disks	Single removable disk
Drive mechanics:	Excellent	Mediocre
Position Error Signals:	Mediocre SNR Multiplexed with data	Excellent SNR Continuously available
Sample Rate:	Low/Medium	High
Vertical Position:	Air bearings: • near field • no focus loop • multiple small heads	No air bearing: • far field • focus loop • single large head
Tracking Loop:	Single medium-high frequency	Coarse (low freq.) and fine (high freq.)
Spindle loop:	low frequency	low frequency
Spindle mode:	Constant Angular Velocity (CAV)	Constant Linear Velocity (CLV) and CAV
Tracks:	circular	predominantly spiral, some circular
Applications:	Mostly random access	Mostly streaming files

• Part I. 하드 디스크 드라이브

멀티 미디어로 대표되는 현대의 정보화 사회에서 정보의 수요 및 공급은 기하급수적으로 증가하고 있고, 이에 발맞추어 정보저장기의 저장밀도 또한 꾸준히 증가하고 있다. 자기 기록의 대표적 기기인 HDD의 경우, 90년대 초반 이후 기록밀도의 증가율이 60% CGR(Compound Growth Rate)을 꾸준히 유지하여 왔으며, 90년대 후반부터는 100% CGR을 기록하고 있다. 이는 1년에 2배의 기록밀도로 증가되는 정도를 나타낸다. 기록밀도는 현재 약 100kTPI에 도달하여 있으며, 현재의 추세라면 앞으로 1년 이내에 200kTPI의 기록밀도를 갖는 드라이브가 선보일 것으로 예상된다. 이러한 기록 밀도의 증가는 더욱 감소된 TMR을 요구하고 있으며, 이를 위해 특히, 서보의 중요성이 부각되고 있다.

본 절에서는 정보저장기에서의 제어이론을 HDD에 대해 살펴보자 한다.

• 하드 디스크 드라이브의 제어 이론 : HDD서보의 역할은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 쓰여진 트랙을 최소 편차로 추종하기 위한 tracking이고, 다른 하나는 트랙간의 이동을 최단시간에 하기 위한 seeking이다. 전자의 제어

기능은 최소편차(minimum variance)제어이론을 기본으로, 후자의 제어기는 최소시간(minimum time)제어이론을 바탕으로 설계된다.

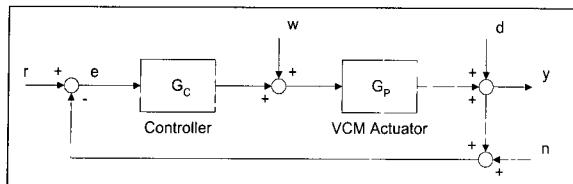


그림 1. HDD서보 제어계 블록선도

그림 1에 HDD서보 루프를 나타내었다. HDD에 작용하는 외란은 그림에서와 같이 크게 세 가지로 구분할 수 있으며, 각각은 입력 외란(w), 출력 외란(d), 측정 노이즈(n)를 나타낸다. 입력 외란에는 퍼봇 베어링 마찰, 플렉스 케이블 편향력 등이 있으며, 출력 외란에는 스팬들 불균형, servo track writer 오차, 디스크 진동등이 포함된다. 측정 노이즈에는 ADC 양자화 오차, 자기 미디어 노이즈등이 있다.

서보계의 설계에 있어서 이러한 외란을 분석하는 것이 중요하며, 이들 요소가 PES에 미치는 영향을 파악하고 이를 고려하여 제어기를 설계하여야 한다. 다음에서 각 경우의 제어 이론을 살펴본다.

- Track following :** 앞서 언급한 바와 같이 tracking 제어는 최소편차이론을 바탕으로 설계된다. 즉, 데이터가 기록되어 있는 트랙의 중심선에 헤드를 정확히 위치시키는 것이 이 제어의 목표가 된다. 이러한 성능을 판단하기 위한 지표로 TMR(Track MisRegistration)을 사용한다. TMR은 헤드가 실제 데이터 트랙에서 벗어난 정도를 확률적 수치로 나타낸 것으로서, 일반적으로 WRTMR(write to read TMR)과 WWTMR(write to write TMR)의 두 가지 지표가 활용된다. WRTMR은 기록된 트랙의 정보를 신뢰성 있게 읽을 수 있는 정도를 나타내는 것으로, read bit의 오차율을 확률적으로 표현한 것이다. WWTMR은 기록된 인접 트랙 사이의 mis-registration을 나타내는 것으로, 트랙 간의 간섭이 일어날 수 있는 정도를 의미한다. 하지만, 이러한 TMR은 read/write engineer 관점의 TMR로 실제 서보의 관점에서는 위에서 언급한 TMR의 개념과는 달리 on-track TMR과 post-seek TMR의 개념을 사용한다.

통상적으로 tracking 제어에는 PID제어기를 이용한 설계 방법과, 상태공간을 이용한 설계방법이 사용된다. 전자의 경우 제어계의 설계 및 적용이 비교적 쉽지만, seeking으로의 mode switching 설계가 까다로운 단점이 있다. 후자의 경우 mode switching이 용이하지만, estimator등의 계산에 비교적 많은 시간이 필요하고, 정확한 모델이 필요한 단점이 있다.

이러한 제어기의 설계에 있어서 가장 중요한 점은 가장

적절한 게인을 찾는 데에 있다. 수 년 전만 하여도 tracking 제어기의 게인은 contaminated PES의 variance를 최소화하는 방법에 근거하여 정해졌다. 하지만, contaminated PES는 true PES보다 크게 나오는 경향이 있기 때문에, 이러한 방법은 적절한 대역보다 더 높은 대역을 산출하게 되며, TMR의 향상을 보장하지 못한다 [1]. 이러한 문제를 해결하기 위해, 외란을 분석하고 이를 통해 true PES를 예측하는 방안이 제시되었다 [2], [3]. 또한, 최근에는 분석된 외란을 이용하여 서보계의 성능을 예측하는 방법에 기반하여, 제어기의 게인을 최적화하는 방법에 대한 연구도 발표되었다 [4], [5]. 이 최적화 방법을 간단히 소개하면 다음과 같다.

$$S_{PES} = |S|^2 (S_{Pw} + S_d + S_n) \quad (1)$$

여기서, S 는 감도전달함수, S_x 는 x 에 해당하는 PSD를 의미한다. 그림 1.에서 각 입력과 PES사이의 전달함수를 구하면 (1)식을 얻을 수 있고, 이 식을 통해 PES의 PSD는 각 외란의 PSD와 감도전달함수가 있으면 계산이 가능함을 알 수 있다. 여기에 Parseval's theorem을 이용하면, PSD 결과를 통해 표준편차를 다음과 같이 예측할 수 있다.

$$E(S_x(f)) = \sigma^2 \quad (2)$$

이러한 관계를 이용하여, true PES에 대한 성능지수를 선택하고, 이를 제어기 설계 제한조건(GM, PM, bandwidth 등)하에서 최소화 되도록 최적화를 수행하면 true PES를 on-track TMR 관점에서 최소화하는 최적의 게인을 구할 수 있게 된다.

이상에서 언급한 PID및 상태공간제어기 이 외에도 고차 제어기, phase stable 설계, loop shaping 설계등의 여러 제어 방법들이 제시되었다 [6], [7]. 특히, [6]에서는 대역폭을 높이기 위한 방법으로 phase stabilized 보상 방법을 제시하였다. 이 방법은 second phase margin 과 시스템 응답성능의 관계를 파악하여, 필터설계 시 이를 고려하는 것으로, 이를 통해 고 대역을 확보하는 데에 활용하였다.

- Seeking :** 이 제어의 목적은 원하는 트랙을 가능한 한 빠른 시간 내에 찾아가는 데 있다. 이 때 부가적으로 acoustic noise를 적절히 유지하는 것도 제어기 설계에 고려된다. 이상적인 시간최적제어는 bang-bang control로, 외란이 없고 모델 불확실성이 없는 경우에 적용이 가능하다. 하지만, 실제로 구동기 동역학이 간단히 2차 단순질량모델이 아니며, 그림 2에서와 같이 입력 전류의 profile이 급격히 변화하는 부분은 서스펜션의 공진모드를 가진할 우려가 있다. 또한, 이러한 급격한 변화는 acoustic noise문제를 야기할 수 있으며, 외란 및 실제 동역학의 변동, 비선형성 등으로 이를 실제적으로 적용하는 데에는 무리가 있다.

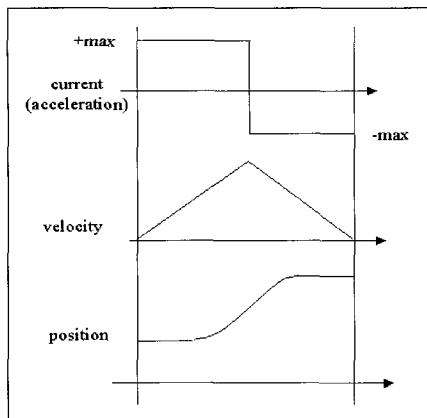


그림 2. Ideal bang-bang seek

따라서, 실제적으로는 PTOS(Proximate Time Optimal Seek)를 사용한다. 그림 3에서와 같이 PTOS는 크게 세 단계로 구분된다. seek mode에서는 공진모드 가진과 acoustic noise를 최소화하기 위한 smooth current profile을 사용하며, settling mode에서는 torque bias 및 제어기switching에 따른 초기값 보상 등을 다루게 된다. 끝으로 following mode에서는 seeking 이 완료된 후 tracking으로 제어가 바뀌게 된다. 이러한 제어기의 switching과정에서 seeking 과 tracking 사이에 switching을 위한 settling 제어기가 부가적으로 설계되며, 이를 통해 post-seek TMR을 개선하게 된다. Seek mode에서의 coast 구간은 gray code 식별 및 crash stop 충격사양등에 의해 결정된다.

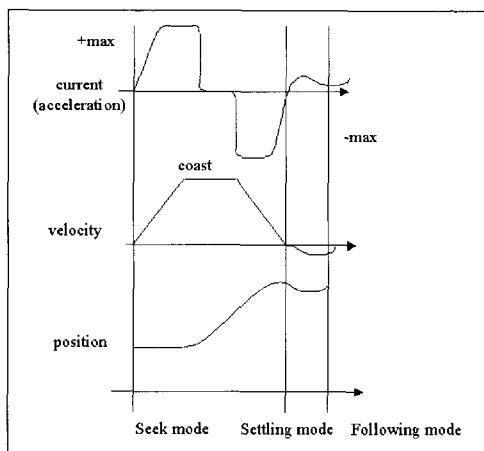


그림 3. Proximate time optimal seek

언급한 바와 같이 seek mode에서 중요한 인자는 적절한 가속도 profile을 결정하는 것이다. 최근의 연구에서는 특히, acoustic noise 저감을 위한 profile을 생성하는 방법들이 제시되었다 [8], [9].

이상에서 HDD의 tracking 및 seeking 제어에 사용되는 기본적인 제어방법에 대해 살펴보았다. 다음에서는

이러한 제어기 외에 부가적으로 사용되는 제어 기법들을 간단히 소개한다.

- RRO보상기 : HDD에 작용하는 외란은 그 발생원인에 따라 w, d, n으로 구분할 수도 있으나, 외란의 반복성에 따라 RRO(Repeatable Run-Out)와 NRRO (Non-Repeatable Run-Out)로 구분할 수 있다. HDD는 디스크가 일정한 속도로 회전하는 계이기 때문에 반복적인 오차가 발생하게 된다. 즉, 오차의 스펙트럼을 살펴보면 디스크 회전 주파수의 정수배에 해당하는 peak를 발견할 수 있는데, 이것이 RRO에 의한 영향이다. 이러한 반복적인 오차의 원인으로는 STW에 의해 기록된 track의 불완전성 및 spindle의 주기적 진동 등을 들 수 있다. 이를 보상하기 위한 방법으로 반복제어, 학습제어 등이 제안되었다 [10], [11].

실제적으로 반복제어는 학습제어의 일종이라고 할 수 있다. 반복제어의 기본적인 개념은 내부모델원리(internal model principle)에 기초한 것으로, 수년간 여러 구조의 반복제어기가 제안되었으나, 일반적인 모델은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

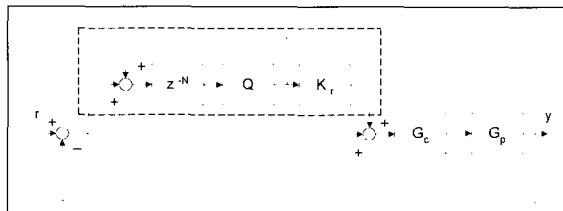


그림 4. Repetitive control block diagram

여기서, N은 반복신호의 주기, Q는 안정성을 위한 low-pass filter, Kr은 반복제어기의 게인이다. 그림 4에서 점선내의 부분이 반복제어기에 해당한다.

- 멀티레이트 제어 : 현재 사용되는 HDD의 위치 센싱 방법은 embedded sector servo이다. 즉, 디스크 상에 일정간격마다 헤드의 위치를 나타내는 패턴이 기록되어 있어서. 이 신호를 이용하여 현재 헤드의 위치를 파악하게 된다. 이러한 신호가 기록된 영역을 servo sector라고 부른다. 제어의 입장에서는 이 영역이 많을수록 해당구간에 대한 샘플링 숫자가 많아지므로 대역폭을 높이고 성능을 향상시키기에 유리하지만, 기록 용량 측면에서는 실제 사용자가 사용할 데이터 기록 영역이 줄어드는 것이기 때문에 이 영역을 임의로 늘리는 데에는 한계가 있다. 최근 생산되는 desktop용 3.5" HDD는 대략 200개 정도의 servo sector를 가지고 있고, 이는 7200rpm을 기준으로, 약 0.04 msec의 샘플링 주기에 해당한다.

이와 같은 HDD의 하드웨어적 제약을 극복하기 위해 제시된 방안이 멀티레이트 제어방법이다. 멀티레이트 제어의

기본 원리는 센싱의 샘플링 주기와는 독립적으로 제어기의 샘플링 주기를 빠르게 하는 것이다. 즉, 기존의 샘플링 부분에서 받아들인 위치정보를 이용하여, 센싱 샘플링 사이의 시점에 대한 위치정보를 상태추정기로 추정한 후, 이를 이용해 제어입력을 계산함으로써 실제 샘플링 사이의 순간에도 제어입력을 내보내는 것이다. 물론 이러한 접근방법이 기존의 샘플링 주기 및 시스템 동역학 그리고 마이크로 프로세서의 계산시간 등의 제한을 받기는 하나, 이를 통해 제어기의 출력신호를 부드럽게 하고, 계의 개인여유 및 위상여유를 높이며, 성능향상에 기여하는 것으로 알려져 있다.

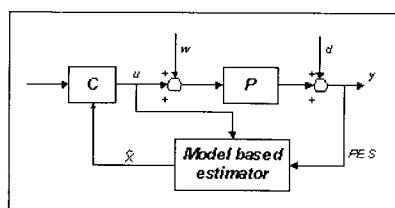


그림 5-1. Multi-rate control(PES sampling instant)

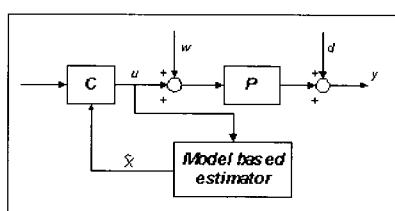


그림 5-2. Multi-rate control(multi-rate sampling instant)

• **가속도계 이용** : 부가적인 센서를 이용한 서보계의 성능 개선방안에 대해서도 많은 연구가 있었다 [12], [13]. 주로 가속도계를 사용하였으며, 진동, 충격등의 외부 외란에 대해 가속도 신호를 이용한 피드포워드를 통해 시스템의 견실한 성능을 유지하는데 활용하였다. [13]에서는 캐리지 암에 가속도계를 붙이고, 이를 통해 얻은 가속도와 실제 VCM에 가해주는 전류사이의 차이를 피봇저항으로 간주하여 Kalman filter를 이용한 외란 판측기를 통해 이를 저감하기는 데에 가속도계를 활용하였다.

• **이중 구동기 제어** : HDD의 대역폭을 높이는 데에는 구동기의 기계적 공진 모드가 가장 큰 제한 요소이다. 이를 극복하기 위한 대안으로 이중 구동기 구조가 제안되어, 많은 연구가 진행되었다 [14], [15].

이중 구동기를 제어하기 위한 대표적인 설계방법으로 master-slave, decoupled master-slave, parallel loop, dual feedback, PQ method 등이 제안되었으며, 최근 [15]에서는 PZT를 통해 서스펜션을 구동하는 이중 구동기의 제어에서, PZT 자체를 센서로 활용하여 VCM의 butterfly mode와 서스펜션의 sway mode를 제어하는 데에 효과적으로 사용하였다.

• Part II. 광 디스크 드라이브

여러 정보저장기기 중에서 특히 광 디스크 드라이브는 호환성과 배포의 용이성 그리고 저렴한 미디어의 가격 등에 있어 다른 저장기기와의 차별화 된 특징으로 각광 받으며 널리 사용되어 왔다.

본 절에서는 제어의 관점에서 기존의 상용 광 디스크 드라이브에 적용되는 여러 가지 제어 이론을 살펴보고, 차세대 광 디스크 드라이브와 관련된 제어 기술에 대하여 간략히 정리하였다. 이를 위하여 먼저 광 디스크 드라이브의 작동 원리 및 외란 특징을 간단히 분석하였고, 상용의 제어기 구조 및 특징을 살펴 보았으며 이와 관련된 여러 제어 이론들에 대한 소개를 행하였다.

• **광 디스크의 작동 원리 및 외란 특성** : 광 디스크 드라이브는 HDD와 더불어 대표적인 정보장치이지만 작동 원리 및 플랜트의 특징 그리고 외란 특징에 있어 많은 차이를 가지고 있다. HDD와 달리 광 디스크의 경우 호환성을 목적으로 설계되었기 때문에 미디어가 지속적으로 교체되며, 작동 속도가 고정된 HDD와는 대조적으로 외란량 및 기록 특성 등에 의하여 작동 속도가 변하는 가변 구조를 가지고 있다. 또한 광 디스크 미디어에 대한 국제 규격을 통하여 미디어가 지녀야 할 기계적/광학적 특징 이외에 변조 코드 및 여러 가지 제어 코드를 정의하기 때문에, 올바른 시스템 해석을 위해서는 이러한 사항들에 대한 이해가 있어야 한다.

그림 6은 광 디스크 드라이브의 개략도를 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 렌즈에 의하여 집광 되는 빔은 빛의 회절 한계에 의하여 하나의 정점으로 모이지 않고 어느 정도의 유한한 크기를 가지며, 이는 레이저 다이오드의 파장 λ 와 렌즈의 개구율(numerical aperture) NA 에 의하여 정해진다. 이 값들에 의하여 빔의 직경 (beam waist)과 초점 심도 (height)가 정해지며, 제어계를 통하여 퍼트나 워블 구조를 초점 심도와 빔의 직경 내에 존재시켜야 한다. 전자의 역할을 행하는 제어계를 포커스 서보라 하고, 후자의 역할을 하는 제어계를 트래킹 서보라 한다. 이와는 별도로 랜덤 액세스를 행하기 위한 서보로 탐색(seek) 서보가 있으며, 통상적으로 이 서보계는 슬래드 모터로 구동되는 조동 (coarse) 액츄에이터와 광피업의 VCM(voice coil motor)으로 움직이는 미동(fine) 액츄에이터 구성되어 2단 구조를 가지게 된다.

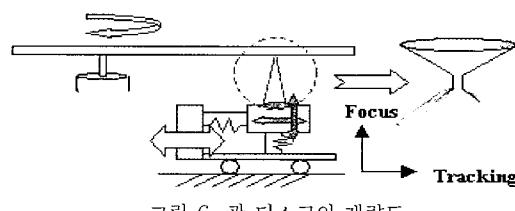


그림 6. 광 디스크의 개략도

광 디스크 드라이브의 경우 호환성을 목적으로 설계 되었기 때문에, 일반적인 제어 시스템과는 달리 디스크 교체에 따른 외란 특성의 변동이 심한 특징이 있다. 따라서 올바른 제어계 설계를 위해서는 플랜트의 불확실성 뿐만 아니라 디스크로부터 발생하는 외란의 정확한 이해가 선행되어야 한다[1]. 광 디스크가 회전을 하게 되면 디스크 자체의 변형이나 진동에 의하여 발생하는 외란 성분 뿐만 아니라 스픈들 모터 및 외부에서 가진 되는 진동, 디스크에 의하여 편심에 의하여 발생하는 정현파 외란 등이 발생 한다. 그리고 엄밀한 의미에서 진동은 아니지만 기록 정보면의 정보면의 높이 변화, 트랙의 흔들림, 디스크 로딩시 기울어짐, 광학적인 변화에 의하여 여러가지 복합적인 외란들이 발생하게 된다. 언급된 외란들은 제어계를 통하여 효율적으로 제거되어 하며, DVD-ROM의 경우 표준 서보를 이용하였을 때 포커스 방향으로 $0.23\mu\text{m}$, 트래킹 방향으로 $0.022\mu\text{m}$ 이하의 잔존 에러가 존재하도록 DVD-ROM 미디어를 만들 것을 요구하고 있다[2].

• **광 디스크의 상용 제어기 :** 광 디스크 드라이브의 제어기 설계의 목적은 기본적으로 디스크가 다양한 외란 성분이 발생하더라도, 항상 디스크의 기록 및 재생하고자 하는 부분에 빔을 조사하여 올바른 정보를 읽어내거나 기록하는데 있다. 이러한 역할을 올바르게 수행하기 위해서는 앞 절에서 언급한 포커스/트래킹 서보 이외에 스픈들 모터의 제어, PLL (phase locked loop), 빔 출력의 AGC(automatic gain control) 등 여러 가지가 있지만 본 논문에서는 포커스와 트래킹 서보계에 초점을 맞추고 탐색 제어에 대해서는 간략히 언급하기로 한다.

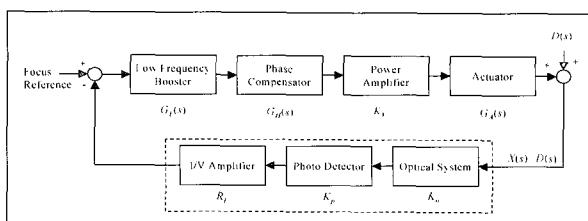


그림 7. 광 디스크 제어계의 서보 블록선도

상단의 그림은 광디스크 서보계 중 포커스 방향의 전형적인 제어기 구조를 보여준다. 빔의 초점 심도가 디스크와 일정 거리가 유지되도록 포커스 끌어들임(focus capture) 과정을 수행 후, 디스크의 면진동 및 기타 요소에 의하여 발생하는 외란 $D(s)$ 에 의해 빔 스폷이 정초점에서 벗어나게 되면, 그 변화량이 포토 다이오드 및 I/V 앤프 회로에 의해 전압 오차 신호로 피드백 된다. 이렇게 피드백된 신호는 저주파수 부스터와 위상 보상기에 의해 제어 신호로 변환되고, 파워 앤프를 통해 구동기를 구동하여 외란을 추종하게 된다. 여기서 발생하는 외란 성분 $D(s)$ 는 회전 배속 및

디스크의 물리적 상태에 따라 달라지며, 그 외에 디스크의 클램핑 조건이나 로딩 상태등에도 영향을 받게 된다.

따라서 회전 rpm이 일정하고 디스크가 고정된 HDD에서 발생하는 어느 정도 정규성을 띠는 외란과는 달리, 광 디스크는 회전 배속이 가변성과 디스크 교체에 따른 디스크 물리적 특징 변화에 의하여 외란 성분의 변동이 심한 특징을 보인다. 이러한 구동 메커니즘의 특징에 의하여 광 디스크 드라이브에서의 외란 추정 알고리즘 및 회전 배속에 따른 복수의 제어기 루프 설계는 필수적이다. 또 다른 특징으로는 미디어 종류에 따라 반사율이 달라지므로, 같은 물리적인 외란 량에 대하여 측정되는 에러 신호의 크기가 영향을 받아 시스템 루프가 변동된다는 특징이 있다. 이를 위한 해결 방법으로 에러 신호를 정규화(normalizing)하거나, 적응제어의 일종으로 볼 수 있는 특정의 주파수 성분의 외란을 입력하고 측정되는 위상을 입력과 비교하여 개인을 조정하는 루프 개인 조정 방법 등이 적용되고 있다[3].

상용의 광 디스크 드라이브에 사용되는 제어기는 PID나 지상-진상 제어계(lead-lag)를 사용하는 것이 일반적이며, 이를 이용한 전형적인 광 디스크 드라이브의 개루프 형상이 그림 8에 제시 되었다. 질량-감쇠-강성(m-c-k)으로 구성된 플랜트(광 피업)를 제어기를 통하여 외란을 억압하기 위한 제어계를 구성하는 경우, 플랜트의 특징이 반영되어 나타나므로 s^2 시스템의 특성을 보인다. 즉 광 피업의 공진점을 지난 후 위상이 180° 로 떨어지게 되는데, 실제 계에서는 광 피업 와이어의 서스펜션 지지부의 감쇠 물질에서 발생하는 추가적인 위상 지연 요소 등에 의하여 더 떨어지게 된다. 이와 더불어 저역 개인을 올리기 위하여 저역 부스터, 즉 지상 제어기를 부가하므로 개인 교차 주파수 이전에 위상이 180° 이하로 떨어졌다가 지상 제어기에 의하여 위상이 다시 올라가는 개인의 조건에 따라 안정성이 결정되는 조건부 안정 시스템 특성을 보인다.

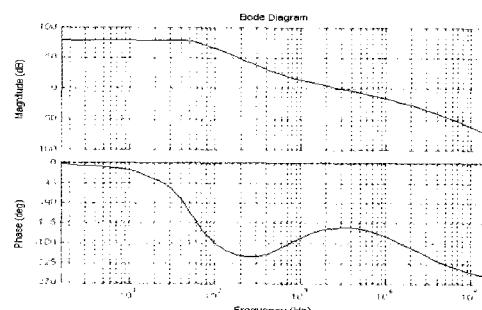


그림 8. 광 디스크 드라이브의 개루프 형상(DVD-ROM)

언급된 특징 이외에 실제 상용 드라이브의 경우, 제어기는 feint-end chip 내부로 모듈화 되어 RF 및 여러 기능과 함께 내장되어 있는 경우가 많다. 이러한 경우, 제어기 구조가 이미 정해져 있어 제어기의 각 계수 값만을 변화시킬 수 있으므로 설계 자유도가 크지 않다. 또한 상용

광디스크 드라이브는 제품의 단가를 낮추기 위하여 고정소수 점 연산을 하게 되는데, 이 경우 제어기 계수의 mapping이 정확히 되지 않을 수 있으므로 보다 세심한 주의를 요한다.

탐색 서보의 경우 조동 액츄에이터를 통하여 주파수 대역이 낮지만 변위가 큰 외란량을, 그리고 조동 액츄에이터를 통하여 가동 범위가 작지만 외란 주파수 대역이 높은 외란을 담당하게 된다. 실제 시스템에서는 목표 트랙으로 액세스하기 위하여 거리에 따른 다양한 속도 프로파일을 loop-up 테이블 형태로 만들고 이를 수행하게 되는데, 이 때 조동 액츄에이터와 미동 액츄에이터의 상호 간섭 및 최종 목표 지점에서 트랙 끌어들임(track capture) 이 탐색 서보계를 설계하는데 어려움으로 지적되고 있다[4].

- 광 디스크를 위한 제어 알고리즘: 상용의 광 디스크 드라이브는 고전적인 제어기법으로 설계된 PID제어기나 진상-지상(lead-lag) 제어기의 사용이 주류를 이루고 있다[5]. 이 외에도 광디스크 드라이브의 강건성 확보를 위하여 여러 가지 고등 제어 기법들이 제안되고 있지만, 제안된 알고리즘을 이용해 설계된 제어기 구조를 실 시스템에 그대로 적용하는 접근 방법에는 무리가 있다. 그 이유는 다른 일반적인 제어 시스템과 달리 광 디스크 드라이브의 경우 디스크 착탈 및 작동 속도 등에 따라 외란의 크기 및 변동이 심하여 외란 특성을 규정하기가 어렵고, 또한 제어기 구조가 chip 시스템 메이커에 의하여 제어기의 구조나 차수가 제한적이기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 이 사항을 고려하여 (1)기존 제어기 또는 기존 제어기에 부가적인 루프를 형성하는 경우와 (2)강건성 확보를 위한 새로운 구조를 요하는 경우 두 가지로 분류하여 보다 상세히 살펴보기로 한다.

(A) 기존 제어기 구조를 이용하는 경우

광 디스크의 상용 제어기를 분석하여 보면, 대부분 지상-진상(lead-lag) 제어기를 가지며 제어기의 차수는 시스템에 따라 다르지만 5차 정도를 가지는 것이 일반적이다. 제어기의 구조 또한 chip 시스템 메이커에 따라 다르지만 직렬(serial) 구조 또는 멀티레이트 샘플링을 이용하는 병렬(parallel) 구조를 가진다. 이러한 제어기 구조를 그대로 활용하기 위해서는 각 제어 환경의 목적에 맞도록 적절한 극점과 영점(pole and zero)를 선택하는 것이 중요하다. 적절한 루프의 선택과 더불어 중요한 다른 하나의 요소는 시스템의 불확실성(uncertainty)에 대한 강건성 확보에 있다. 단일 입출력(SISO) 시스템의 경우 계인/위상 여유(gain/phase margin)로 어느 정도의 강건성을 확보할 수 있으나 고전적인 제어기 설계 방법으로는 이를 적절히 보장해 줄 수 없다는 단점을 지닌다.

이에 대한 해결 방법의 하나의 효율적인 접근 방법으로 QFT(quantitative feedback theory)를 들 수 있는데, 강건 안정성의 및 강건 성능의 확보를 위한 사양을 Nichols 차트

위에 루프의 합으로 표현하고 이를 도식적으로 시스템의 개루프의 형상 설계를 행하는 방법이다[6]. 이 방법의 적용은 여러 가지가 있겠지만, 기존 제어기 구조를 그대로 가지고 도식적으로 극점과 영점을 움직이면서 강건안정성이 확보되도록 제어기를 설계할 수 있으므로 기존 제어기를 유지한 채 실제 시스템에 적용하는 데에는 가장 좋은 방법이라 판단된다.

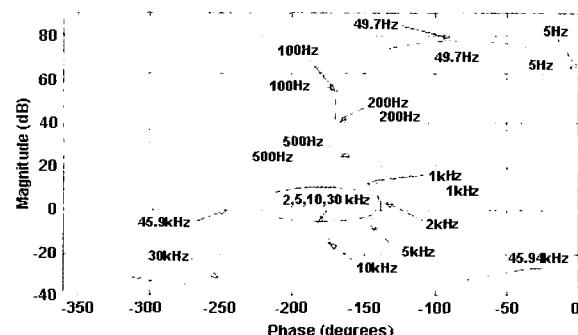


그림 9. QFT를 이용한 제어기 설계

또 다른 접근법으로는 기존 제어기 구조에 부가적인 루프를 형성하는 방법으로 Ohnishi에 의하여 제안된 DOB(disturbance observer)와 반복제어/학습 제어 알고리즘을 들 수 있다. DOB의 경우, 공칭 모델과 실제 플랜트의 차이를 외란으로 등가화하고 이를 이용하여 기존의 외란과 더불어 제어를 수행하게 되므로 매우 효율적인 제어기 설계 방법으로 실제 Sanyo사의 AS-MO(advanced storage magneto optical)의 일종인 iD disk에 적용되었다[7]. 반복 제어/학습 제어 알고리즘의 적용을 위해서는, 제어 시스템에 적용하는 외란의 특징이 어느 정도의 반복 경향성을 보여야 한다는 전제 조건이 필요하다. 기존의 광디스크 드라이브 시스템의 경우, 단순 재생계 탑재에서 고속화로 진전됨에 따라 회전 속도가 변하는 CLV(constant linear velocity)에서 회전 속도가 일정한 CAV(constant angular velocity)로 변하고 근래의 기록형 광디스크 역시 write strategy의 진전에 따라 full CAV기록이 가능해짐에 따라 실제 상용 시스템의 적용 가능성성이 어느 때보다 높아졌다[8,9].

(B) 강건성 확보를 위한 제어 알고리즘

강건성을 확보하기 위한 제어기 설계 방법으로 여러 가지 이론들이 제시되어 왔으며 대표적으로, H_{∞} , μ -분석 및 설계 방법 등을 들 수 있다. 이들의 제어 이론을 이용하는 경우, 시스템의 강건성은 및 안정성을 확보할 수 있는 장점이 있으나 제어기 구조를 미리 선택할 수 없다는 단점을 지닌다. 따라서 이러한 접근 방법을 취하는 경우는 설계된 제어기를 시스템의 구조에 맞게 모델 축소(model reduction)의 방법이 필요하나, 이 경우 당초 설계된 제어기에 비하여 성능이나 안정성의 희생은 불가피하다.

H_∞ 의 제어기 설계는 일반화 플랜트를 구성하고 이를 애러 입력과 출력 사이의 H_∞ 놈(norm)을 최소화 하는 방법을 이용하여, 강건 안정성을 성능을 확보한다. 그러나 가장 일반적인 H_∞ 제어기 설계 방법의 하나인 혼합 감도(mixed sensitivity) 접근법의 경우, 감도 함수 및 최대허용 모델링 오차의 가중치의 설정이 어렵고 얻어지는 제어기 차수가 일반적으로 높으며 감쇠비가 낮은 경우 극점과 영점의 상쇄되는 현상을 보이는 것으로 알려져 있다[10]. 이 외에 시간 도메인의 사양을 폐루프의 주극점(dominant pole)의 제한 조건 등 여러가지 제약 조건을 부가하여 접근하는 LMI (Linear matrix inequality)를 이용하여 H_∞ 를 설계하는 방법 등이 제안 되었다[11]. 언급된 일반적 H_∞ 의 제어기의 극점과 영점의 상쇄되는 현상 및 γ -iteration과 같은 복잡한 계산 과정을 극복하기 위한 방법으로 H_∞ -루프 형상 설계 (H_∞ -loop shaping)을 들 수 있다. 이 방법은 McFarlane과 Glover에 의하여 제안된 방법으로 플랜트의 불확실성을 coprime factorization으로 표현하고 원하는 개루프 형상을 설계한 후, 강건 안정성 보상을 위하여 H_∞ 제어기 설계를 거치는 방법이다[12]. 또 다른 접근 방법으로는 구조화된 특이치(structured singular value)를 이용하여 μ -분석 및 설계를 이용하는 방법으로 이 방법으로 설계된 제어기는 강건성과 성능을 보장한다[13]. 다른 접근 방법으로 비선형 제어의 일종인 슬라이딩 제어 및 퍼지제어 등 매우 다양한 접근 방법들이 광디스크 드라이브 적용을 위하여 제안되어 왔으나 지면 관계로 생략하기로 한다[14, 15].

• 차세대 광디스크 드라이브의 제어기 : 차세대 광디스크 드라이브의 경우, 보다 정확한 정밀도를 요하게 되므로 현 시점의 제어기보다 추종 능력이 우수한 제어기 설계 되어야 한다. 이와 더불어 중요하게 고려되어야 할 사항은 디스크 틸트에 고려이다. 현재 상용의 광디스크 드라이브의 경우 포커스와 트래킹 방향의 연성 문제가 적고 디스크 기울어짐(tilt)에 대한 영향이 상대적으로 미미했기 때문에, 각 제어기 루프의 연성 문제 및 틸트 문제에 대한 연구에 대한 관심이 적었다. 그러나 고밀도화가 진행됨에 따라 앞으로 출시될 차세대 광 디스크의 경우, 범스포의 크기가 더욱 더 작아짐에 따라 디스크의 기울어짐에 따라 발생하는 광학적인 수차에 급격히 커져 틸트 마진을 줄이게 된다. 이와 더불어 그동안 등한시 하였던 포커스와 트래킹 방향의 연성 문제도 더 이상 묵과할 수 없게 된다. 이러한 이유로 틸트 보상 및 포커스/트래킹 제어기의 연성 문제를 해결 및 이를 이용하는 방법이 차세대 광디스크 드라이브의 제어 문제에서 주요 관심사가 될 것으로 전망되고 있다[16].

틸트의 유형은 데이터의 재생 및 기록 방향의 tangential 틸트와 디스크의 중심 방향의 radial 방향으로 분리할 수 있는데, 특히 radial 틸트를 행하는 경우 이 거동에 따라 트래킹 방향에 보다 민감한 영향을 미치게 된다[16, 17].

따라서 이에 적절한 보상 방법이 강구되어야 한다. 이를 위하여 포커스 및 트래킹의 상관 관계에 대한 수학적/동적인 해석과 더불어 기존의 제어기 구조와는 재설계가 필수적이다.

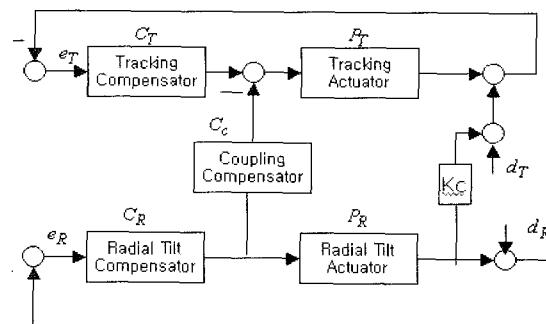


그림 10. 틸트 보상을 위한 블록도

3. 결론

정보저장기기에서는 기록 미디어 기술, 기록을 읽고 쓰는 자기헤드 또는 광피업 기술이 핵심 기술이나, 기기가 시스템으로서 작동하기 위해서는 초정밀 위치제어기술이 필수요소 기술이라 할 수 있다. 기록의 밀도와 데이터의 입/출력 속도가 날로 증가하고 있는 상황에서, 위치제어 정밀도에 대한 제한 조건이 날로 까다로워지고 있고, 따라서 과거에는 고려할 필요성이 없었던 여러가지 문제점들이 대두되고 있다. 새로 대두되는 이러한 문제들은 해결하는 것은 제어엔지니어의 몫이 될 것이다.

참고문현

1. H. Abramovitch, "Magnetic and optical disk control: parallels and contrasts," *Proceedings of the American Control Conference*, pp. 432-428, June, 2001.
2. D. Abramovitch, T. Hurst, D. Henze, "An overview of the PES pareto method for decomposing baseline noise sources in hard disk position error signals," *IEEE Transactions of Magnetics*, vol. 34, no. 1, pp. 17-23, January, 1998.
3. H. S. Yang, J. Jun, C. H. Park, Y. P. Park, "Identification of contributors to HDD servo errors

- by measuring PES only," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 37, no. 2, pp. 883-887, March, 2001.
4. H. S. Lee, "Controller optimization for minimum position error signals of hard disk drives," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 48, no. 5, pp. 945-950, October, 2001.
 5. J. Jun, "Disturbance identification and control gain determination for minimum TMR in HDD," Ph. D. thesis, Yonsei University, 2001.
 6. M. K. Kobayashi, S. Nakagawa, T. Atsumi, T. Yamaguchi, "High-bandwidth servo control designs for magnetic disk drives," *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Proceedings* 8-12, July, 2001.
 7. S. M. Suh, C. C. Chung, S. H. Lee, "Servo controller design for high-bandwidth HDDs," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 38, no. 5, pp. 2177-2179, September, 2002.
 8. Y. Mizoshita, S. Hasegawa, K. Takaishi, "Vibration minimized access control for disk drives," *IEEE Transaction of Magnetics*, vol. 32, no. 3, pp. 1793-1798, May, 1996.
 9. C. I. Kang, "A new seek servo controller for acoustic noise reduction in disk drives," *Journal of Information Storage and Processing Systems*, vol. 3, no. 1/2, pp. 53-60, January/April, 2001.
 10. C. Kempf, W. Messner, M. Tomizuka, R. Horowitz, "Comparison of four discrete-time repetitive control algorithms," *IEEE Control Systems*, pp. 48-54, 1993.
 11. J. X. Xu, T. H. Lee, H. W. Zhang, "Comparative studies on repetitive runout compensation using iterative learning control," *Proceedings of the American Control Conference*, pp. 2834-2839, June, 2001.
 12. A. Jinzenji, T. Sasamoto, Koichi Aikawa, S. Yoshida, K. Aruga, "Acceleration feedforward control against rotational disturbance in hard disk drives," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 37, no. 2, pp. 888-893, March, 2001.
 13. J. Ishikawa, M. Tomizuka, "Pivot friction compensation using an accelerometer and a disturbance observer for hard disk drives," *IEEE Transactions on Mechatronics*, vol. 3, no. 3, pp. 194-200, September, 1998.
 14. H. R. Rapley, W.C.Messner, "Designing controllers for two stage disk drive actuator system using the PQ method and the sbode plot," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 37, no. 2, pp. 944-948, March, 2001.
 15. Y. Li, R. Horowitz, R. Evans, "Vibration control of a PZT actuated suspension dual-stage servo system using a PZT sensor," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 39, no. 2, pp. 932-937, March, 2003.
- ## Part II.
1. J. Y. Choi, H. G. Jun, H. S. Yang and Y. P. Park, "Disturbance measurement of an optical disc and servo loop design related to its resultant," *6th International Conference on Motion and Vibration Control*, pp. 326-331, August, 2002.
 2. DVD Specifications for Read-Only Disc, Part 1 Physical specifications, Version 0.9, 1999.
 3. W. Draijer, M. Stenbuch and O. H. Bosga, "Adaptive control of the radial servo system of a compact disk player," *Automatica*, vol. 28, no. 3, pp. 455-462, May, 1992.
 4. S. G. Stan, H. Kempen, G. Leenknecht, and T. H. M. Akkermans, "Look-ahead seek correction in high-performance CD-ROM drives," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 44, no. 1, pp. 178-186, February, 1998.
 5. T. H. Akkermans and S. G. Stan, "Digital servo IC optical disc drives," *Control Engineering Practice*, vol. 9, pp. 1245-1253, November, 2001.
 6. M. S. Park, C. Yossi, and M. Steinbuth, "Inversion-free design algorithms for multi-variable quantitative feedback theory: An application to robust control of a CD-ROM," *Automatica*, vol. 33, no. 5, pp. 915-920, May, 1997.
 7. K. Fujiyama, R. Katayama, T. Hamaguchi, and K. Kawakami, "Digital controller design for recordable optical disk player using disturbance observer," *6th International Proceedings on Advanced Motion Control*, pp. 141-146, 2000.
 8. J. H. Moon, M. N. Lee, and M. J. Chung, "Repetitive control for the track-following servo system of an optical disk drive," *IEEE Transactions on Control System Technologies*, vol. 6, No. 5, pp. 663-670, September, 1998.
 9. J. H. Moon, M. N. Lee, and M. J. Chung, "Track-following control for optical disk drive using an iterative learning scheme," *IEEE*

- Transactions on Consumer Electronics*, vol.42, no.2, pp.192-198, May, 1999.
10. J. Sefton, K. Glover, "Pole/zero cancellations in the general H_∞ problem with reference to a two block design," *System & Control Letters*, vol. 14, no. 4, pp. 295-306, April, 1990.
 11. M. L. Lee, J. H. Moon, K. B. Jin, and M. J. Chung, "Robust H_∞ control with multiple constraints for the track-following system of an optical disk drive," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 45, no. 4, pp. 638-645, August, 1998.
 12. D. C. MacFarlane and K. Glover, "Robust controller design using normalized coprime factor plant descriptions," vol. 138, Lecture Note in Control and Information Sciences, Springer-Verlag, 1990.
 13. M. Steinbuch, P. J. M. van Groos, G. Schootstra, P. M. R. Wortelboer, and O. H. Bosgra, " μ -synthesis for a compact disc player," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 8, no. 2, pp. 169-189, February, 1998.
 14. Z. Y. Yen, C. S. Lin, C. H. Li, Y. Y. Chen, "Servo controller design for an optical disk drive using fuzzy control algorithm," *IEEE International Conference on Fuzzy System*, pp. 989-997, March, 1992.
 15. Y. Zhou, M. Steinbuch, and D. Kosti, "Estimator-based sliding mode control of an optical disc drive under shock and vibration," *Proceedings of the 2002 International Conference on Control Applications*, vol. 2, pp. 631-636, September, 2002.
 16. T. Y. Doh, B. I. Ma, B. H. Choi, I. S. Park, C. S. Chung, Y. H. Lee, S. J. Kim, and D. H. Shin, "Radial tilt detection using beam and its compensation in a high-density read only memory," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 40, part I, no. 3B, pp. 1680-1683, March, 2001.
 17. R. Katayama, S. Meguro, Y. Komatsu, and Y. Yamanaka, "Radial and tilt detection for rewritable optical disks," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 40, part I, no. 3B, pp. 1684-1693, March, 2001.

저자소개



《양 현석》

- 1984년 연세대학교 기계공학과 학사.
- 1988년 M.I.T. 기계공학과 석사.
- 1993년 M.I.T. 기계공학 박사.
- 주요 관심분야 : 정보저장기기의 서보 제어, 초정밀 구동시스템의 설계 및 제어, 로봇 제어.