

하드 디스크 드라이브 서보 제어기의 설계

이호성

Principal Engineer, Maxtor Corp.

1. 서론

정보 전달 및 저장기술의 급격한 발전에 힘입어 “정보사회”의 실현이 최근에 더욱 가속화되고 있다. 특히 인터넷의 대중화로 인하여 전세계에 퍼져있는 숫자·문자 정보뿐만 아니라 음성·화상 정보를 쉽게 얻을 수 있게 되었다. 또한 이로 인하여 개인용 전산기(PC)로부터 초고속·초대형 전산기에 이르기까지 엄청나게 많은 정보저장용량을 요구하게 되었으며, 정보저장기기에 대한 폭발적인 수요를 불러일으키고 있다.

1980년초 미국 실리콘 밸리 소재 Seagate사에 의해 5메가 바이트 용량의 PC용 하드 디스크 드라이브(HDD)가 처음 소개된 이후, HDD 개발기술은 꾸준한 성장을 거듭하였다. 80년대 후반기에 들어서면서 반도체 메모리(DRAM과 SRAM)기술의 급격한 발전과 용량의 증가로 HDD의 장래에 대해 비관적인 견해가 많았다. 즉 반도체 메모리가 궁극적으로 HDD등 대용량 저장 기기를 대체할 것으로 예측되었다. 하지만 90년대에 접어들면서 HDD의 단위면적당 저장용량의 증가율은 매년 60퍼센트 이상을 기록하고 있다. 즉 매년 단위 저장용량의 가격이 60퍼센트씩 감소하는 추세를 보이는 것이다.(1980년대 중반 40메가 바이트를 살수 있는 가격으로 1998년 현재 4000메가 바이트의 하드 디스크 드라이브를 살 수 있다.) 이러한 급격한 가격저하는 부단한 기술의 개발·발전으로 인한 것으로 극심한 기술경쟁속에서 생존·성장할 수 있는 발판이 되는 것이다. 그 성장요인으로는 자기 기록 기술의 발전뿐만 아니라, 전자·기계장치에 의한 자기 헤드 위치제어기술의 지속적인 발전에 의한 것이다.

자기 기록 기술은 읽기·쓰기 헤드, 자기 기록 디스크(또는 미디어), 읽기 채널 전자회로(channel electronics), 데이터 encoding 및 헤드와 디스크 사이의 간격을 일정하게 유지하는 기술 등을 포함하고 있다. 저장용량은 면적 밀도(areal density)로 표기되는데, 이것은 선형밀도(linear density)와 트랙밀도(track density)의 곱으로 계산된다. 선형밀도는 정보저장 트랙을 따라 단위 길이당 비트(8비트=1바이트)의 개수를 말하며 그 단위는 BPI(bits per inch)이다. 트랙밀도는 1인치당 몇 개의 트랙이 있는가를 표시하며 그 단위는 TPI(tracks per inch)이다. 1998년 현재 시판되고 있는 HDD의 용량은 150000에서 220000 BPI(즉 1밀리미터당 6000에서 9000 비트), 8000에서

14000 TPI(즉 1밀리미터당 320에서 550 트랙)정도의 밀도에 의한 것이다. BPI의 증가는 자기 기록 기술의 발전에 전적으로 기인하는 반면, TPI의 증가는 주로 기계·서버 기술의 발전에 의존하고 있다.

본 글에서는 HDD에 관련된 기술 중 자기헤드의 위치제어와 연관이 있는 내용을 소개하는데 중점을 두었다. HDD의 기본요소들은 2절에서 간략히 소개하고, 3절에서는 디스크 드라이브 위치제어계의 기본사항을 기술하였다. 4절에서는 디스크 드라이브 위치제어계의 설계시 고려하여야 할 사항들을 설명하였다. 마지막으로 하드 디스크 드라이브를 비롯한 정보저장기기에 대한 장래 기술전망에 대해 서술하였다.

2. 하드 디스크 드라이브의 구성요소

하드 디스크 드라이브는 크게 두 부분으로 구성되어 있다. 반도체 칩, 마이크로 프로세서, 기타 전기적 부품이 조립되어 있는 프린트 기판(PCBA : printed circuit board assembly)과 주로 기계장치로 구성되어 있는 헤드·디스크 조립동체(HDA : head disk assembly)가 그것이다. 그림 1은 HDA의 기본요소를 보여주고 있다. 자기 저장 장치의 가장 중요한 부품인 자기 헤드와 디스크를 비롯하여 디스크를 돌려주는 스피들 모터, 헤드를 원하는 위치까지 움직여 주는 음성코일모터(VCM : voice coil motor)등이 나타나 있다. HDD가 작동하지 않을 때에는 헤드가 항상 안쪽 반경(inner radius 또는 inner crash stop)에 놓이게 되는데, 헤드가 함부로 움직이지 않도록 하기 위하여 기계식 또는 자석식 빗장이 설치되어 있다. 그림 1에는 나타나 있지 않지만 헤드에서 나오는 전기신호를 PCBA에 전달하는 케이블이 있다. 이 케이블은 arm에서 baseplate로 부착이 되며 유연한 재료로 되어 있어 flex cable 또는 PCC(printed circuit cable)라 불리운다. 이 케이블은 대량생산이 용이하여 가격이 저렴한 장점이 있으나 동적으로 비선형성이 강하여 해석이 어려우며 HDD의 성능을 높이는데 어려움을 주고 있는 요소 중 하나이다.

HDA안의 디스크 수는 HDD의 저장용량을 결정하며 일반적으로 각 디스크 당 2개의 헤드가 따르게 된다. HDD 기술 중 가장 특기할 것은 자기 헤드가 자기 디스크 위를 접촉 없이 공기 압력에 의해 부상하여 비행하

는 것이다. 디스크가 회전함에 따라 헤드와 디스크 사이에 공기압력이 형성되어 서서히 디스크 면에서 떨어지게 되고 항상 일정한 간격을 유지하게 된다. 즉 헤드와 디스크 사이에 공기 베어링(air bearing)이 생긴다. 이 간격을 작게 할수록 선형밀도(linear density : BPI)를 증가시킬 수 있으며 이것을 위하여 헤드의 형상을 최적화하는 연구가 꾸준히 진행중이다. 1957년 IBM사에 의해 세계 최초로 HDD가 소개되었을 때에는 외부에 별도로 공기 압축기가 설치되어 공기 간격을 20 μm 정도로 유지하였다. 1997년 현재 공기 간격은 2 마이크로 인치(대략 0.05 μm)미만으로 줄어들었다.

스핀들 모터의 속도는 PC용 저급 HDD의 경우 분당 3600~5400회전, 고성능 HDD의 경우 분당 7200회전이 주종을 이루고 있으나, 현재 분당 10000회전의 제품이 시판되고 있다. 앞으로 고용량 HDD의 실현은 지속적인 트랙밀도(TPI) 증가 가능성에 의해 좌우될 것이며, 특히 스핀들 모터·베어링의 성능 향상이 절대적으로 중요하다. 지금 주로 사용되고 있는 볼베어링을 대체하기 위하여 유체동역학 베어링(FDB : fluid dynamic bearing)에 대한 연구가 많이 진전되었으며 가까운 장래에 이것을 장착한 제품이 시장에 소개될 것으로 기대된다.

3. 디스크 드라이브 헤드 위치 제어계의 기본사항

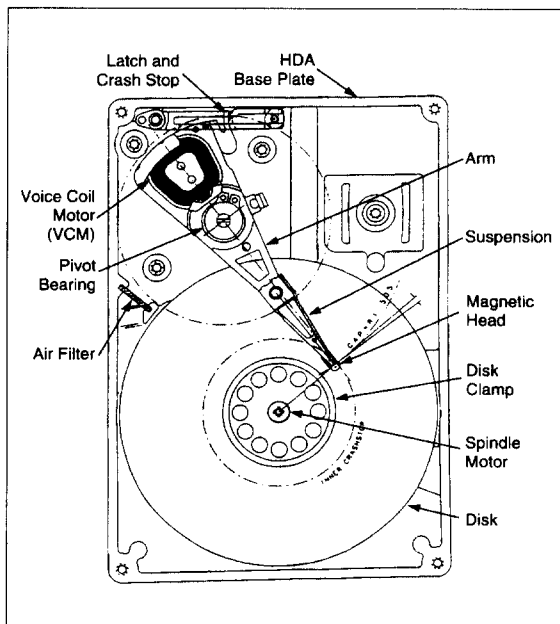


그림 1. HDA (Head Disk Assembly)의 구성요소

그림 2는 자기헤드 위치제어계를 간단한 블록선도로 나타낸 것이다. 그림에는 4개의 입력(r, w, d, n)과 1개의 출력(y)이 표시되어 있다. y 는 위치오차신호(PES : position error signal), 즉 원하는 데이터 트랙(또는 서보 트랙)의 중앙에서 헤드가 얼마나 벗어나 있는가를 나타내는 신호이다. 이 신호는 여러 가지 복잡한 장치와 과정을 통하여 만들어진다. 우선 사용자의 데이터가 실제

로 저장되는 데이터 트랙 사이에 일정한 간격으로 서보 위치정보가 쓰여진다. 이 위치정보가 쓰여진 부분을 servo sector라 하며 이 sector의 숫자는 디지털 제어계의 샘플링 주파수(sampling frequency 또는 sampling rate)에 의해 결정된다. 이러한 서보 방식을 embedded servo 또는 sector servo 방식이라 한다.

서보 트랙에는 실제로 PES를 얻는데 필요한 서보 패턴이 쓰여지게 되는데, 서보 패턴은 데이터 트랙의 절대적 주소(absolute address, cylinder number, 또는 macro position)를 나타내는 디지털 위치정보와 각 트랙 안에서의 상대적 위치(relative position 또는 micro position)를 나타내는 아날로그 위치정보로 구성되어 있다. 이 디지털 정보를 나타내는 패턴을 Gray code라고 하며, 아날로그 위치정보를 burst pattern 또는 quadrature라고 부른다. 이 servo sector를 일정한 간격(샘플링 주기)으로 샘플 함으로써 PES가 결정된다. 서보 패턴을 쓰는 기계를 servo track writer(STW)라 부른다. TPI가 증가함에 따라 보다 정밀한 STW가 필요하게 되며, servo track writing에 많은 시간이 소요되게 되어, 생산단가가 점점 높아지고 있다. 자기헤드가 servo sector를 지날 때에는 정확한 PES가 측정되지만 실제로 정보를 데이터 트랙에 쓰고 읽을 때의 정확한 위치정보는 다음 servo sector를 읽을 때까지는 불확실하다. 따라서 자기헤드가 실제 데이터 트랙의 중앙에서 벗어난 거리를 track misregistration(TMR)이라 한다. 즉 TMR은 자기헤드가 얼마나 신뢰성 있게 데이터를 쓰고·읽는가를 나타내는 수치이다.[6][9]

HDD제어기의 가장 큰 임무는 원하는 데이터 트랙에 가능한 한 빠른 시간에 도달하기 위한 seeking, 그리고 원하는 트랙에 도달한 후, 데이터 읽기 또는 쓰기의 과정이 끝날 때까지 데이터 트랙의 중앙에서 헤드가 벗어나지 않도록 제어하는 track-following의 두 가지이다. 이 두 가지를 통상적으로 HDD 서보 제어(servo control)라 부른다. seeking은 최소시간(minimum time)제어, 그리고 track-following은 최소편차(minimum variance)제어이론을 기본으로 설계된다. HDD제어기의 성능은 또한 seeking에서 track-following으로 바뀌는 mode-switching에 따른 settling에 많은 영향을 받는다. 이 settling은 TMR에 큰 영향을 주는데, 헤드-슬라이더에 미치는 공기 편향력(windage), flex cable에 의한 편향력(bias)과 피봇 베어링의 비선형 마찰력 등에 의한 외란으로 인하여 settling 시간이 길어지게 된다. 이 settling 시간을 최소화하기 위한 여러 기법이 고안되었는데, 경험적인 방법이 또한 많이 사용되고 있다.[3][5][10]

그림 2에서 보는 바와 같이 HDD제어기는 원하는 위치입력(r)에 대한 PES 출력(y)의 관계를 결정하며 이것을 방해하는 3가지의 외란(disturbance : w, d, n)에 대한 분석과 이들이 PES에 미치는 영향을 해석하는 것이 매우 중요하다. w 는 토크외란(torque disturbance)을 나타내

며, 주로 외부진동·충격에 기인한다.[18] 헤드에 미치는 공기베어링의 외력(air bearing windage), 피봇베어링의 마찰력, 그리고 flex-cable에 의한 편향력(bias)도 w 에 포함된다.[5]

스핀들 모터·베어링, 그리고 디스크 회전에 따른 디스크의 움직임(disk flutter)과 자기헤드가 부착되어 있는 슬라이더 진동은 기계적 외란(mechanical disturbance), d 에 직접적인 영향을 미친다. 특히 스핀들 속도의 증가는 디스크와 슬라이더의 진동을 더욱 증폭시키며, 안정적인 track-following의 신뢰도를 낮추게 된다.[8][14]

전기적 소음(electrical noise)은 그림 2에서 n 으로 표시되어 있는데 이것은 자기 미디어 소음, servo demodulation noise, power amplifier noise, 그리고 analog-to-digital converter(ADC)와 digital-to-analog converter(DAC)의 제한된 resolution에 의한 quantization error에 의한 것이다. 이들 각 요소가 PES에 미치는 영향에 대한 해석의 예는 [2][8][9]에서 볼 수 있다.

이들 기계적·전기적 외란에 의한 오차를 런아웃(runout)이라 하며, 다음과 같은 두 가지 요소로 분류된다. 주파수 영역에서 볼 때 회전수의 정수배에 나타나는 오차를 repeatable runout(RRO), 그리고 회전수의 정수배에 무관하게 나타나는 부분을 non-repeatable runout (NRRO)이라 한다. RRO는 대부분 기계적 외란(d)에 의한 것이며, NRRO는 기계적·전기적 외란의 합성에 의해 나타난다.[8][13]

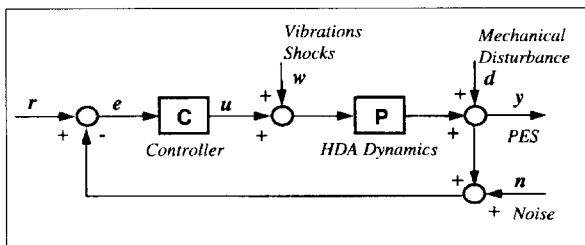


그림 2. 하드 디스크 드라이브의 위치 제어계를 나타내는 블록선도.

그림 3에 따른 입력-출력의 transfer function은 다음과 같이 표기된다.

$$y = G_{ry}r + G_{wy}w + G_{dy}d + G_{ny}n \quad (1)$$

$$G_{ry} = \frac{CP}{1+CP}, \quad G_{wy} = \frac{P}{1+CP} \quad (2)$$

$$G_{dy} = \frac{1}{1+CP}, \quad G_{ny} = -G_{ry} = \frac{-CP}{1+CP} \quad (3)$$

제어기 설계시 이들 외란의 영향을 최소화하기 위하여, 여러 가지 기법이 사용되고 있으나, 실제로 완벽한 성능을 기대하기는 어렵다. 일반적으로 제어기의 closed-loop bandwidth를 올림으로써 런아웃에 의한 오차를 감소시킬 수 있을 것으로 기대되나, 높은 bandwidth는 상대적으로 전기적 소음에 의한 영향을 증가시키는 부작용

을 수반한다. 따라서 단지 제어기의 성능을 조정함으로써 HDD의 성능을 높이는 데는 한계가 있으며, 스핀들 모터, 베어링 및 기타 부품의 질과 성능을 같이 향상시키는 것이 중요하다. 아울러 전기 부품·회로에서 발생하는 전기적 소음을 최소화하는 것이 중요하다.

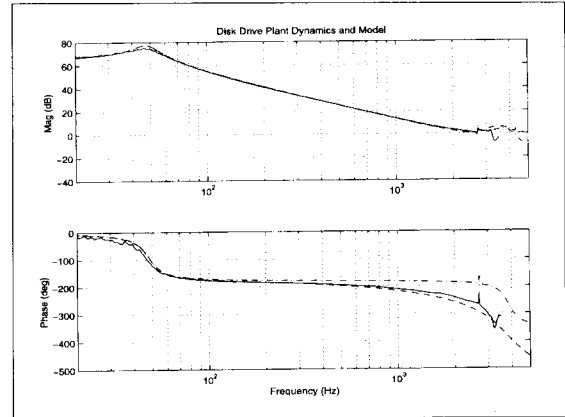


그림 3. HDA 액츄에이터의 동역학 측정 및 모델링. :

(실선) 측정치 (점실선) 연속시간 모델

(점선) 계산시간 지연을 포함하는 discrete-time 모델.

4. 디스크 드라이브 서보 제어계의 설계사양

4.1 디스크 드라이브 동역학과 모델링

초창기 HDD의 자기헤드는 직선형 음성코일모터(linear voice coil motor)를 이용하여 움직여졌다. 이것은 음성스피커 안의 음성코일과 똑같은 원리로 작동된다. 이 직선형 음성코일모터는 많은 정밀 기계요소를 필요로 하며, 가격이 비싸고 특히 외부충격에 약한 단점이 있어, 지금 생산되고 있는 모든 HDD는 그림 1에서 보는 바와 같은 회전형 음성코일모터(rotary voice coil motor)를 사용하고 있다. HDD의 액츄에이터(actuator)는 음성코일모터(VCM)를 비롯하여 arm-suspension-자기헤드로 구성되며, 이 헤드의 위치제어를 위하여 액츄에이터의 동역학을 예측 또는 측정하여야 한다. 동역학은 주로 유한요소법(FEM)을 이용하여 예측되며, 실험에 의한 측정치와 비교하여 정확도를 개선하여 나간다.

그림 2의 블록선도에서 HDA 동역학계(plant dynamics)가 P로 표기되어 있다. 가장 간단한 수학적 모델은 순수 질량모델(pure inertia 또는 double integrator model)이며, 실제로 서보 제어기를 설계할 때 많이 사용되고 있다. 순수질량모델은 통상 작동 주파수 영역인 100Hz와 1000Hz사이에서 잘 적용된다.

하지만 그림 3에서 보는 바와 같이 HDA 동역학계의 실제 주파수 응답선도를 보면 여러가지 복잡한 양상의 기계적 공진 현상이 나타남을 볼 수 있다. 그림 3에는 실제 측정치와 연속시간 모델, discrete-time 모델의 예를 보여주고 있다. discrete-time 모델은 계산시간지연(com

-putation time delay)에 의한 phase angle의 감소를 포함하고 있다.

여기서 연속시간 모델은 다음과 같은 세 가지의 동역학 요소를 포함하고 있다.

- 1) 피벗 베어링 마찰에 의한 비선형성을 포함하는 순수 질량모델,
- 2) 서스펜션(그림 1참조)의 첫 번째 비틀림 공진(torsion resonance)모델,
- 3) 액츄에이터(그림 1에서 VCM과 arm을 포함함)의 lateral 모우드 공진 모델.

피벗 베어링에 의한 비선형 동역학은 그림 3에서 보는 바와 같이 마치 단순한 기계적 공진 현상같이 나타난다. 여기에서 공진 주파수는 46Hz정도이나 비선형성에 의해 입력의 크기가 바뀌면 공진 주파수와 응답의 크기가 바뀌게 된다. 이 피벗 베어링의 비선형성에 대한 자세한 모델은 여러 문헌에 많이 발표되어 있다.[1][3][10][16]

서스펜션에 의한 공진은 2700Hz 부근에서 나타나며, 상대적으로 작은 주파수응답인 것으로 보이나, 제어계의 안정성(stability margin)을 높이기 위하여 보통 digital notch filter를 도입하여 이 공진 현상을 사전에 감쇄시킨다.

세 번째, 액츄에이터 공진 현상은 3700~4000Hz 부근에서 측정되는데, bandwidth 증가에 따른 안정성을 감소시키는 부작용이 있다. 따라서 이들 기계적 공진 현상은 디스크 드라이브 제어계의 성능을 높이기 위한 bandwidth의 증가를 방해하는 중요한 요소이다.

4.2 서보 제어기의 종류와 선택

현재 디스크 드라이브의 서보 제어기는 대부분 마이크로 프로세서를 이용한 디지털 제어기로 되어 있다. 특히 저렴한 디지털 신호 처리기(DSP: digital signal processor)의 발전으로 다양한 디지털 제어기의 개발 및 이용이 점점 더 용이해 지고 있다. 디지털 제어기 설계에 있어 가장 선행되는 것은 샘플링 주파수를 결정하는 것이다. 이 샘플링 주파수는 다음의 변수를 고려하여 결정된다.

- 1) 디스크 드라이브의 트랙 밀도 (즉 TPI)
- 2) Servo overhead : 디스크 상에서 서보 sector가 차지하는 면적을 servo overhead라하며, 샘플링 주파수 (즉 서보 sector의 수)가 높아질수록, 사용자가 쓸 수 있는 저장 용량은 작아진다. servo overhead는 일반적으로 6~10 퍼센트 정도이다.
- 3) 마이크로 프로세서의 계산 속도.
- 4) 제어기의 성능 사양(stability margin, closed-loop bandwidth 등)
- 5) 충격사양 : 가장 최악의 시나리오는 자기헤드가 새로운 데이터를 쓰고 있는 동안 충격이 올 때이다. 심한 충격시에는 자기헤드가 엉뚱한 트랙에 데이터를 쓰게 되

며, 정보의 파손과 함께 새로운 데이터를 다시 읽을 수 없게 된다. 샘플링 주파수가 높을수록 충격에 대한 대비가 용이하다.

이 샘플링 주파수는 각 디스크 드라이브 제조업체마다 이론과 경험을 종합하여 고유한 방식에 의해 결정된다.

현재 PC용 3.5인치 하드디스크 드라이브의 average track access time은 10 msec 전후이며, 고성능 하드디스크 드라이브의 average track access time은 8 msec 미만을 요구하고 있다. 머지 않은 장래에는 5 msec 미만의 average access time을 갖는 디스크 드라이브도 등장할 것으로 전망된다. 최근 현재 시판되고 있는 대부분의 디스크 드라이브의 seek 제어기는 PTOS(proximate time optimal servo mechanism)의 이론을 적용하고 있다.[7] 일반적으로 30트랙 이상의 긴 거리를 이동할 경우에는 속도 모우드 tracking이 사용되며, 이때 자기 헤드의 속도는 state estimator에 의해 측정된다. 짧은 거리를 이동할 경우에는 위치모우드 tracking이 적용된다.

대부분의 seek 제어가 state-space 제어기 이론에 의해 설계되는 것에 반해 여러 가지 종류의 track-following 제어기가 이용되고 있다. 그 대표적인 예로는 1)변형된 PID 제어기, 2)FIR (finite impulse response) 제어기, 3)state-space 제어기, 4)high-order 제어기 등이 있다. state-space 제어기에는 full-state estimator 또는 reduced-order estimator 또는 multi-rate control 등의 변형이 있다. high-order 제어기는 μ -synthesis, H- ∞ (H-infinity) 등 새로운 고등제어이론에 의해 결정되는 경우가 많다.

고전적인 PID-FIR 제어기는 설계 및 설치가 상대적으로 쉬운 반면 seeking에서 track-following으로 전환되는 mode-switching 설계에 어려움이 많다. 또한 계산시간 지연에 따른 phase 손실을 보상하기가 어렵다. state-space 설계는 seeking과 track-following제어시 모두 같은 구조의 제어기를 사용함으로써 mode switching이 용이하고, estimator를 갖추어 계산시간지연과 편향력(bias force)보상이 또한 용이하다. 반면에 많은 계산시간이 필요하며, 비교적 정확한 system model이 요구된다.

High-order 제어기 또한 많은 계산시간을 필요로 하며, 보다 빠른 마이크로프로세서를 요구하게 된다. 또한 많은 제어기 변수로 인하여 모든 제어·요구조건을 만족하는 최적 제어기를 찾는 데 어려움이 있다.

앞절(4.1)에서 보인 바와 같이 기계적 공진 현상에 의한 악영향을 최소화하기 위하여 notch filter가 설치되며, DSP를 이용한 digital notch filter가 제어기의 역할을 하게 된다. 여러 주파수의 공진 현상이 심각한 경우에는 각 공진 주파수에 맞는 여러 개의 notch filter가 들어가게 된다. 공진 주파수가 Nyquist 주파수보다 높은 경우에는 multi-rate notch filter가 이용된다.[17] 하지만 notch filter는 제어계의 상대안정도(relative stability)와 제어성능을 저하시키게 하며, 많은 계산시간을 요구하게 된다.

PES의 RRO중 모터의 회전주파수와 일치하는 성분이 큰 점을 고려하여, 이것을 보상하여 주는 특수목적 제어기를 삽입하기도 한다. 즉 5400 RPM 모터인 경우 90Hz, 7200 RPM 모터인 경우 120Hz를 말하며 이것을 통상 1F (first frequency)문제라 부른다. (따라서 2F 문제는 180Hz 또는 240 Hz 주파수 성분과 연관된다.) 대표적 보상·제어기의 예로는

- 1) 1F 주파수 (또는 2F 주파수)를 갖는 high gain peaking filter,
- 2) DFT(Discrete Fourier Transform)를 이용한 피드포워드 제어기(feedforward controller),
- 3) LMS(Least Mean Square)알고리즘을 이용한 피드포워드 제어기[12][15]등이 있다.

또한 피벗 베어링의 비선형 마찰에 의한 나쁜 영향을 보상하기 위하여 여러 가지 제어기가 제안되었다.[5][10]

4.3 제어기의 성능 사양과 설계요건

일단 샘플링 주파수가 정해지면 주파수 영역 성능을 만족시키기 위한 제어기가 시뮬레이션을 통하여 설계된다. 먼저 최소한의 상대 안정도를 보장하는 stability margin을 만족시켜야 한다. 일반적으로 gain margin은 6~7 dB, phase margin은 35°~45°를 설계 목표로 삼는다.

식 (2)~(3)에서 보는 바와 같이, $G_{ry} = -G_{ny}$ 는 피드백 제어계(feedback control system)의 전반적인 성능을 나타내는 closed-loop transfer function이다. closed-loop bandwidth(BW)와 open-loop crossover 주파수(W_c)와의 관계는 $BW = (2.0 \sim 2.8) \times W_c$ 이다. 이 closed-loop 전달함수는 또한 전기적 소음이 PES에 미치는 영향을 결정하므로, 지나친 전기적 소음이 PES에 나타나지 않도록 하기 위해서는 주파수 응답의 최대절대치가 어느 한도(보통 4dB)이상 올라가지 않도록 해야 한다. 아울러 증폭 주파수 영역이 전기적 소음의 스펙트럼 중 큰 영역과 일치하지 않도록 유의하여야 한다.

식 (3)의 G_{ds} 는 error rejection transfer function 또는 sensitivity function으로 불린다. 일반적으로 간단히 error transfer function이라고도 한다. 디스크 드라이브 서보 시스템 설계에 있어 점점 큰 비중을 차지하는 것이 이 전달함수이다. 그림 4에는 이 전달함수의 예를 보여 주고 있다. 실제 측정함수, 모델화된 전달함수의 주파수 특성, 또한 수학적으로 approximation된 전달함수가 그림에 나타나 있다. 이 전달함수는 주파수 영역에서보다 시간 영역에서의 해석에 있어 중요한 역할을 한다. 그림에서 곡선이 0dB선과 만나는 주파수를 대략 350Hz 정도로 본다.

따라서 350Hz 아래의 기계적 외란의 영향은 모두 감소되나, 반면에 350Hz에서 2000Hz사이의 기계적 외란이 과도하게 증폭되지 않는 error transfer function의 모양이

되도록 제어기를 설계하는 것이 중요하다.

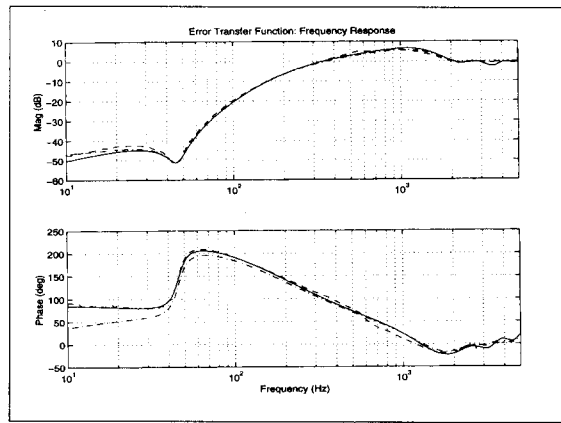


그림 4. HDD error transfer function.

(점선) 측정치

(실선) 수학적 모델 (점실선) 근사화한 모델.

제어기의 궁극적인 성능은 PES를 측정하고, TMR이 높은 신뢰도로 보장되고 있는가를 확인함으로써 알 수 있다. 앞서서도 기술한 바와 같이 PES는 디스크 드라이브 서보 시스템에 대한 외란에 기인하는 것이다. 일반적으로 드라이브의 구성요소가 모두 조립된 후에야 PES와 TMR을 측정할 수가 있다. 때에 따라서 PES와 TMR이 원하는 숫자보다 너무 클 경우에는 기계적 요소(HDA)와 서보 제어기를 다시 설계·제작해야 하는 경우가 있으며, 이럴 경우 제품을 제 때에 시장에 내놓을 수 없으며, 경쟁에서 뒤지게 된다. 따라서 시간 영역에서의 PES와 TMR을 정확하게 예측할 수 있는 시뮬레이션 tool을 개발하는 것이 매우 중요하다. 정확한 기계적 외란의 측정과 전기적 소음의 estimation에 의한 PES 예측 방법이 [8][13]에 소개되어 있다.

5. 결론과 전망

1998년 현재 10000 TPI 급의 하드디스크 드라이브가 주종을 이루고 있으며 이 경우 트랙폭(track pitch)은 100 마이크로인치(2.54 마이크로미터)이다. PES의 ADC(analog-to-digital converter)의 resolution을 10비트로 볼 때 이론적 위치 측정 정도는 0.1 마이크로 인치(2.54 나노미터; 1 나노미터 = 10⁻⁹미터)가 되어 엄청난 정밀도를 요구함을 알 수 있다. 따라서 TPI가 증가함에 따라 과거에는 무시할 수 있었던 작은 문제들이 점점 어려운 문제로 대두되고 있다. 2000년도에 이르면 HDD의 TPI가 20000 TPI 이상에 도달할 것으로 예상되며, IBM사와 캘리포니아 대학 버클리에서는 HDD의 TPI를 획기적으로 증가시키기 위하여 MEMS(micro electro mechanical systems)를 이용하며, 그 실용화를 위한 공동연구를 진행하고 있다.[6] 지금까지의 연구 개발을 주로 용량 증가에 중점을 두었는데 최근에는 정보 입·출력 속도를 증가시키기 위

한 노력을 많이 하고 있다. 스피들 모터의 회전속도가 10000 rpm인 HDD가 이미 시판되고 있으며, 그 이상의 회전 속도를 실용화하기 위한 연구·개발도 진행 중이다. 이러한 고성능 HDD의 실현을 위해서는 보다 집중적인 기계기술의 개발이 필요하다. 고속 회전 모터에 따른 열·소음·진동 문제는 지금까지와는 다른 차원의 문제를 야기시킨다. 예를 들면, 디스크와 헤드 주위의 고속 난기류(turbulence)에 의한 진동 문제는 유체에 의한 진동(flow-induced vibration)이론을 도입하여 해석하여야 한다. 또한 진동에 의한 헤드의 움직임을 최소화하기 위하여 가속도계를 baseplate에 부착하여 제어신호를 피드포워드 시키는 방법도 제시되고 있다.[18]

또한 한편으로는 견실제어(robust control)기법을 이용하여 제어계의 진동·외란 문제를 해결하는 방법이 일본을 중심으로 활발하게 연구 중이다.

컴퓨터 및 정보·통신 기술의 급속한 발전은 앞으로도 계속될 것이며, 최근에는 가전용품의 전산·디지털화를 위한 연구가 진행 중이다. 머지 않은 장래에 주택내의 모든 장치의 전산 제어가 가능하리라는 전망이 나오고 있다. 특히 고화질 디지털 TV의 실용화는 PC와 TV와의 구분을 어렵게 만들 것이다. 이러한 디지털 정보의 대중화는 정보저장기기에 대한 폭발적 수요를 지속시킬 것이다.

하드 디스크 드라이브, 테이프 드라이브, CD-ROM, DVD(digital video disk)등 대용량 정보 저장기기는 앞으로도 계속 기계식이 주종을 이룰 것이다. 하드 디스크 드라이브, CD-ROM, 반도체 메모리 등은 각각 장점과 단점이 있으므로 서로 상호 보완적으로 계속 존재할 것으로 전망된다. 현재의 정보저장용량을 획기적으로 늘리기 위한 많은 새로운 아이디어들이 나오고 있으며, 실리콘 밸리를 중심으로 이 아이디어들을 실현시키기 위하여 크고 작은 회사들이 연구·개발을 계속하고 있다. 그 중에서도 HDD의 자기 기술과 CD-ROM의 광학 기술을 합성하여 한꺼번에 수십 배의 용량증가를 가능케 하는 near-field recording과 far-field recording의 실용화에 기대를 거는 사람들도 많다.

본 글에서는 HDD 서보 시스템에 관련된 사항 중 위치제어계의 설계에 대해 중점적으로 기술하였다. 디스크 드라이브 서보 시스템에서 실제 서보 알고리즘이 차지하는 부분은 비교적 작다. 획기적인 서보 알고리즘 한가지로만 모든 문제를 해결할 수 없으며, 첨단 서보 알고리즘이 실용화되기 위해서는 고성능이면서 간단하고 저렴해야 한다. 아울러 이미 기술한 바와 같이 대용량 정보저장기기는 많은 기술적 난제들을 가지고 있으며, 이들 문제를 해결하기 위하여 제어기술자들 뿐만 아니라 기계·전자·재료·소프트웨어 기술자들의 부단한 협력과 새로운 기술의 창출이 필요하다.

- [1] D. Abramovitch, F. Wang, and G. Franklin, "Disk Drive Pivot Nonlinearity Modeling Part I: Frequency Domain," Proceedings of the 1994 American Control Conference (Baltimore, Maryland), June 1994, pp. 2600-2603.
- [2] 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, January 1998, pp. 17-23.
- [3] Y. K. Byun, J. H. Park, H. S. Chang, and K. C. Ro, "Pivot Nonlinearity in Disk Drive Rotary Actuator: Measurement and Modeling," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 33, No. 5, September 1997, pp. 2635-2637.
- [4] J. Davis, "Beyond the Superparamagnetic Limit II: Far-field Recording," Data Storage, February 1998, pp. 33-36.
- [5] K. Eddy, J. Steele, and W. Messner, "Bias in Disk Drive rotary Actuators: Characterization, Prediction, and Compensation," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 33, No. 3, May 1997, pp. 2424-2436.
- [6] L. S. Fan, H. H. Ottesen, T. C. Reiley, and R. W. Wood, "Magnetic Recording head Positioning at Very High Track Densities Using a Microactuator-Based Two-Stage Servo System," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 42, No. 3, June 1995, pp. 222-233.
- [7] G. F. Franklin, J. D. Powell, and M. L. Workman, Digital Control of Dynamic Systems, Second Edition, Menlo Park: California, Addison-Wesley, 1990.
- [8] 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," To be presented at the Asia Pacific Magnetic Recording Conference (APMRC), July 1998, Singapore.
- [9] Hai Ho, "Noise Impact on Servo TMR," Proceedings of the 1997 American Control Conference (Albuquerque, New Mexico), June 1997, pp. 2906-2909
- [10] T. Huang, Y. Ding, S. Weerasooriya, and T. S. Low, "Disk Drive Pivot Nonlinearity Modeling and Compensation through Fuzzy Logic," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 34, No. 1, January 1998, pp. 30-35.
- [11] G. Knight, "Beyond the Superparamagnetic Limit I:

- Near-field Recording," Data Storage, February 1998, pp. 23-30.
- [12] H. S. Lee, "Implementation of Adaptive Feedforward Cancellation Algorithms for Pre-Embossed Rigid Magnetic (PERM) Disks," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 33, No. 3, May 1997, pp. 2419-2423.
- [13] H. S. Lee and L. Guo, "Servo Performance Prediction for High Capacity Disk Drives," To appear on the Proceedings of the 1998 American Control Conference(Philadelphia, Pennsylvania), June 1998.
- [14] J. S. McAllister, "Disk Flutter: Causes and Potential Cures," Data Storage, Vol. 4, May/June 1997, pp. 29-34.
- [15] A. Sacks, M. Bodson, and W. Messner, "Advanced Methods for Repeatable Runout compensation," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 31, No. 2, pp. 1031-1036, March 1995.
- [16] F. Wang, T. Hurst, D. Abramovitch, and G. Franklin, "Disk Drive Pivot Nonlinearity Modeling Part II: Time Domain," Proceedings of the 1994 American Control Conference (Baltimore, Maryland), June, 1994, pp. 2604-260.
- [17] P. A. Weaver and R. M. Ehrich, "The Use of Multi rate Notch Filters in Embedded Servo Disk Drives," Proceedings of the 1997 American Control Conference(Seattle, Washington), June 1995, pp. 4156-4160.
- [18] 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), July 1996, Volume O, pp. 489-494.

CASE 특별기사 모집 안내

1. 회원사의 연구소, 연구팀 또는 연구실이나 회원의 연구실(특히 학계나 연구소)을 소개하는 기사를 모집합니다.
2. 기사는 학회지 편집이사 김종원 교수쪽에서 수시로 접수받고 있으며, 국제 학술대회의 기술동향 추세에 대한 참관기등도 보내주시기 바랍니다.

Call for paper 모집 안내

1. 제어·자동화 및 시스템공학과 관련된 국내, 외 Call for paper를 구하셨을 경우에는 사무국으로 송부하여 주시기 바랍니다.
2. 사무국에서는 Call for paper를 접수받아 보관한 다음, 다음호 학회지에 개최일자순으로 게재토록 하겠습니다.
3. 또한 회원중 Call for paper를 요구할 시에는 복사본을 팩스나 우편으로 송부하여 소중한 정보가 회원들에게 공유될 수 있도록 하겠습니다.

특별기사 송부처 : 기사는 한글로 작성하여 학회지 편집이사 김종원 교수(Tel. 880-7138, Fax. 883-1513, E-mail : mejwkim@asri.snu.ac.kr) 에게 보내주시면 편집하여 게재토록 하겠습니다.

Call for paper 송부처 : 제어·자동화·시스템공학회 사무국

(우)135-703, 서울시 강남구 역삼동 635-4 과학기술회관 본관 406호
 Tel. 508-5801, 508-5830
 Fax. 555-4746
 E-mail : icase@chollian.dacom.co.kr