

디스크 드라이브의 기술 동향과 제어기술

정정주*, 이승희**, 주상훈**

(*한양대 공대 전기공학부 조교수, **삼성종합기술원 정밀기계연구실 전문연구원)

1. 서 론

정보화 산업에서 고성능 컴퓨터 기술과 초고속 통신망 기술은 정보사회의 인프라를 구성하는 데 중요한 요소들이다. 고속형 컴퓨터는 대용량의 정보저장과 고속의 정보 입출력이 가능한 정보저장기기를 필요로 한다. 특히 초고속 통신망을 이용한 멀티미디어 시대에 있어서 대용량의 정보저장과 고속의 정보 입출력이 가능한 정보저장기기의 요구가 더욱 증대되고 있다. 현재 컴퓨터 기억장치로 사용되는 것으로 SRAM, DRAM, flash memory 등과 같은 반도체 메모리와 자기를 이용한 하드 디스크, 플로피 디스크, 테이프 그리고 광자기 디스크 등이 있다. 이 중에서 보조 기억장치로 가장 많이 사용되는 시스템이 하드 디스크 드라이브이다 (HDD). 데이터를 기록 재생할 수 있으며, 데이터의 보관, 데이터의 접근 속도 (access time) 등을 고려할 때 가격대비 성능 면에서 HDD를 능가하는 기억장치가 아직까지 없다. 본 고에서는 퍼스널 컴퓨터 (PC)나 워크스테이션 (workstation)에 사용되는 HDD의 기술동향을 제어기술 관점에서 서술하고자 한다.

2. 시장 현황

초고속 통신망을 이용한 멀티미디어 시대에 있어서 대용량의 정보저장과 고속의 정보 입출력이 가능한 정보 저장기기가 요구된다. 정보 저장기기 중에서 입출력이 자유롭고 대용량의 저장이 가능한 장치가 HDD이다. 물론 HDD 보다 높은 기록밀도를 갖는 광자기 디스크와 광학 디스크들도 있지만 상품으로 개발된 것들 중에서 HDD의 정보입출력 속도를 앞지르지 못하고 있다. 광자기 디스크의 원리를 이용한 Digital Video Disk (DVD) RAM도 아직까지는 정보의 입출력 속도와 디스크의 가격대비 기억용량 그리고 드라이브의 제품가격 등이 하드 디스크에 비하여 열등하다. 그 외 Hologram을 이용한 Holographic Memory와 AFM

(Atomic Force Microscope) Memory 장치 등이 있지만 아직까지 실용화되지 못하고 연구단계에 머물고 있다. 때문에 현재로서는 2010년까지 자기기록 장치인 HDD가 컴퓨터 시스템의 일차적 정보저장기기의 주 역할을 담당할 것으로 예측되고 있다.

HDD 시장은 PC의 지속적인 성장과 Notebook의 폭발적인 성장에 힘입어 1996년 약 200억불 (USD) 규모를 형성했으며 1989년 이후 연평균 20% 성장을 하고 있다. 1997년에는 약 1억 3천만대의 디스크 드라이브가 출하될 것으로 예측하고 있다. 그림 1에 전세계 HDD 출하대수 추이를 보았다. HDD 제조산업은 여러 분야의 기술이 종합되어 제품이 만들어지고 초정밀 가공과 제조를 요구하는 산업으로 하이테크 산업이다. 때문에 현재까지 몇몇 미국기업들 (Seagate, Quantum, IBM 등)이 전세계 시장의 70% 이상을 차지하고 있다.

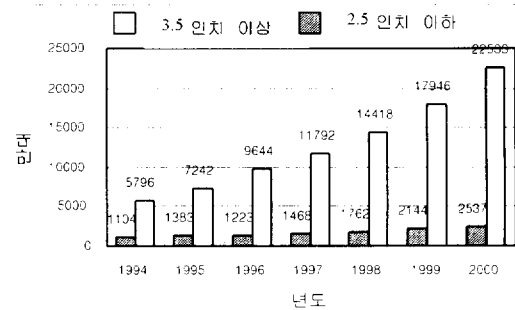


그림 1. 전세계 HDD 출하대수 (출처: 일본전자공업진흥협회)

3. 각국 연구 동향

미국정부는 National Storage Industry Consortium (NSIC)을 구성하고 National Science Foundation (NSF), National Institute of Science and Technology (NIST)를

통하여 대학과 정부연구기관에 대하여 미국 기업들이 계속 정보저장기기 분야 기술의 주도권을 쥐고 산업을 이끌어 갈 수 있도록 고기록밀도 하드디스크 드라이브에 대한 연구에 막대한 재정지원을 하고 있고 대학과 연계하여 인력 양성과 기술개발에 박차를 가하고 있다. NSIC에서 제시한 기술개발 예측을 보면 NSIC은 2000년에 25,000 TPI (Tracks Per Inch) 400K BPI (Bits Per Inch) 가 가능한 기술을 개발하고자 한다.

외국인이 NSIC에 속한 연구기관에서 정보저장기기 관련 연구과제에 참여하는 것은 매우 제한적이다. 때문에 외국기업들이 이들 기관의 기술에 접근하기가 용이하지 않다. 이 때문에 일본에서도 미국의 NSIC에 대응하는 단체로 일본 정부, 민간기업 및 대학들이 모여서 1995년 Storage Research Consortium (SRC)을 구성하였다. 일본 기업들이 정밀산업에서 뒤지지 않지만 유독 HDD 산업에서 열세인 것을 만회하기 위하여 결성한 단체라고 믿어진다. 싱가포르 디스크 드라이브 제조산업이 가장 활발한 지역이다. 그래서 싱가포르 정부에서도 적극적으로 디스크 드라이브 산업을 육성하기 위해 싱가포르대학 안에 DSI (Data Storage Institute)를 설치하여 정보저장기기 관련 전문가를 양성하고 연구한다. 우리 나라에서도 이러한 정보저장기기에 대한 정부의 관심이 높아져 1997년 상반기에 연세대학교의 정보저장기기 연구센터가 과학재단의 ERC로 지정되어 정부의 지원을 받게 되었다. 이 분야의 시장은 경쟁이 매우 치열하고 특히 이 산업분야가 기술 집약적인 산업이므로 기술적으로 경쟁우위를 가질 필요성이 있다.

4. 디스크 드라이브 기술발전

컴퓨터 디스크 기억장치 기술 (computer disk storage system technology)은 1950년대 IBM에 의해서 개발되었다. 1956년 9월 13일 IBM이 소개한 305 RAMAC은 직경이 24인치인 50개의 디스크로 구성된 시스템으로 저장용량이 5MB에 불과하였다. 그 당시 컴퓨터 기술을 고려할 때 이것은 획기적인 기술 이었다. 테이프 드라이브 시스템과 달리 데이터를 임의의 부분에 쓰고 읽을 수 있게 됨으로써 RAMAC의 개발은 컴퓨터 기술발전에 지대한 공헌을 한 데이터 저장장치이다. 지난 1997년 10월 15일 IBM은 2.5인치 디스크 10장에 저장용량이 8.1GB 되는 제품 Travelstar 8GS를 발표했는데 41년 동안 디스크의 면기록밀도(areal density, 단위: bits-per-sq.in. 혹은 b/in²)가 무려 200만 배에 이르는 성장을 기록했다. 디스크 드라이브의 저장용량은 면기록 밀도, 디스크의 크기 그리고 디스크의 개수에 의해 결정된다. 따라서 직경이 큰 디스크를 사용하거나 많은 디스크를 적층하여 저장용량을 높일 수 있다. 그러나 단위 면적이 큰 디스크를 사용하거나 많은 디스크를 적층할 수 있는 기술의 개발보다도 현재 기업체에서 가장 관심이 높은

분야는 면기록 밀도를 높이는 기술이고 그 중에서도 단위 면적당 많은 기록을 할 수 있는 자기저항 헤드 개발이다. 디스크의 면기록밀도는 선기록밀도 (linear recording density, 단위: bits-per-inch 혹은 BPI)에 트랙밀도 (track density, 단위: tracks-per-inch 혹은 TPI)를 곱한 값을 사용하는데 IBM Travelstar 8GS는 면기록 밀도가 3Gb/in²인 제품이다. 기록밀도는 지난 40여년 동안 꾸준히 성장해왔다. 80년대에서 90년대 초까지 면기록밀도의 연평균 성장률이 약 30% CGR (compound-growth-rate)이르고 90년대에는 60% CGR에 이른다.

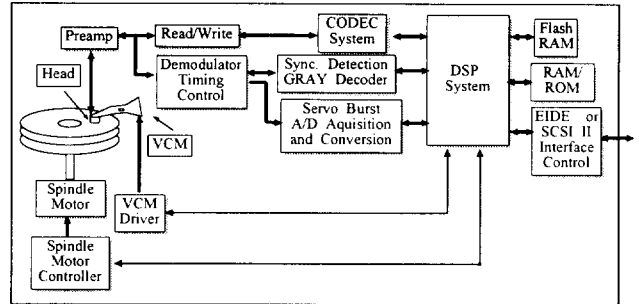


그림 2. 디스크 드라이브 구조도

5. 디스크 드라이브 구조와 서보시스템

디스크 드라이브 구조를 그림 2에 보았다. 디스크 드라이브는 회전하는 자성 디스크에 데이터를 쓰고 읽는 시스템이다. 디스크의 회전을 위해 스피들 모터(spindle motor)를 사용하며 헤드의 추력을 보이시 코일 모터 (VCM)를 통해 얻는다. 서보 정보는 디스크 드라이브 제조사 서보라이터 (servo writer)를 사용하여 헤드의 위치 제어를 위해 서보 정보를 기록한다.

이산신호는 CODEC 시스템 (coding/decoding system)과 변복조 (modulation/demodulation)를 통하여 디스크에 기록 재생 된다. 이산신호는 기록시 오차정정코드 (error correcting code)를 통한 다음 애널로그 신호 (analog signal)로 변조 (modulation) 되어 헤드를 이용해 자기 디스크에 기록된다. 헤드의 위치정보는 demodulator timing control을 통해 Gray code와 servo burst로 구분되어 위치 결정하는데 사용된다. 호스트 컴퓨터 (host computer)와의 통신은 EIDE 또는 SCSI II 등과 같은 interface standard를 사용한다. 최근에는 한 개의 DSP chip을 사용하여 스피들 모터와 VCM 제어, 데이터의 coding/decoding, 호스트 컴퓨터와의 통신 등 모든 계산을 처리하는 시스템온칩 (system-on-chip)인 ASIC 구조를 이용하고 있다.

5.1 서보시스템 구조

디스크 드라이브의 서보 시스템을 기능별로 구분하면 크

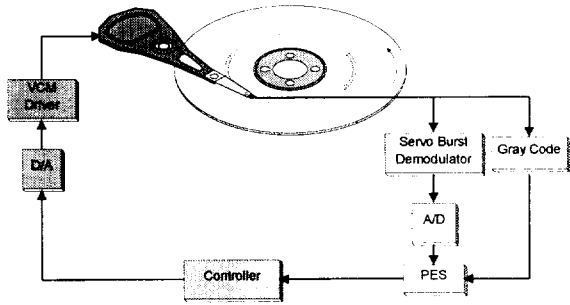


그림 3. 디스크 드라이브 서보시스템 구성도

게 다섯 가지로 구분할 수 있다. 첫째로, 자기기록을 위한 자성물질이 코팅된 디스크 (disk)와 디스크를 일정한 각속도로 회전을 시켜주며 지지하기 위한 스피들 시스템 (spindle system)이다. 둘째는 일정한 각속도로 회전하고 있는 자기 디스크의 면에 자기 신호를 이용하여 데이터를 쓰고 읽기 위한 자기헤드 (magnetic head), 헤드와 디스크 면 간의 거리를 일정하게 유지시키기 위한 슬라이더 (slider), 헤드와 슬라이더 어셈블리를 지지하고 원하는 위치(트랙)로 이동하기 위한 서스펜션 (suspension), 액츄에이터 암 (actuator arm) 그리고 추력발생을 위한 보이 코일 모터 (voice coil motor: VCM) 등 기구적인 부분이다. 셋째는 헤드에서 읽어들이는 신호로부터 헤드의 위치오차신호 (position error signal: PES)를 검출하기 위한 부분이다. 넷째는 PES를 이용하여 제어량을 연산하는 제어기 (controller)이다. 다섯째는 연산된 제어량에 따라 보이 코일 모터를 구동하여 원하는 추력을 발생시키는 D/A와 VCM driver 회로이다. 디스크 드라이브 서보 시스템의 기능별 구성도를 그림 3에 보였다.

디스크 드라이브는 일정한 각속도로 회전하고 있는 디스크에 동심원으로 데이터를 기록하고 읽는다. 데이터의 상호 간섭을 없애기 위해 동심원은 일정한 간격으로 떨어져 있는 데 이것을 트랙 (track)이라 부른다. 그리고 트랙 내에서 헤드의 위치를 알기 위해 일정한 각도로 트랙을 나누어 구분하는 데 이것을 섹터 (sector)라 부른다. 디스크 드라이브 서보 시스템은 디스크가 일정한 속도로 회전하면서 헤드가 매 sector를 지날 때마다 섹터 번호 (sector number), Gray code와 servo burst를 읽어들이는 데 Gray code로부터 헤드가 위치하고 있는 트랙번호 (track number)를 알 수 있고 servo burst로부터 off-track 량을 계산해 낸다. 이 두 가지의 신호로부터 헤드의 절대 위치를 계산하는 데 그 값을 PES라고 부른다.

5.2 헤드 (Head)

디스크 드라이브 시스템에서 헤드는 데이터를 쓰고 읽는데 중요한 역할을 한다. 고기록 밀도의 기록과 재생이 가능한 헤드의 개발이 먼기록 밀도를 높이는 데 있어서 결정적이다. 먼기록 밀도를 높이기 위해서는 우선적으로 헤드가

개발되어야 다른 문제들이 해결되기 때문에 미국과 일본에서는 자기저항을 이용한 고기록 밀도용 헤드의 개발에 박차를 가하고 있고 IBM이 이 분야기술에서 가장 앞서 있다. 작년까지만 해도 IBM을 제외하고는 인덕티브 형태 (inductive type)의 TFH (thin-film head)가 업계에서 가장 많이 사용되었으나 1997년에 들어서면서 점차 자기저항 헤드 (magnetoresistance head)의 시장점유율이 크게 증가하고 있다. 위치제어의 정밀도를 높이기 위해서는 위치 센서의 대칭성과 선형성이 보장되어야 한다. 그러나 MR 헤드가 off-track에 대하여 자기저항의 고유한 특성으로 인하여 비대칭성을 갖고 트랙의 pitch가 좁아짐에 따라 off-track에 대한 선형성이 나쁘다. 따라서 대칭성과 선형성을 유지하기 위한 MR 헤드구조, 서보 패턴 그리고 PES 보상방법 등에 대한 연구가 있다. 헤드의 개발은 미국 Carnegie Mellon University, UC San Diego 등 대학들과 IBM, Seagate, Quantum, Silmag 등에서 활발히 진행되고 있다.

5.3 스피들 시스템 (Spindle System)과 디스크 (Disk)

스피들 시스템에서 기구적으로 중요한 기술은 디스크의 진동을 최소화시키면서 제한된 공간 내에 많은 디스크를 적층하는 것이다. 스피들 시스템의 회전으로 발생하는 Non-Repeatable Runout (NRRO)가 데이터 신뢰도를 크게 저하시킨다. 현재 업체들은 스피들 시스템에 볼 베어링을 사용하고 있다. 그런데 NRRO의 대부분이 이 볼 베어링으로부터 야기 되므로 세라믹, 유체 또는 공압 베어링과 같은 다른 형태의 베어링에 대한 연구가 진행되고 있다. Seagate, Quantum 등에서는 유체 베어링을 이용하여 10,000rpm 이상의 스피들 시스템을 구성하는 연구를 하고 있으며 Synektron에서는 세라믹 베어링에 대하여 연구하고 있다.

5.4 슬라이더 (Slider)

자성물질이 코팅된 디스크는 일정한 각속도로 회전하는데 제품에 따라 4,000 rpm으로부터 10,000 rpm까지 다양하게 있다. 고속으로 회전하는 디스크와의 마찰을 회피하기 위해 헤드는 공기 베어링 구조를 이용한 슬라이더 (slider)에 부착되어 디스크와 약 35 내지 40 nm 정도의 flying height를 유지하면서 부상한다. flying height를 낮출 수록 먼기록 밀도를 높일 수 있어서 슬라이더의 공기 베어링 (air bearing) 구조에 대한 연구도 활발하다. 공기베어링에 대한 연구는 미국의 UC Berkeley와 Carnegie Mellon University 등 대학들과 IBM이 가장 활발하다.

5.5 Disk Texturing

디스크 면의 조도가 기록밀도를 높이는 데 중요하다. 디스크 면의 조도가 낮을수록 더 많은 데이터를 기록할 수 있다. 그러나 디스크 면의 조도가 일정한 수준이하로 떨어지면 디스크가 회전하지 않고 정지되어 있을 때 디스크 면

과 슬라이더의 면이 서로 흡착되어 디스크를 회전시킬 수 없게 만든다. 따라서 디스크가 회전을 멈추어도 헤드와 디스크간 흡착을 방지하는 장치가 없으면 어느 수준 이상의 조도를 유지하여 흡착을 방지해야 한다. 현재 사용되고 있는 데스크 톱과 workstation 용 컴퓨터에는 별도의 흡착을 방지하는 안전장치가 사용되지 않고 있다. 이러한 형태의 디스크 드라이브는 CSS (Contact Start and Stop) 형태로 스펀들이 정지된 상태에서 헤드가 디스크에 접촉하고 있다. 스펀들이 회전하면서 공기압에 의해 슬라이더가 부상하고 회전을 멈추면 공기압이 떨어져 다시 헤드가 디스크에 접촉하는 방식이다. 3.5인치 디스크 드라이브는 대부분 이 방식을 채택하고 있다. 반면에 노트북에 쓰이는 2.5인치 디스크 드라이브는 dynamic loading/unloading 형태인데 이것은 latch type의 보조기구물을 이용하여 디스크가 회전을 하고 있지 않을 때 또는 idling시 헤드를 디스크면 밖으로 보내어 충격에 의해 헤드나 디스크가 손상되는 것을 막는다. 그리고 디스크가 회전하면 디스크 면 안으로 헤드를 보내어 공압에 의해 헤드가 부상하게 만든다. 이 경우는 디스크 면의 조도를 낮게 만들 수 있으나 CSS 형태의 드라이브는 위에서 서술한 대로 헤드와 디스크간의 흡착을 방지하기 위해 디스크 면의 조도를 너무 낮게 만들 수 없다. 따라서 헤드가 디스크와 접촉하는 면은 조도가 높고 데이터를 기록하는 부분은 조도가 낮도록 부분적으로 조도를 다르게 디스크 면을 가공하는 방법이 있는데 이것이 zone texturing 방식이다. 그러나 lapping 방식으로 디스크 면의 조도를 가공할 때 zone texturing하는 것이 기술적으로 상당히 어려운 zone texturing을 실용화하는 것이 제한적이다. IBM은 laser를 이용하여 zone texturing을 하는 방법에 대하여 연구하고 있고 거의 실용화 단계에 이른 것으로 알려져 있다.

5.6 Actuator System

헤드와 슬라이더 어셈블리를 지지하는 서스펜션 (suspension) 과 액츄에이터 암 (actuator arm)은 측면방향 (lateral direction)으로 높은 강성을 가지면서 디스크와 접촉하는 수직방향으로는 유연하게 설계되어야 한다. 디스크가 고속으로 회전하면서 수직방향으로도 진동을 하는 데 수직방향 (Z direction)으로 유연하지 않으면 디스크 면과 헤드가 충돌하여 헤드에 치명적인 해를 줄 수 있기 때문이다. 측면방향의 강성은 서보 시스템의 대역폭 (bandwidth)과 크게 관계 있다. spindle의 pitch, head suspension assembly (HSA)의 flexible mode, actuator arm의 bearing에 일어나는 quasi-translation mode 등이 서보 시스템의 대역 폭을 높이는데 장애요인이다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 강성이 높은 HSA구조, VCM 구조, actuator arm 구조 등에 대한 연구가 Toshiba, NEC, 싱가포르 대학 등에서 진행 중이다.

7,000~8,000TPI 정도의 디스크 드라이브에서 요구하는 서

보의 대역폭 (bandwidth)이 500~600 Hz 정도이다. 25,000TPI를 달성하기 위해서는 트랙 피치 (track pitch)가 1 μ m되어야 한다. 따라서 트랙 추종 정도 (tracking accuracy)가 100 nm 이하이고 서보의 대역폭도 2~3KHz 정도 요구된다고 예측하고 있다. 그러나 현재 가장 많이 사용되고 있는 구조인 VCM 하나로 추력을 발생시키는 single actuator system의 구조로는 1KHz 이상의 대역폭을 만들어 내는 것이 쉽지 않다. 미국은 IBM, UC Berkeley, Caltech 등에서 MEMS 기술을 이용 piggyback type의 dual actuator 구조에 대하여 연구하고 있으며 일본은 Toshiba, Hitachi, NEC 등에서 Piezo구조를 이용한 dual actuator 구조에 대하여 연구하고 있다. MEMS 기술을 이용하여 제작된 것 중 가장 최근에 발표된 것이 1997년 6월 ACC (American Control Conference)에서 발표된 UC Berkeley에서 제작한 Micro-actuator로 대역폭이 2.0KHz로 저주파영역에서 60dB의 외란제거 (disturbance rejection)를 할 수 있는 구조이다. 한국에서는 대우 고등기술원이 한양대와 같이 MEMS 구조를 이용한 dual actuator에 대하여 연구하고 있다.

5.7 서보 패턴 (Servo Pattern)

헤드 위치를 알기 위해 현재 가장 많이 쓰고 있는 방식이 sector (혹은 embedded) servo 방식이다. 이 방식은 매 sector 앞부분에 Gray code와 servo burst를 사용하여 위치 정보를 기록하는 방식이다. Gray code는 discrete data가 modulation 되어 기록되어 있고 servo burst는 수 Mhz 주파수로 modulation 된 3개 내지 4개의 신호들로 조합되어 있다. 그림 4에 4개의 servo burst로 구성된 경우를 보였다.

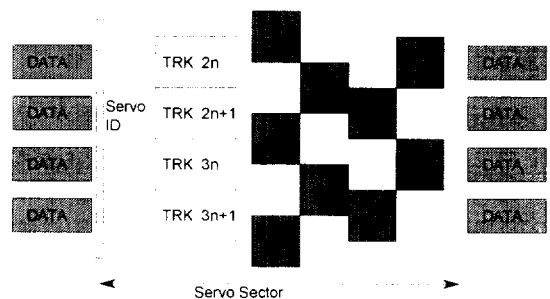


그림 4. Sector Servo와 Servo Burst

이 경우 4개의 servo burst를 조합하여 off-track 광을 계산하고 Gray code와 조합하여 위치오차신호 (position error signal : PES)를 계산한다. 이 때 각 burst가 off-track에 대하여 대칭적으로 일치하여야 하는데 MR (magnetoresistive) 헤드를 사용하는 경우 비대칭과 트랙의 간격이 좁아짐에 따른 간섭현상 등으로 인하여 높은 정밀도의 위치신호를 얻는 것이 어렵다. 이 문제를 해결하기 위해 Sony가 PERM을 개발하였고 Seagate사와 공동으로 제품화를 위한 서보시스템에 관하여 연구하고 있다. 그 외 Hitachi, IBM

등에서 디스크에 pit를 만들어 광학시스템을 보조적으로 사용하여 위치 신호의 정밀도를 높이는 방법에 대하여 연구하고 있다. 서보 패턴에 대한 중요한 원천 특허는 미국의 IBM이 상당 수 갖고 있으며 지속적으로 연구되고 있는 분야이다.

6. 제어기 구조

헤드의 위치를 제어하는 방법에는 크게 두 가지가 있다. 목표트랙 (target track)으로 찾아가는 seek와 목표트랙에 도착하여 트랙 중심선 (track centerline)을 따라 추종하는 track following이다. Seek의 목표는 최단 시간 내에 목표트랙에 도착하는 것이고 track following의 목표는 PES를 최소화하는 것이다.

6.1 Seek 제어기

Seek 제어기의 설계목표는 가청 주파수의 잡음 (acoustic noise)을 가능한 작게 하면서 최단시간내에 한 트랙에서 다른 목표 트랙에 도착하는 것이다. 최단 시간에 목표 트랙에 도착하기 위해 bang-bang 제어를 고려할 수 있으나 이상적인 시스템이 아닌 경우 플랜트와 모델과의 오차가 있을 때 사용하기 곤란하다. 서스펜션, flex cable, 피벗 베어링 (pivot bearing) 등에 존재하는 모델의 불확실성과 비선형 특성으로 액추에이터 시스템이 단순한 두 개의 일련의 적분기로 이루어진 2차 시스템이 아니기 때문이다. 뿐만 아니라 bang-bang 제어를 사용할 경우 전류의 급격한 변화가 일어나는데 이것이 서스펜션과 액추에이터에 있는 공진을 유발하여 가청 주파수의 잡음을 유발하므로 bang-bang 제어기는 seek 제어기 목적에 적합하지 않다. 그 뿐만 아니라 몇몇 플랜트 변수는 사용환경에 따라 공칭값에서 그 값의 변화가 10% 정도에 이르기 때문에 제품에 사용되는 제어기는 PTOS (proximate time optimal servomechanism)와 유사한 형태의 suboptimal controller을 많이 사용한다.

Seek 제어기는 목표 트랙까지 남은 거리와 현재 속도 등을 이용하여 제어방법을 결정하는데 일반적으로 4가지 mode로 구성되어 있다. 가속을 위한 acceleration mode, 등속도 운동을 위한 coasting mode, 감속운동을 위한 deceleration mode, 그리고 settling mode 등이다. 그림 5에 일반적인 seek 서보의 구성도를 보였다. settling mode에서 헤드가 일정한 조건을 만족하면 track following mode로 제어방식이 바뀐다.

seek 시 crash stop 사양과 Gray code를 통하여 읽을 수 있는 속도를 만족시키기 위해 최대 속도를 제한한다 (coasting mode). seek 시 smooth current profile을 사용

하는 것이 시스템 공진을 유발하지 않아 소음방지에 좋다. 노트북에 사용되는 2.5인치 디스크 드라이브에는 저 소음을 위한 매끄러운 (smooth한) 속도 profile 혹은 acceleration profile 등을 사용하고 있다. settling mode는 이상적인 아닌 경우를 위해 사용하는데 영이 아닌 초기조건 (non zero initial condition), 토크 바이어스 (torque bias) 등을 보상

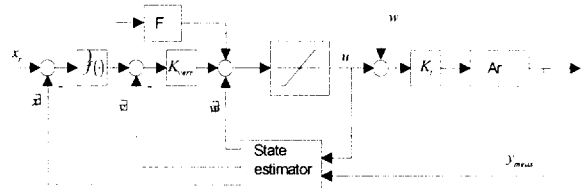


그림 5. 일반적인 Seek 서보 구성도

하는데 사용된다. settling mode를 사용함으로써 감속시 액추에이터 시스템 진동을 최소화하면서 플랜트의 불확실성 (uncertainty) 등에 의한 track misregistration을 최소화 할 수 있다.

seek 시 전술한 바와 같이 bang-bang 제어를 사용하지 않고 suboptimal한 PTOS와 같은 방식을 사용한다. 이때 헤드의 속도가 일정한 velocity profile을 따라서 추종하도록 설계한다. 그림 6에 velocity profile의 일 예를 보였다. x_t 는 목표 트랙까지 남은 거리이고, v_t 는 기준속도 (reference velocity), 그리고 x_l 은 선형 속도구간을 적용하는 거리를 나타낸다. 이 velocity profile은 액추에이터와 VCM의 전자기적 특성 그리고 전원 전압 (supply voltage) 등을 고려하여 설계한다.

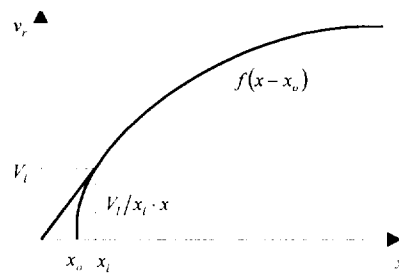


그림 6. 선형구간이 포함된 속도 profile

6.2 Torque Bias 제어기

settling과 track following 시 torque bias가 추종오차에 큰 영향을 미친다. torque bias의 원인으로서는 flex cable force, pivot friction 등이다. 이 torque bias는 비선형특성을 갖는데 온도와 트랙에 따라 값이 변화한다. 이러한 torque bias를 제대로 보상해주지 못하면 settling 하는데 시간이 오래 걸리거나 track misregistration하게 된다. torque bias

를 보상하기 위해 look-up table을 사용하거나 estimator를 사용한다.

6.3 Runout 제어기

Repeatable Runout (RRO)는 액츄에이터에 가해지는 외란 중 디스크의 회전주기와 일치하는 주기적인 성분으로 정의되는데, 주로 디스크의 편심, 서보 신호 기록시 헤드 위치의 변화, 그리고 디스크 회전진동에 의한 헤드 디스크 어셈블리 (head disk assembly: HDA)의 진동 등의 요인에 의해 유발된다. 이러한 주기적인 외란은 전술한 토오르크 바이어스와 달리 쉽게 제거되지 않아 이의 영향을 억제하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다. 지금까지 주기적인 외란의 억제방식에는 내부모델법칙(Internal Model Principle), 반복제어(repetitive control)등과 같은 방법들이 있다.

6.4 Track following 제어기

track following 제어기는 외란 (disturbance)에 대하여 견실 (robust)하고, 과도 잡음(transition noise)을 최소화하며, 데이터가 쓰여져 있는 트랙의 중심선 (centerline)으로부터 변화를 최소화하도록 설계된다.

디스크 드라이브의 트랙밀도는 track misregistration (TMR)에 의해 결정된다. TMR은 확률적 분포를 나타내는 것으로 두 가지면 (aspect)을 갖고 있는데 Write-to-read track misregistration (WRTMR)과 write-to-write track misregistration (WWTMR)이다. WRTMR은 데이터를 트랙에 기록하고 나서 각각의 off-track 위치에서 읽어 드린 데이터의 오차율 (bit error rate: BER)을 확률적으로 나타낸 것이다. WRTMR은 쓰여진 데이터로부터 읽을 때 허용되는 오차정도가 보장되는 off-track 양을 확률분포 곡선이다. WRTMR은 원인이 무엇이든 간에 읽은 데이터의 허용 비트 오차 (BER)를 보장하는 TMR이다 WWTMR은 기록된 트랙과 인접한 트랙사이에 있는 misregistration인데 트랙의 침식 (track encroachment) 혹은 track-to-track 밀착 (squeeze)을 가져온다. TMR의 원인으로는 스핀들의 runout, 디스크 공진과 디스크 flutter, thermal track shift, head settling, actuator interaction, 그리고 부적절한 서보 writing 등으로 알려져 있다. track following 제어기 설계 목표는 WRTMR과 WWTMR를 최소화하는 것이다.

track following 서보 설계에는 PID 제어기 설계방법과 상태공간 설계 (state space design)을 이용한 제어기 설계 방법이 쓰이고 있다. 설계 목표치는 gain margin (GM)이 약 6dB이상 그리고 phase margin (PM)이 37deg 이상 정도이다. PID 제어기를 사용하면 손쉽게 제어기를 설계할 수 있으나 수작업 (manual)으로 조율 또는 조정 (tuning or tweaking) 해야 하는 어려움이 있다. state space 설계방법

을 사용하면 극점 배치 (pole placement)나 LQG/LTR과 같은 방법을 사용하여 체계적으로 제어기를 설계하고 분석할 수 있는 장점이 있다.

7. 맺음말

이상으로 디스크 드라이브 기술의 동향을 제어기술 관점에서 서술하였다. 디스크 드라이브의 트랙밀도가 25,000TPI에 이르면 1 μ m의 좁은 트랙 내에서 위치추종 오차가 100nm 이하가 되는 초정밀 제어 시스템이다. 따라서 디스크 드라이브의 트랙밀도가 점점 높아짐에 따라 초정밀 제어 방식과 정밀 구동을 위한 액츄에이터 구조에 대한 연구가 필요하다. 그리고 위치신호 검출을 위한 서보패턴의 구조에 대한 연구와 서보패턴의 기록방식과 신호 검출 방법 등에 대한 연구도 중요하다.

정보저장기기는 컴퓨터 시스템에 필수적인 주변기기로 그 시장은 계속 발전할 것으로 기대된다. 따라서 21세기 정보화 사회로 진입하는 지금 HDD를 비롯한 정보저장기기관련 기술에 대한 정부와 학계의 관심이 더욱 필요하다고 판단된다.

참고 문헌

- [1] S.K. Aggarwal, D. Horsley, R. Horowitz, and A. Pisano, "Micro-actuator for High Density Disk Drives," in proceeding of ACC, Albuquerque, NM, USA, 1997.
- [2] L.R. Comstock and M. L. Workman, "Data Storage on Rigid Disk," Chapter 2 in Magnetic Recording, Vol. II, Ed. by Mee and Daniel, McGraw-Hill, pp. 19-129. 1988.
- [3] T. Doan, "디스크 드라이브 기술 세미나," KIST, 4월 1997년.
- [4] G.F. Franklin, J.D. Powell, and M.L. Workman, *Digital Control of Dynamic Systems*, Addison Wesley, 1990.
- [5] Y. Futamoto, et. al, "Investigation of 2 Gb/in² Magnetic Recording at a Track Density of 17kTPI," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 27, No. 6, pp. 5280-5285, Nov. 1991.
- [6] M. Ehrlich and J.V. Wiseman, "Disk Drive Having On-Board Triggering Digital Sampling Analyzer," US Patents: 5,444,583 Aug. 1995.
- [8] S. Hasegawa, Y. Mizoshita, T. Ueno, and K. Takai-shi, "Fast Access Control of the Head Positioning Using a Digital Signal Processor," SPIE Vol. 1248, Storage and Retrieval Systems and Application,

1pp. 1204-1248, 1990.

[9] F. Jorgensen, *The Complete Handbook of Magnetic Recording*, 4th Edition, TAB Books, New York, 1996.

[10] Y. Kaneda, "Advanced Optical Disk Mastering and Its Application for Extremely High-Density Magnetic Recording," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*. Vol. 42, No. 3, pp. 257-262, June 1995.

[11] S. Koganezawa, et. al, "A Flexural Piggyback Milli-Actuator for Over 5 Gb/in² Density Magnetic Recording," *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 32, No. 5, pp. 3908-3910, Sep. 1996.

[12] S.-H. Lee, S.-H. Chu, and C.C. Chung, "A New Approach to Servomechanism Design," to appear in *Proc. of IEEE Conference Decision and Control*, San Diego, CA, 1997.

[13] T.H. Lee, T.S. Low, A. Al-Mamun, and C.H. Tan, "Internal Model Control Approach for Designing Disk Drive Servo-Controller," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*. Vol. 42, No. 3, pp. 248-256, June 1995.

[14] D.K. Miu and Y.-C. Tai, "Silicon Micromachined SCALED Technology," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*. Vol. 42, No. 3, pp. 234-239, June 1995.

[15] H.M. Sierra, *Introduction to Direct Access Storage Devices*, Academic Press, 1990.

[16] L.-S. Sheng, H. H. Ottesen, T. C. Reiley and R. W. Wood, "Magnetic Recording Head Positioning at Very High Track Density Using a Microactuator-Based Two-Stage Servo System," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*. Vol. 42, No. 3, pp. 222-233, June 1995.

[17] M.L. Workman, "Digital Servo Control System for Data Recording Disk File," US Patents No. 4,679,103, July, 1987.

[18] S. Weerasooriya and D.T. Phan, "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.

[19] D. Williams and S. Balasingam, "Why Rotary Actuators Behave the Way They Do, Data Storage," pp. 43-48, November/December, 1995.

[20] R. Wood, "The Achievement of Very High Track-Densities in Rigid Disk Drives," *International Disk Forum 95*, Harumi, Japan, April 13-14, 1995.

[21] N. Yoshikawa, "An Experiment for Head Posit

ioning System Using Submicro Trak-width GMR head," *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 32, No. 5, pp. 3905-3907, Sep. 1996.

[22] DISKCON USA '96, International Technical Conference, Sep. 25-26, San Jose, CA.

[23] DSSC (Data Storage System Center), Annual Report, Carnegie Mellon University, 1996.

[23] 정보기기의 동역학, 제어 및 진동 기술 동향, 1997년도 대한기계학회 동역학 및 제어부문 춘계학술대회 논문집, 1997년 5월 10일, 서울대학교.

[24] 김정환 외 5명, "Nonlinearity를 갖는 Micro Electrostatic actuator의 초정밀 추종제어," 한국자동제어학술대회 논문집, 서울, pp. 464-467, 1997.

저 자 소 개



정정주 (鄭正周)

1958년 9월 5일생. 1981년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 미국 남가주대 전기공학과 졸업(공학). 1983년 1월-1985년 11월 LG 전자 중앙연구소, 1985년 11월-1987년 6월 한국 IBM IPO, 1993년 10월-1994년 2월, 미국 Univ. of Colorado at Boulder, Research Associate, 1994년 3월-1997년 2월 삼성종합기술원 정밀기계연구실 팀장. 1997년 3월-현재 한양대 공대 전자전기공학부 조교수. 주요관심분야 : 비선형제어, 다변수연실제어, 디지털 서보, 정보저장기기, 로봇틱스, 자동차제어시스템



이승희 (李承熙)

1963년 2월 24일생. 1985년 고려대 공대 기계공학과 졸업. 1987년 서울대 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1993년 Univ. of Michigan 기계공학과 졸업(공학). 현재 삼성종합기술원 전문연구원. 주요관심분야 : 다변수연실제어, 디지털 서보, 자동차 제어 등.



추상훈 (秋相勳)

1966년 4월5일생. 1990년 서울대 공대 제어계측공학과 졸업. 1992년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(공학). 현재 삼성종합기술원 전문연구원. 주요관심분야 : 비선형제어이론 및 디스크 드라이브, 자동차등에 대한 응용.