

# 하드디스크 드라이브 개발과 관련된 기계기술

- 글 ■ 황 태 연 / 삼성종합기술원, storage lab., 수석연구원
- 강 성 우 / 삼성종합기술원, storage lab., 책임연구원
- 한 윤 식 / 삼성종합기술원, storage lab., 책임연구원
- 오 동 호 / 삼성종합기술원, storage lab., 책임연구원

e-mail ■ thwang@samsung.co.kr

이 글에서는 하드디스크 개발에 관련된 여러 기술에서 기계 기술 관련 기술에 한정하여 크게 기록 밀도 관련 기술과 제품 품질 관련 기술로 나누어 현장 개발에서 응용된 사례를 소개하고자 한다

최근 디지털 멀티미디어 분야가 급속히 발달하면서 이에 따른 대용량 미디어 파일 저장에 위한 저장 매체 역시 대용량화, 고속화 과정을 지나고 있다. 현재 사용되고 있는 저장 매체는 트랜지스터 IC기술과 실리콘 가공 기술에 기초한 '반도체 칩,' 광 기술과 정밀 회전 기계 기술에 기초한 '광 디스크 드라이브(ODD : Optical Disk Drive),' 자기 기술과 정밀 회전 기계 기술에 기초한 '하드디스크 드라이브(HDD : Hard Disk Drive)'가 주요 매체로 볼 수 있으며, 각 기술 분야가 그 용량과 속도에서 급속히 발전하고 있다. 기계공학을 전공한 엔지니어의 입장에서, 위 모든 기술들이 비록 근간을 이루는 기초 물리 원리는 다르지만 모두 '정밀 가공·기계 기술'에 기초하고 있음을 주목할 필요가 있다. 또한, 21세기 현재 현존하고 있는 저장 매체 중 대용량 디지털 멀티미디어 데이터 저장 목적으로 볼 때, 가격대 저장률 입장에서 '하드디스크' 매체가 단연 선두의 위치에 있으며, 이러한 현실적인 수요의 급속한 증가로 인해 하드디스크 드라이브 기술은 최근 수년간 가격은 꾸준히 하락하였음에도 그 저장 용량은 디스크당 수 기가 바이트(giga byte)에서 수십 기

가 바이트로 몇 십 배 증가하는 개발 추이를 보이고 있다<sup>(1~3)}</sup>. 또한 일반인의 상식과는 달리 반도체와 ODD의 경우에는 현재 마이크로 영역(micro-scale)에서의 배선 및 저장 밀도를 갖고 있는 반면, 하드 디스크 드라이브의 경우에는 나노 영역(nano-scale)의 저장 밀도로 데이터를 저장하고 있는 상태로 보다 난이도 높은 정밀 기계/가공 기술을 요구하고 있다.

하드디스크 분야의 데이터 고밀도화를 달성하기 위한 노력은 크게 두 방향으로의 연구가 현재 병행적으로 활발히 진행되고 있다. 첫째로는, 데이터가 기록되는 디스크 미디어의 원주방향으로의 저장 밀도 증대를 위한 비트기록밀도(bits per inch) 증가 기술이 그 한 방향으로 수직 자기 기록(perpendicular magnetic recording) 방식 등에 대한 연구<sup>(4)}</sup>가 그 한 예라 할 수 있다. 둘째로는, 기존의 수평 자기 기록 방식을 유지하면서 반경 방향으로의 저장 밀도를 증대시키는 연구로서 트랙 기록 밀도(tracks per inch) 증가 기술이 또 한 가지 방향이라 할 수 있다<sup>(5)}</sup>. 전술한 두 방향의 기록 밀도 증가 기술에서 공통적으로 디스크와 헤드 사이의 기계적인 진동(mechanical



vibration)의 그 상대적인 레벨이 매우 중요한 인자로 작용하게 된다. 특히 트랙 기록밀도 증가 기술 측면에서는 헤드와 디스크의 데이터 트랙 사이의 위치 에러에 기인한 진동에 의한 트랙 오차(track misregistration)을 줄이는 설계부분이 하드디스크 플랫폼 설계의 핵심을 이루고 있다.

하드디스크 분야의 이러한 대응량화·고속화·저가화 과정에서 필수적으로 HDD 정밀 기계 시스템 내에 많은 불안정 요소들이 발생하고 있다. 제품의 품질(quality) 측면에서 중요한 연구 분야가 소음 제어 기술과 충격제어 기술이다. 특히 최근에는 하드디스크가 개인용 컴퓨터(PC)뿐 아니라 디지털 텔레비전 등의 홈어플리케이션(home-application) 전자 제품의 대용량 기록 장치로까지 급격하게 파급되고 있어 소음 문제는 하드디스크 판매에 있어 매우 중요한 항목으로 등장하고 있으며, 하드디스크의 회전속도가 이미 15,000rpm의 고속 회전 제품이 출시되고 있는 상황에서 개인용 컴퓨터 제조 업체들로부터의 하드디스크 업체에 대한 소음 규격(specification)은 오히려 더욱 엄격해지고 있다. 최근의 일부 PC 업체들은 소음 성능을 하드디스크 납품 업체를 선별하는 하나의 기준으로 삼는 등 HDD 업체간 소음 성능 경쟁이 매우 치열한 상태이다. 최근의 한 대형 PC 업체는 소음 레벨뿐만 아니라 'Sound Quality' 제어까지 요구하고 있어 하드디스크 개발자들을 더욱 어렵게 하고 있다. 또한 소음 제어 분야와 함께 하드디스크의 내 충격 성능의 향상을 요구하는 경향이 계속적으로 상향 조정되고 있다. 이는 하드디스크에 가해지는 손상이 자주 현장 조립 라인이나 컴퓨터 업체에서 조립하는 과정에서 일어나고 있기 때문이다. 이러한 작업 중 주로 금속과 금속 접촉에 의해 하드디스크가 받는 치명적인 충격 입

력은 대략 0.2~0.5ms 정도의 짧은 듀레이션(short-duration) 충격에 의해 일어나고 있다. 이때 가장 일상적으로 하드 디스크가 손상을 입는 파괴 메커니즘은 헤드-슬랩(head-slap)과 관련되어 있으며, 이는 충격을 받은 서스펜션 끝 단의 헤드가 디스크로부터 Lift-off하고 나서 디스크와 충돌하는 현상을 말한다. 헤드-슬랩에 의해 헤드 일부에 균열(crack)이 생길 수 있고, 헤드에서 떨어진 파편 조각은 기록, 재생시에 하드디스크에 치명적인 오동작을 일으킬 수 있다. 따라서 대부분의 데스크탑용 하드 디스크 업체의 충격 스펙은 150~400G의 충격치와 0.5~2ms의 짧은 충격 듀레이션(duration)에서 견딜 수 있는 제품 개발을 위해 충격 현상을 규명하고, 이를 예측할 수 있는 섬세한 모델을 개발하는 일에 많은 노력을 기울이고 있다.

이 글에서는 하드디스크 개발에 관련된 여러 기술에서 기계 기술 관련 기술에 한정하여 크게 기록 밀도 관련 기술과 제품 품질 관련 기술로 나누어 현장 개발에서 응용된 사례를 보이고자 한다.

### 기록 밀도 증가와 관련된 기술

하드디스크의 구조는 일반적으로 그림 1과 같이 나타낼 수 있으며, 기록 매체인 자기 디스크와 이를 정격 회전속도로 회전시키는 스피들 모터 시스템, 데이터를 읽고 기록하는 헤드와 이를 구동하는 액추에이터, 그리고 이를 고정하는 구조물로 되어 있다.

2002년도 업계에서 개발되어 양산되고 있는 3.5인치 하드디스크의 기록밀도는 60Gbits/in<sup>2</sup>(80GB/platter)이며, 이에 해당하는 트랙밀도는 대략 93kTPI(Track Per Inch)에 해당한다. 트랙 폭은 300nm 이하이고, 헤드에서 읽어 들인 신호로부터 헤드

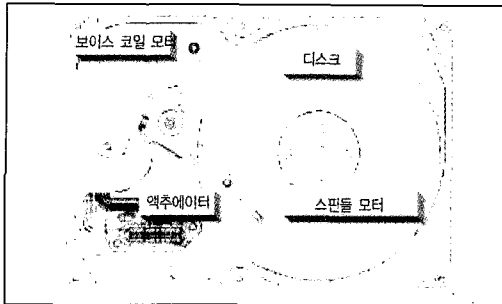


그림 1 HDD의 단순한 기계적 구조

의 위치오차신호(PES : Position Error Signal)를 검출하여 달성해야 하는 위치제어 정밀도는 약 10nm 이하가 요구된다.

**유체 베어링 지지 스피들-디스크 동특성**

2002년 이후 개발되고 있는 하드디스크용 스피들 모터의 베어링은 볼 베어링에서 유체베어링(fluid dynamic bearing)로 대체되고 있으며, 2003년 이후 거의 모든 하드디스크에 적용될 것으로 예측하고 있다. 그림 2는 3.5인치 디스크 두 장으로 구성되는 스피들 시스템에서 LDV로 측정한 축방향 진동 스펙트럼이다. 설계에 사용된 스피들 모터는 그림 3에 나타낸 바와 같은 유체 베어링(FDB)을 적용하고 있으며, 반경 방향 지지에는 Herringbone Groove의 저널 베어링을 축의 상부와 하부 두 개소에 두었고, 축 방향 하중 지지에는 Spiral Groove를 사용하는 원판 구조의 트러스트 베어링을 채용하였다<sup>(6)</sup>. 그림 2에서 나타낸  $mF$ (or  $B$ )( $m$  : 정수)의 진동 모드들은 각각  $(m,0)$ 개의 (Nodal Diameter, Nodal Circle)을 갖는 디스크 모드들을 표현하고 있으며, LDR과 UDR은 스피들 모터와 디스크의 강한 연성에 의해 형성되는 저차 락킹 모드(lower rocking mode)와 고차 락킹 모드(upper rocking mode)를 각각 나타내고 있고, 유체 베어링의 매우 큰 감쇠 특성으로 인해 락킹(rocking) 모드의 절대적인 크기가 볼

베어링 지지 스피들에 비해 매우 작은 수준을 보여준다<sup>(6)</sup>. 스피들-디스크 시스템의 편심 및 불 균일성 등에 의해 발생하는 회전 주파수의 조화성분(harmonics)들을 제외하면, 대부분의 디스크 모드 에너지들이 700Hz~1.5kHz 사이에 집중되어 있음을 볼 수 있다. 또한 볼 베어링 채용 스피들의 경우에 볼과 궤도륜에 존재하는 결함 성분들로 인한 조화(harmonic) 성분이 전 주파수 영역에 존재하게 되나 유체 베어링을 사용한 경우에는 그림 2에 보여 주는 것처럼 이러한 결함 주파수 성분들이 나타나지 않는다. 최근에는 디스크 진동을 줄이기 위한 방법으로 Squeeze-film 댐핑효과를 디스크에 주기 위하여 디스크와 일정한 간격을 유지하도록 디스크 댐퍼 설계가 효과적으로 구현되었다<sup>(7,8)</sup>.

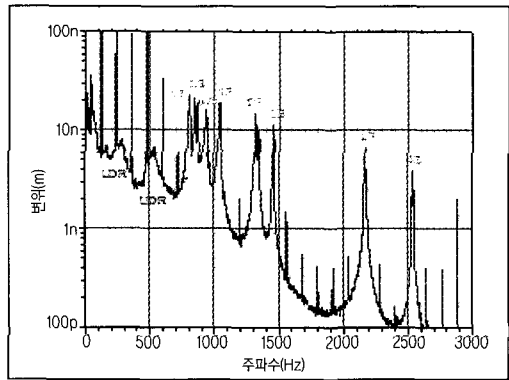


그림 2 디스크의 진동 스펙트럼 (외주, 7,200rpm)

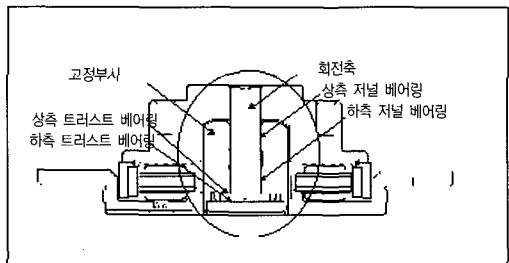


그림 3 유체역학적 스피들 모터의 구조

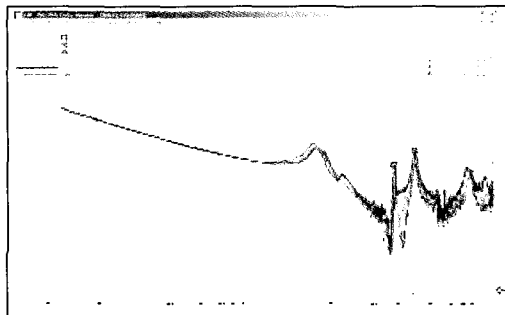


그림 4 헤드-스택-어셈블(HSA) 시스템의 전달함수

### 헤드-스택-어셈블(HSA)의 동특성

스핀들-디스크 시스템과 더불어 디스크 드라이브의 또 하나의 중요한 부분인 HSA 시스템의 동특성을 파악하기 위하여, 그림 4는 VCM 드라이브 신호를 입력으로 하고 LDV를 사용하여 측정한 HSA Top Head의 횡 방향 진동 신호(radial vibration)를 출력으로 하는 시스템 전달 함수를 보여 주고 있다.

그림 4에서 볼 수 있듯이 4.3~4.6kHz 대역에 피벗(pivot) 베어링, Fantail, Arm Blade와의 연성에 의해 발생하는 액추에이터의 버터플라이 모드(butterfly mode)가 있음을 알 수 있으며, 8kHz 이상의 고주파수 대역에서 액추에이터와 서스펜션의 독립 모드 및 연성 모드들이 다수 존재함을 알 수 있다. 특히 버터플라이 모드는 서보 시스템의 대역폭을 높이는 데 장애 요인이며, 이를 개선하기 위한 강성이 높은 HSA 구조, VCM, 액추에이터 구조 등의 연구가 활발히 진행되고 있다. 한편으로는 단일 액추에이터 시스템에서 벗어나 피에조(piezo)나 MEMS 기술을 이용한 듀얼(dual) 액추에이터 시스템으로의 전이가 성능적인 측면뿐만 아니라 신뢰성 측면에서 활발히 진행되고 있다<sup>9)</sup>. 또한 TMR 관점에서 기존의 서스펜션이 디스크(축 방향) 진동에 대해 상하 운동을 하여 헤드의 오프-트랙이 필연적으

로 발생 하지만 서스펜션이 디스크 진동에 대해 상하 운동과 동시에 디스크 반경 방향 운동을 할 수 있도록 서스펜션에 바이어스 각을 주어 헤드의 오프-트랙에 대한 PES를 감소시킬 수 있는 연구가 진행되고 있다<sup>10)</sup>.

### 서보 동특성과 PES 예측 프로세스

전술한 스핀들-디스크 시스템, HSA 시스템과 더불어 디스크 드라이브의 최종 TMR 성능을 지배하는 또 하나의 시스템이 서보 시스템이라 할 수 있다. 서보 시스템은 스핀들-디스크 시스템으로부터의 외란 에너지(disturbance energy)와 HSA 시스템 에너지의 제어가능성(controllability) 사이에서, 기구적 진동 에너지 분포를 PES 입장에서 최소화시킬 수 있도록 에너지 분포를 조정하는 일종의 중재자 역할을 한다고 볼 수 있다<sup>11)</sup>. 그림 5는 하드디스크 서보 시스템의 블록 선도를 플랜트(plant), 제어기(controller), 및 외란(disturbances)로 표현된 하나의 단일 입출력 블록 선도로 나타낸 것이다.

피드백제어루프는 제어기(C), 플랜트(P)로 구성되며, 외란은 크게 입력 토크 외란(input torque disturbance(w)), 출력 변위 외란(output displacement disturbance(d)) 및 측정 잡음(measurement noise(n))로 대변할 수 있다. 입력 토크 외란(input torque disturbance)에는 하드디스크 내부에서 발생된 유도 흐름에 의한 압력(internal aerodynamic pressure)가 진에 의한 HSA 진동, 하드디스크 외부에서 들어오는 외부 충격/진동(external shock/vibration)에 의한 HSA 진동, 플렉스 케이블 동특성(flex cable dynamics)을 통해 전파되는 HSA 진동, 유연케이블(flex cable) 및 피벗 베어링(pivot bearing) 등에 의한 편향 토크(bias torque), Power



Amp Offset 및 DAC Resolution 등이 있다. 출력단 변위 외란(output displacement disturbance)에는 스피들 모터, 베어링, 디스크가 모두 연성 되어 발생하는 스피들-디스크 진동(spindle-disk vibration), 프랜트(plant)의 입력단(즉, VCM)을 통하지 않고 외란에 의해 가진되는 HSA 진동 및 Written-in RRO 등을 생각할 수 있다. 그림 6은 1,100Hz 대역폭(bandwidth)을 가진 서보 시스템의 에러 감도함수(error sensitivity function)의 한 예이다. 이는 디스크 진동의 외란(disturbance)에 대한 PES의 감도(sensitivity)를 나타내며, Track-Following PES와 가장 관련이 깊다 (12~14).

그림 6에서 500Hz 이하의 네 개의 주파수에서의 딥(dip)은 4차까지의 회전주파수

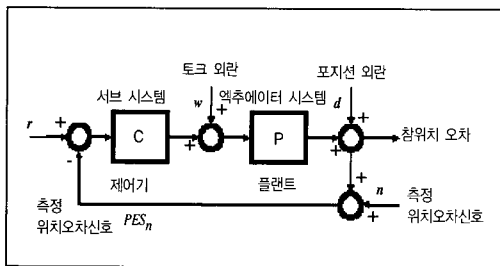


그림 5 하드디스크 연성 시스템의 기계적 서보의 블록선도

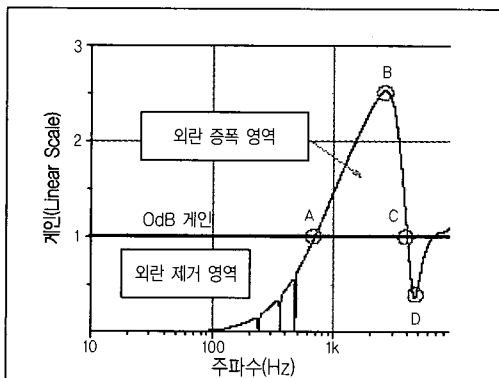


그림 6 대역폭 1,100Hz에서 서보 시스템의 일반적인 에러 감도 함수

조화성분(harmonics)와 관련된 RRO (Repeatable Runout)을 제거하기 위한 부분이고, D(4.5kHz) 부분의 디프는 전술한 4.5kHz 대역의 액추에이터(actuator) 공진을 표현하기 위한 2차 시스템 모델을 서보의 액추에이터 모델의 기본적인 형태인 강체 관성(rigid-body Inertia) 모델에 추가적으로 넣음으로써 발생한 것이라고 볼 수 있다. 그러나, 에러 감도 함수(error sensitivity function)의 개념상(PES/disk disturbance), 그림 6의 감도 선도(sensitivity curve)의 4.5kHz대역 Dip에 의하여 액추에이터의 4.5kHz 공진이 PES에서 제거될 것으로 볼 수는 없다고 할 수 있다. 단지, 디스크 진동 에너지에 이 주파수 대역 성분이 크게 존재하는 경우 서보 시스템이 효과적으로 이 대역을 감소시킬 수 있음을 의미하게 된다. 그림 6의 에러 감도 커브로부터 알 수 있는 가장 중요한 사실은, 어떠한 서보 시스템을 설계하더라도 일정주파수 A(696Hz) 이하의 저주파수 대역은 효과적으로 디스크 진동에너지 외란을 제거시킬 수 있는 반면, 반드시 A(696Hz)와 C (4.012kHz) 지점과 같이 게인(gain) 0dB를 Crossing하는 주파수가 존재하게 되며, 이 주파수대역에 대하여는 디스크 진동 에너지를 최대 지점 B(2.642kHz)를 중심으로 하여 오히려 증폭시켜 PES에 포함시키게 된다는 사실이다. 점이 바로 최근의 디스크 드라이브 설계에 있어서 TPI 기록밀도 향상을 가로막는 가장 큰 이유 중 하나로 볼 수 있으며, 그 주된 이유는 앞 절에서 전술한 그림 2와 같은 주요 디스크 진동 에너지 대역과 본 절의 그림 6과 같은 대부분의 디스크 드라이브 시스템에서 사용되는 서보의 외란 증폭 대역이 상당히 중복되어 있고 그 양을 더 이상 무시하기 어려운 TPI 수준이 현실적으로 필요하기 때문으로 볼 수 있다. 그림



7과 8은 93kTPI의 Track 밀도를 갖는 7,200rpm/FDB(Fluid-Dynamic Bearing) 스피들 모터를 채용한 HDD의 NRRO(Non-repeatable Runout ; 비주기성) PES와 RRO(Repeatable Runout ; 주기성) PES 예를 보여주고 있다. 그림 7의 NRRO PES는 주로 스피들 디스크 진동과 HSA(Head-Stack Assembly)의 진동 및 PES를 감지하는 센서 동특성(sensor dynamics)로 총괄되는 측정 잡음으로부터 발생한다. 여기에서 스피들 디스크(spindle-disk) 진동은 서보 제어기(servo controller)가 외란을 증폭하는 주파수 대역인 600Hz~3kHz 사이에 밀집됨으로써 이 대역 PES 피크(peak)의 대부분을 차지하고 있음을 알 수 있다. 반면, HSA 진동은 주로 디스크 회전에 의해 드라이브 내에서 발생하는 공압(aero-dynamic pressure)에 의해 가진되며, 600Hz 이하의 저주파수 PES 에너지와 1.5kHz 이상의 고주파수 진동을 형성하게 된다. 또한 PES 측정 잡음은 전 주파수 대역에 걸쳐 광대역 PES 스펙트럴 에너지(spectral energy)를 갖게 된다.

반면, 그림 8의 RRO PES의 경우 그 스펙트럼만으로 각 PES 에너지의 물리적 의미를 직접 추정해 내기가 매우 어렵다. 다만, NRRO PES에서와 마찬가지로 약 4 kHz 이내의 RRO PES가 주된 에너지를 가짐을 알 수 있음을 직관적으로 알 수 있다. 최근 진행되고 있는 연구의 결과로서, 각 주파수 성분들이 어떠한 기계적 진동에 의해 기인된 것인지, 어느 정도의 기여도를 지니고 있는지를 파악할 수 있게 되었다. 또한 RRO PES 추정(estimation)의 경우, 서보 기록 및 하드디스크의 서보-기계(servo-mechanical) 정보들을 연성시켜 예측할 수 있음을 보였으나, 좀더 정밀한 예측을 위한 연구가 필요하다<sup>(15)</sup>.

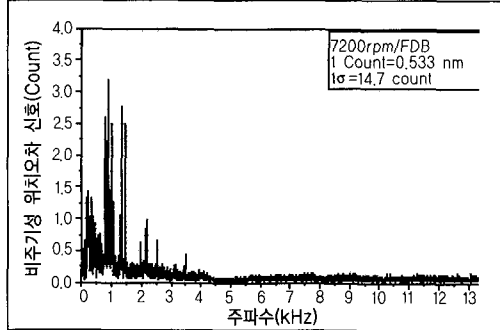


그림 7 NRRO PES of 93kTPI/7,200rpm FDB-HDD

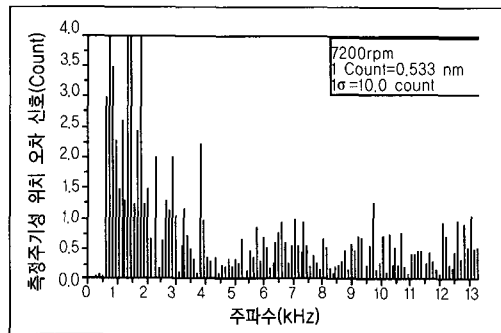


그림 8 RRO PES of 93kTPI/7,200rpm FDB-HDD

## 제품 품질 향상과 관련된 기술

### 소음제어

하드 디스크의 소음은 일반 기계 구조물의 소음에 비하여 그 절대 음압이 매우 낮은 편(약 20dBA~35dBA)이나 사용자가 하드 디스크를 근접위치에서 사용하게 되고, 그 소음성분 역시 인간의 민감한 가청 대역인 1~5kHz 성분들이 지배적이기 때문에 더욱 철저한 소음 제어가 필요하다고 할 수 있다. 뿐만 아니라 세계 시장을 주도하고 있는 대형 컴퓨터 업체들은 일반적으로 널리 사용되는 원음장(farfield)에서의 특정 지점의 음압 레벨(예 : 1m 지점에서의 음압 레벨)이 아닌 음원의 전체 음향 방사 파워를 규제 기준으로 제시하고 있어 음향학적으로 '전



방향 취약 음향 방사체 : Globally Weak Sound Radiator' 구조설계 문제로 집약된다<sup>(16~19)</sup>.

하드 디스크에서의 소음은 디스크와 체결된 스피들 모터의 회전운동으로부터 시작된다. 이러한 원인으로부터 외부장으로 전파되는 소음은 스피들 모터로부터 직접 방사되는 소음(direct radiation)과 스피들 모터를 지지하는 베이스 및 커버 등의 기구적 구조물을 가진 시커 발생되는 구조 기인 소음(structure-borne noise) 및 디스크의 회전으로 발생한 공기유동에 의한 소음이 내부 인클로저 공간의 음향 모드 및 커버, 베이스 판 구조와 연성되어 외부 장으로 투과 전달되는 공력 기인소음(air-borne noise)으로 구성된다고 할 수 있다. 이러한 소음은 모터 회전 속도, 발생 유동장 및 시스템의 기하학적 크기 및 형상에 따라 주파수 별로 각기 다른 분포를 보이며, 이에 따라 소음원의 공간적 위치 역시 바뀌어 나가게 된다고 할 수 있다.

그림 9는 HDD 구동상태에서 근접장 방사 음향 인텐시티를 3차원 측정을 한 후 관심

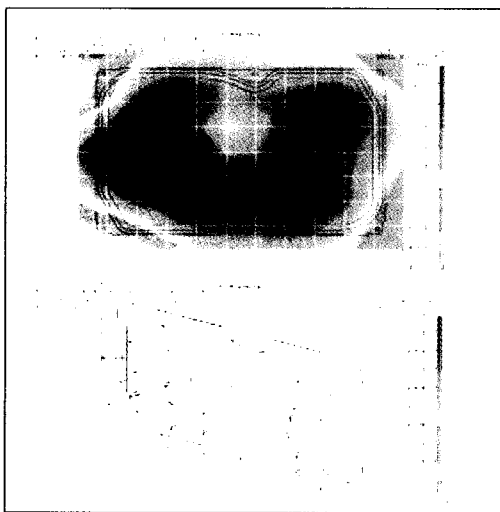


그림 9 음압 세기의 분포(주파수대역: 10Hz~10kHz)

주파수 대역 전체에 걸친 10Hz~10kHz까지의 음향 인텐시티 벡터를 벡터 합한 전 주파수 대역에 대한 음향 인텐시티 분포를 나타내는 컨투어 맵(contour map)과 벡터 맵(vector map)을 보여주고 있다. 인텐시티 Map을 통하여 진동원으로 볼 수 있는 스피들 위치 중심에서 벗어난 둥근 환 형태로 인텐시티가 방사되고 있음을 볼 수 있다.

소음 제어 과정은 우선적으로 소음 스펙트럼으로부터 제어하고자 중요 주파수 성분들에 대해 각 주파수 별로 분석을 하였다. 그 다음, 인텐시티 분포로부터 주파수 별로 소음원의 공간적 위치를 파악함과 동시에, 소음원의 동적 거동을 파악하기 위하여 ODS(Operational Deflection Shape) 측정 결과를 각 주파수 별로 모두 분석한 후, 구조물 재질의 차음 성능 측정 결과를 함께 고려하여 효과적으로 소음 방사 효율을 떨어뜨리는 'Weak Sound Radiator' 구조물이 될 수 있도록 하드디스크 커버(cover)에 그림 10과 같이 부분소음방벽(partial noise barrier)을 설계하였다<sup>(17)</sup>. 이러한 부분 구조물 설계시 특히 신중을 기한 부분은 설계 후 구조 진동 모드 변화를 살펴 부분 소음 방벽 삽입 후 원치 않은 다른 가진 주파수가 오히려 크게 발생될 수 있는 가능성을 상세히 검토할 필요가 있었다. 또한 소음 제어를 효과적으로 하기 위하여, 전면에 걸친 방벽형상보다는 가장 필요로 하는 부분에 필요한 형태로 부분적으로 구조물을 보강하여 전체적으로 효과를 극대화시킬 수 있도록 하였다.

그림 11은 주파수 특성에 맞추어 선정된 흡음재와 부분소음방벽을 설계/ 적용 전, 후의 음압 스펙트럼(sound pressure spectrum) 변화를 보여 주고 있다.

초기의 설계 주파수 대역인 1.8kHz~3kHz 대역의 소음 스펙트럼(spectrum) 성분들이

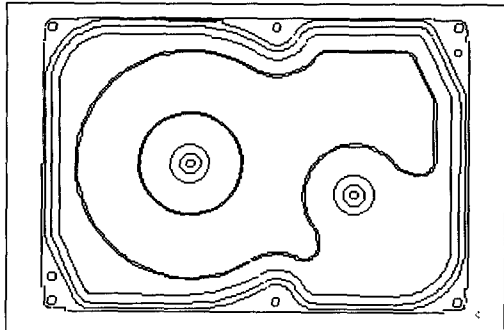


그림 10 하드디스크의 소음에 대한 'U'-Shape Partial Noise Barrier

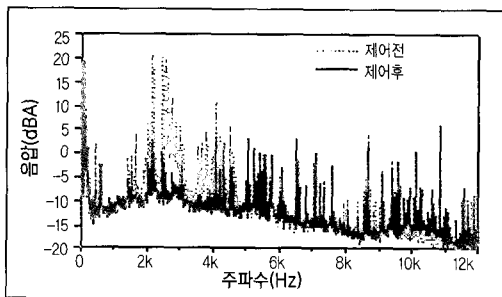


그림 11 소음제어 전과 후의 1m에서의 음압 스펙트럼(SPL before control : 28dBA, SPL after control : 20dBA

크게 떨어졌으며, 1m 전방에서의 전체 음압 레벨이 1m 28dBA에서 20dBA로 8dBA의 저감을 달성할 수 있었다<sup>17)</sup>.

소음 제어를 위한 실험적 분석 기법들을 더욱 정교하게 활용하고, 병행적으로 소음 시뮬레이션 기법을 활용 하기 위한 연구가 진행되었고, 그림 12는 기본적인 흐름도를 보여준다<sup>20)</sup>.

### 충격제어

외부 충격에 대해 하드디스크 시스템의 특성을 각각의 요소들이 서로 연성된 구조로 단순화시킬 수 있다. 즉 충격의 초기 전달은 주로 베이스·커버 구조를 지나 액추에이터와 디스크·스핀

들 시스템으로 각각 전파된다고 볼 수 있다. 특히 액추에이터의 피봇 베어링을 거쳐서 액추에이터 암과 서스펜션으로 연속적으로 전파되는 경로는 충격 현상과 가장 직접적인 경로로 파악된다. 한편 디스크·스핀들 구조를 거치는 경로 역시 무시할 수 없으나 상대적으로 그 중요성은 떨어진다고 할 수 있다. 최종적으로 서스펜션을 통과한 충격파는 디스크와의 상대운동을 통하여 헤드슬랩 현상이 발생한다<sup>21)</sup>.

하드디스크의 충격 입력과 그 응답은 본질적으로 과도(transient) 특성을 가지며, 그에 따른 응답 특성도 시간과 공간상에 국소화(localization) 되어 전파되어 나아간다. 따라서 충격 신호가 전파되어 갈 때 각각의 구성 요소들의 특성을 파악하기 위하여 시간-주파수 해석 방법을 사용하여 하드디스크 충격 특성을 규명하였다. 그림 13은 베이스 피봇점의 충격 응답 신호를 시간-주파수 영역에서 해석한 결과의 한 예제이다. 그림 13의 아래 그림은 측정된 과도 가속도 신호이고 왼쪽 위에 있는 그림은 파워 스펙트럼이다, 피봇점의 응답은 1ms부터 3ms 사이에 약 2kHz 근방에 지배적인 운동이 일어

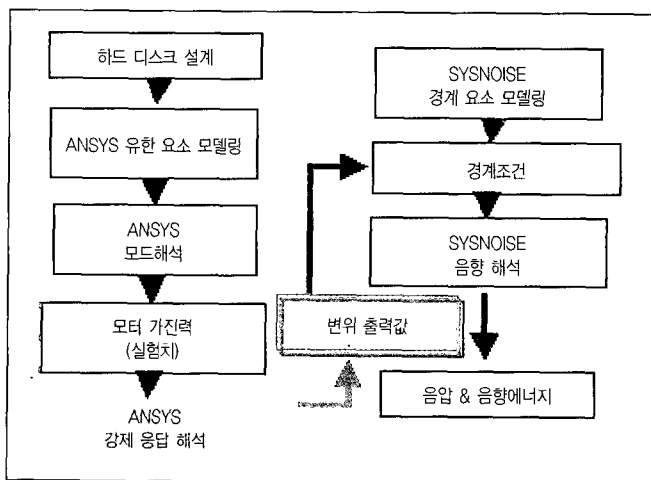


그림 12 소음제어 시뮬레이션 흐름도



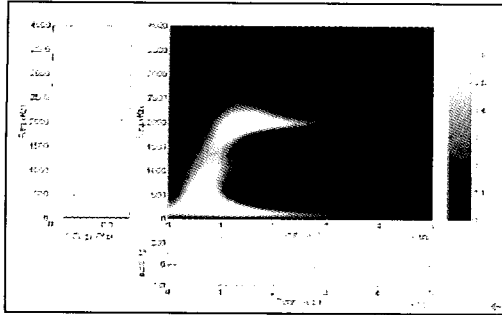


그림 13 90mm의 틸트 충격 테스트 동안 피봇 베어링의 가속도 신호의 시간-주파수 분해

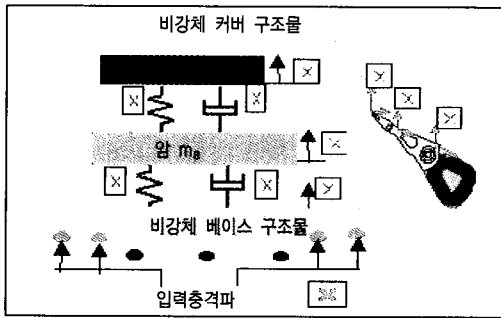


그림 14 충격 시스템과 연성된 2자유도 모델

남을 보여 주고 있으며, 이는 하드디스크 시스템을 자유 경계 조건에서 측정된 주파수 응답 함수의 피크 위치와 일치한다.

연성된 충격 시스템 모델링을 위하여 그림 14와 같이 베이스 피봇점을 통한 충격 입력과 액추에이터 암과 서스펜션으로 서로 연결되어 있는 단순한 형태의 2자유도 시스템으로 구성할 수 있고, 최종적인 결과는 서스펜션 끝단의 최대 충격 스펙트럼(shock spectrum)<sup>(22)</sup>를 통해 충격 진동 제어 효과를 살펴보았다.

충격 제어 설계의 목적은 서스펜션의 굽힘 고유 모드가 각각 2,200Hz와 3,200Hz에 있을 때 암의 굽힘 고유 모드가 어느 방향으로 선정되어야 하는 가를 알기 위함이었으며, 그림 15는 0.5ms 충격 입력에 대한 암의 고유 진동수가 800Hz에서 3,500Hz까

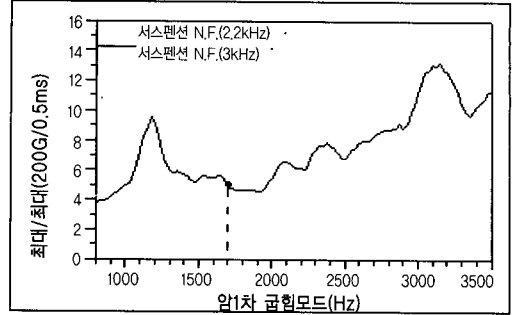
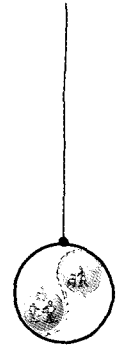


그림 15 암의 1차 굽힘 주파수를 변화에 대한 연성 시스템의 Maximax 응답 스펙트럼(200G/0.5ms).

지 변화될 때 최종적인 최대 충격 스펙트럼에 대한 한 예제이다. 이 그림으로부터 현재 1,500Hz 근방에 있는 암의 굽힘 모드를 좀더 높아지는 방향으로 설계하는 것이 충격 응답이 작아짐을 알 수 있고, 서스펜션의 굽힘 모드가 2,200Hz보다 3,200Hz로 올라가는 것이 내 충격 성능이 높아짐을 예측할 수 있다. 최종적인 검증을 위해 ANSYS 모델링을 통해 미리 확인한 1,700Hz 굽힘 모드를 가진 암을 설계하여 샘플 제작 후 기존 모델의 HSA(암 : 1.5kHz, 서스펜션 : 2.2kHz)에 비해 새로 내충격 설계된 HSA(암 : 1.7kHz, 서스펜션 : 3.2kHz)가 0.5ms과 2ms 충격 시험 결과 각각 100%와 40% 성능 향상을 보여주었다.

### 맺음말

IT사회를 실현하기 위한 정보저장장치(information storage device)의 핵심 요소로서 하드디스크는 정보 지식 기반 강화에 의한 저장의 필요성 증가, 네트워크 고속화 및 휴대성 등에 대한 사회적 요구의 급격한 증대로 시장 확대가 꾸준히 증가할 것으로 예상된다. 특히 하드디스크는 메모리 분야에서 용량, 성능 및 가격 등의 모든 면에서 우세를 보이면서 가장 뛰어난 경쟁력



을 갖추고 있다. 또한 Non-PC 응용에 대한 요구가 급격히 커지고 있는 가운데 홈 서버(home server), 디지털 텔레비전 등에서 주 정보 저장장치로서 하드디스크가 주도적인 역할을 할 것으로 예상된다. 특히 하드디스크는 소형·경량·고성능·고신뢰성화하여 쉽게 운반할 수 있게 되고 언제 어디서나 음성과 영상 정보에 접속할 수 있는 유비쿼터스(ubiquitous) 정보 사회의 핵심 장치로서 계속적으로 진화해 갈 것이다.

향후 HDD 기록 밀도는 년 50% 수준의 지속적인 증가를 예상하고 있으며, 빠른 데이터 전달을 위해 Serial ATA(Advanced Technology Attachment) 인터 페이스가 개인용 컴퓨터 하드디스크에 일반적으로 사용될 것으로 보인다. 또한 마이크로 액추에이터와 수직 자기 기록 방식의 실용화를 위한 작업이 본격화될 것으로 전망된다. 고속 데이터 액세스(Access)의 필요성 증가로 10,000rpm용 하드디스크가 일반 데스크탑에 널리 사용될 것으로 보인다.

나노미터 레벨의 위치 제어 정밀도를 얻기 위하여 하드디스크는 본문에 기술한 기계적 서보(mechanical-servo) 연성 기술뿐만 아니라, 진동 제어, 공기역학(aero-dynamics), 열적(thermal) 해석, 마찰(tribology), 공정(fabrication), 그리고 제작(manufacturing) 등 다방면의 고도의 기계 기술 분야의 융합이 필요하다. 따라서 하드디스크를 포함한 정보 저장장치 관련 기술에 대한 정부와 기계 공학 관련 학계의 관심과 지원이 절실히 필요하다고 판단된다.

### 후기

연구비를 지원해 주신 삼성전자 스토리지 사업부 관계자 여러분과, 실제 제품 개발에 필요한 각종 정보, 및 기술적 조언을 아끼지 않은 Tho Pham 이하 동료 Engineer에게

감사 드립니다.

### [참고문헌]

- (1) 이호성, 1997, "하드 디스크 드라이브 개발에 관련된 기계기술의 현황", 소음진동 공학회지 제7권 제3호, pp. 354~361.
- (2) 정정주, 이승희, 추상훈, 1998, "디스크 드라이브의 기술 동향과 제어 기술", 제어자동화시스템공학회지, 제5호, pp. 15~21.
- (3) 이호성, 1998 "하드 디스크 드라이브 서보 제어기의 설계", 제어자동화시스템 공학회지, 제5호, pp. 22~28.
- (4) Eunsik Kim, Y. H. Im, Yongsu Kim, K. J. Lee, Kyongmi Lee, and N. Y. Park, 2001, "Head Design Scheme for Perpendicular Recording with Single Layered Media," Magnetics, IEEE Trans. on , Vol. 37, Issue 4, Part 1, 2001, pp. 1382~1385.
- (5) T. Yamaguchi, K. Usui, H. Hirai, F. Tomiyama, H. Numasato, Y. Hamada, and K. Shishida, "Modeling and TMR(Track Misregistration) Budget Design for Head-positioning of High Track-Density Drives," Magnetics, IEEE Trans. on , Vol. 35 No. 2, pp. 892~897.
- (6) 손영, 황태연, 한윤식, 강성우, Frank Morris, 2001, "고성능 하드 디스크 드라이브 개발을 위한 유체 베어링 스피들 모터의 특성분석", 소음진동공학회, 2001년도 춘계학술대회논문집.
- (7) 한윤식, 강성우, 오동호, 황태연, Greg Tran, 2002, "100kTPI급 HDD 구현을 위한 Disk Damper에 관한 연구", 소음진동공학회, 2002년도 추계학술대회논문집.
- (8) S. Deeyiengyang and K. Ono,



- 2001, "Suppression of Resonance Amplitude of Disk Vibration by Squeeze Air Bearing Plate," IEEE Transactions on Magnetics, Vol 37, No. 2, March, pp. 820~825.
- (9) 김철순, 전종업, 정성환, 최재준, 민동기, 김영훈, 2001, "고밀도 HDD용 MEMS 마이크로 액츄에이터의 동적 해석," 한국 소음 진동 공학회 2001년 춘계학술대회 논문집.
- (10) 오동호, 강성우, 한윤식, 김영훈, 고정석, 황태연, 2002, "100kTPI급 하드 디스크 드라이브 TMR 설계를 위한 Suspension에 관한 연구," 소음진동 공학회, 2002년도 춘계학술대회 논문집.
- (11) 강성우, 한윤식, 오동호, 황태연, Dan Blick, 김명업, 2001, "80GB/PLATTER 하드 디스크 드라이브 설계를 위한 스프링-디스크 시스템 진동의 TMR 기여도 분석," 소음진동공학회 2001년도 춘계학술대회논문집.
- (12) L. Guo, H.S.Lee, A. Hudson, and S. Chen, 1999, "A Comprehensive Time Domain Simulation Tool for Hard Disk Drive TPI Prediction and Mechanical/Servo Enhancement," Magnetics, IEEE Trans. on, Vol. 35 No. 2, pp. 879~884.
- (13) R. Ehrlich and D. Curran, 1999, "Major HDD TMR Sources and Projected Scaling with TPI," Magnetics, IEEE Trans. on, Vol. 35 No. 2, pp. 885~891.
- (14) H. S. Yang, J. Jeong, C. H. Park, and Y. P. Park, 2001, "Identification of Contributors to HDD Servo Errors by Measuring PES Only," IEEE Trans. on Magn., Vol. 37, No. 2, March, pp. 88~887.
- (15) 고정석, 강성우, 한윤식, 김영훈, 황태연, 2002, "High-TPI HDD 구현을 위한 PES Estimation에 관한 연구," 소음진동공학회, 2002년도 춘계학술대회논문집.
- (16) 황태연, 강성우, 한윤식, 손영, 전정일, 1999, "고속 HDD의 소음 제어- 소특집: 정보 저장 장치에서의 소음, 진동", 소음진동공학회지 제9권 제4호, pp. 660~668.
- (17) 강성우, 한윤식, 황태연, 손영, 구자춘, 2000, "음향 인텐시티를 이용한 하드 디스크 드라이브의 소음원 파악 및 음향파워 제어", 소음진동공학회 2000년도 춘계학술대회논문집.
- (18) 강성우, 한윤식, 황태연, 손영, 오동호, Tho Pham, 2001, "Structural Mobility 분석을 통한 하드 디스크 드라이브의 소음제어," 소음진동공학회 2001년도 춘계학술대회논문집.
- (19) <http://www.samsungelectronics.com/hdd/>
- (20) 고상철, 이상희, 김준태, 강성우, 한윤식, 황태연, 2001, "하드디스크 소음 예측을 위한 진동 음향 연계 해석," 소음진동공학회 2001년도 춘계학술대회논문집.
- (21) 강성우, 한윤식, 오동호, 황태연, 손영, Tho Pham, 2001, "시간-주파수 영역에서의 연성 충격 스펙트럼 분석을 통한 하드디스크 드라이브의 충격 진동 제어," 소음진동공학회 2001년도 춘계학술대회 논문집.
- \*C. M. Harris, Shock Vibration Handbook, McGRAW-HILL, Third Edition, 1987t Reference Text Here. Put Reference Text Here. Put Reference Text Here. Put Reference Text Here.