

HDD 헤드 스택 어셈블리의

동적 해석 및 설계 동향

박경수, 김철순*
(삼성전자(주) 스토리지사업부)

1. 머리말

하드디스크 드라이브(hard disk drive, HDD)는 1990년 대 말부터 비약적인 기술 발전을 통하여 대용량화를 이룩해왔으며 향후에도 지속적인 신기술 개발을 통하여 2014년경에는 10 TB(Tera Byte = 1조 바이트)의 드라이브가 개발될 것으로 예측되고 있다(그림 1). 올해 말에는 1 TB의 3.5인치 HDD가 출시 될 예정이며 PMP 등 휴대용 모바일 기기(mobile device)용으로도 100 GB 이상의 HDD가 나올 것으로 전망 된다.

이러한 HDD의 대용량화와 함께 지속적인 저가격화의 진행으로 기존의 데스크탑/노트북 컴퓨터 중심의 활용에서 확대되어 개인용이나 대량의 영상 정보 저장을 위한 외장형 저장 장치와 DVD 레코더, 셋탑박스, TV 등

의 가정용 제품 그리고 PMP, DMB, 네비게이션 등 이동형 기기에 이르기까지 다양한 용도의 시장이 발굴되고 있다.

이러한 흐름 속에서 과거의 하드디스크 드라이브를 사용하던 사용자들이 단순히 대용량과 정보저장의 안정성을 추구하였다고 말한다면, 최근의 소비자들은 그러한 사항은 기본으로 하고 초소형, 저전력 등의 편리한 휴대성과 높은 내충격 성능, 광범위한 사용 온/습도 조건 등 높은 신뢰성을 가진 HDD를 요구하고 있다.

HDD가 다양한 분야로 응용이 확대되는 근간에는 HDD관련 업계에서 소비자의 요구에 부응하여 지속적이고 혁신적인 자기기록(magnetic recording) 기술 및 소자를 발전시키고, 초정밀 구동 메커니즘의 개발을 통하여 기록밀도를 향상시킴으로써 대용량 및 소형 드라이브를 구현한 결과로 생각된다.

HDD는 그림 2와 같이 크게 자기기록 매체(media) 및

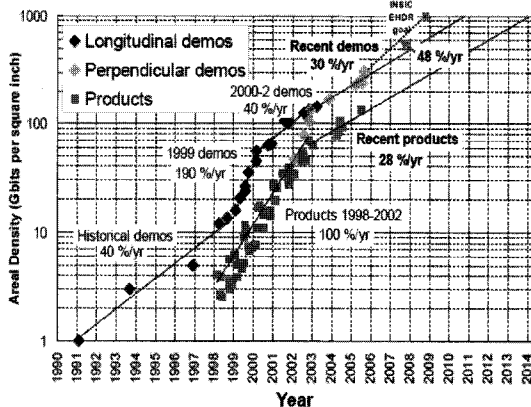


그림 1 HDD의 기록밀도 발전 (INSIC 2006)

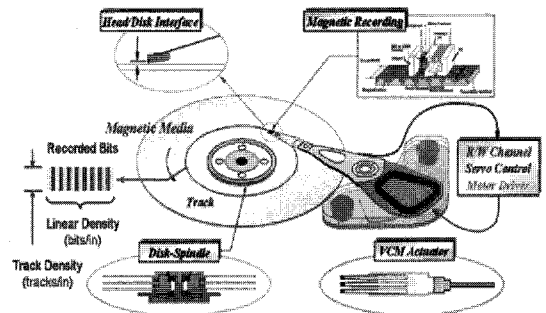


그림 2 HDD의 주요 구성 요소 개략도

* E-mail : kim21cs@naver.com / (031) 200-8277

기록/재생헤드(head), 헤드 신호처리 및 헤드 위치제어를 수행하는 회로부, 디스크를 구동하는 스피들 그리고 헤드를 구동하고 디스크와 일정 간격을 유지해주는 헤드스택어셈블리(head stack assembly, HSA)로 구성된다.

HDD에서 가장 중요한 역할을 하는 요소는 자기기록 매체 및 데이터를 쓰고 읽는 헤드이다. 자기기록 방식에 대한 이해를 돕기 위하여 그림 3에 현재 사용되는 수평기록과 수직기록 방식의 헤드/미디어를 구조를 나타내었다. 2006년부터 HDD 업계에서는 기록 밀도의 향상을 위하여 그림 3(b)와 같이 기록 패턴을 수직으로 형성하는 수직자기기록 미디어 및 헤드 구조를 채용하고 있으며, 향후의 드라이브는 모두 이 방식을 채용할 것으로 예상된다.

기록 밀도의 향상, 즉 대용량화에 있어서 헤드/미디어와 함께 필수 불가결한 요소는 헤드와 디스크 사이의 간격을 일정하게 유지하는 HDI(head disk interface) 기술이다. 그림 3에서와 같이 헤드가 작은 비트(bit)를 쓰고

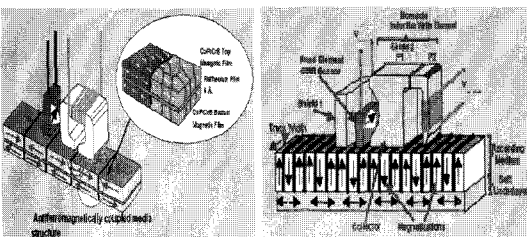
읽기 위해서는 비트 크기에 비례하여 헤드를 디스크 표면에 근접시켜야 하며, 최근의 HDD 기록밀도는 100 Gbits/in² 이상으로 이에 적합한 HDI 간격은 10 nm 미만이어야 한다(그림 4).

헤드는 슬라이더(slidebar)의 끝에 부착되어 기록/재생을 하는 데 슬라이더와 디스크 사이의 간격이 10 nm 수준으로, 7200 rpm으로 고속 회전하는 디스크와 슬라이더의 간격(flying height, FH)은 외부의 충격이나 진동, 온도/습도의 변화 그리고 기압 변화에 민감하게 반응하게 된다. 물론 슬라이더가 이러한 영향에 강건(robust)하게 설계되고 있지만 허용치 이상의 외란이나 환경 변화가 발생할 경우 슬라이더와 디스크가 접촉이 발생하게 되며, 경우에 따라서는 디스크 표면의 손상이나 사용자 데이터의 손실을 초래할 수 있다.

이 글에서는 슬라이더의 운동에 영향을 미치는 슬라이더-서스펜션(suspension)의 동적 거동과 충격 특성 그리고 드라이브에 미치는 외란에 대해 고찰해보고 외란에 강건한 드라이브 시스템 설계 방향에 대해서 살펴보고자 한다.

2. 슬라이더-서스펜션의 설계

슬라이더가 그림 5에서와 같이 디스크 표면에서 항상 일정한 간격을 유지하기 위해서는 슬라이더의 공기베어링(air bearing surface, ABS)의 설계와 함께 서스펜션-플렉서의 정적, 동적 설계도 매우 중요하다. ABS와 서스펜션의 설계는 서로 매우 민감하게 영향을 미치는 요소로 설계시 표 1과 같이 주어진 서스펜션의 설계 인자를 기본으로 ABS를 설계(그림 6)하고 미세한 동적 특성



(a) 수평기록 방식 (b) 수직기록 방식

그림 3 자기기록 방식의 변화

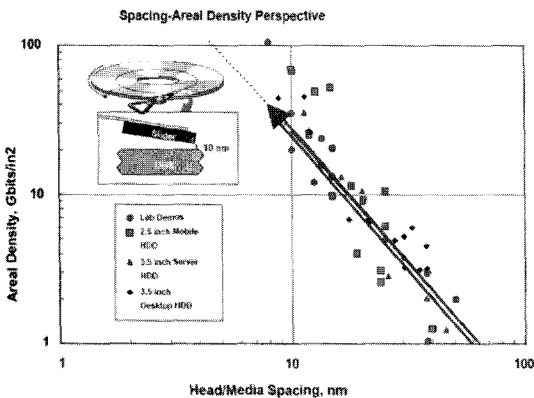


그림 4 기록 밀도와 헤드-디스크의 간격

표 1 서스펜션의 주요 설계 인자

Design parameter		Model A
Spring rate	N/m	21.0
Pitch stiffness	μ Nm/deg	0.85
Roll stiffness	μ Nm/deg	0.65
Flexure lat stiffness	N/mm	4.70
PSA	deg	1.00
RSA	deg	0.00
Dimple contact force	g	0.35
Free state angle	deg	12.00

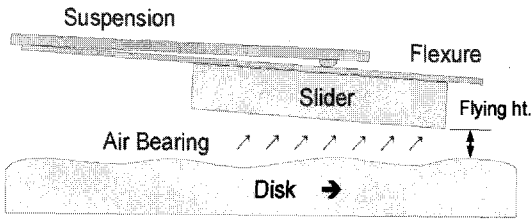


그림 5 서스펜션-슬라이더 개략도

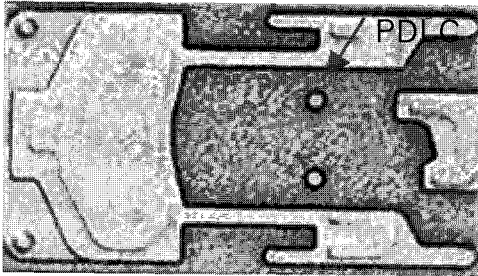


그림 6 슬라이더 ABS 형상

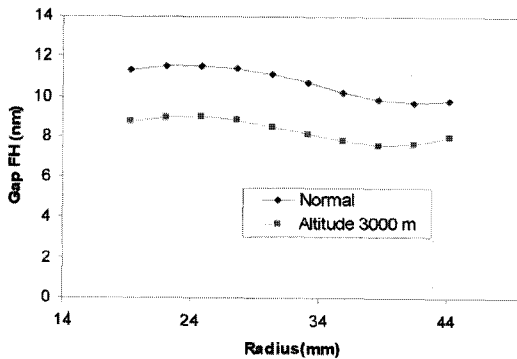


그림 7 디스크 위치 및 기압(고도) 조건에 따른 헤드-디스크 간격의 변동

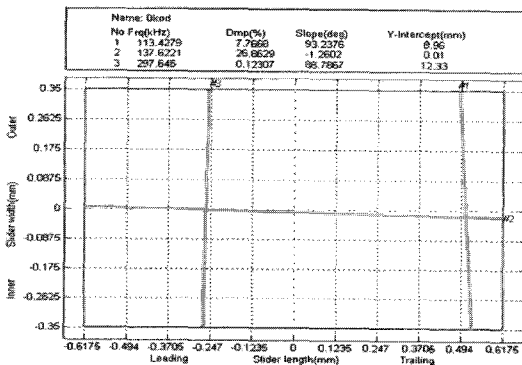


그림 8 슬라이더-ABS의 모드(nodal line)

을 최적화하기 위하여 다시 서스펜션의 일부를 개선하는 방식으로 진행된다.

ABS의 설계 시에는 디스크의 내·외주의 위치에 따른 공기흐름 방향 및 속도 변화에 따른 부상 높이의 변화 그리고 사용 고도 변화, 즉 대기 압력의 저하로 인한 부상 높이의 변화 등을 심도 있게 고려되고 있으며(그림7), 이러한 조건 변화에 가장 강건한 ABS를 설계하는데 노력을 기울이고 있다. 과거 슬라이더는 안정된 부상(flying)에만 목적을 두고 있었기 때문에 양압의 증가를 통하여 부상시키는 양압 ABS를 사용하였던 반면에 현재의 ABS는 다양한 성능을 만족시키기 위하여 슬라이더의 표면에 양압과 음압의 분포를 최적화한 ABS를 설계하고 있다.

슬라이더-ABS 계의 고유진동수 및 모드형상은 그림 8에 보는 것과 같이 100~300 kHz의 주파수를 가지도록 설계하고 있다. 슬라이더가 이처럼 매우 높은 기계적 고유진동수를 갖는 것은 슬라이더의 질량이 1 mg 정도이고 10 mm 수준의 간극에서 발생하는 ABS의 강성 1 N/um 정도로 매우 높기 때문이다. 이에 따라 슬라이더와 디스크는 10 mm 정도의 간극을 유지하며 충돌이 없이 안정적인 부상을 유지하게 한다. 현재 슬라이더는 설계 환경 조건 내에서 FH의 변동을 1 mm 이내로 유지하도록 설계 되어 있다. 또한 그림 6에 보는 것과 같이 3.5인치 드라이브의 경우에는 CSS(contact start stop)성능을 향상시키기 위해서 ABS에 PDL(pad DLC)라는 돌기를 슬라이더에 설계함으로써 슬라이더와 디스크 사이의 마찰 특성을 향상시키는 설계 등 다양한 작동 조건에 강건하도록 설계를 하고 있다.

슬라이더의 또 하나 설계 조건은 헤드가 트랙을 정확하게 추종하여야 하는데 현재 데이터 트랙(track) 폭이 160~200 mm 정도로 매우 작아져 있는 상태이다. 그러므로 미세한 축 방향 진동에 의해서 헤드의 추종 오차가 발생하면 기록/재생을 행하는 트랙뿐 아니라 인접 트랙에도 영향을 줄 수 있게 된다. 기존의 서스펜션-슬라이더의 설계는 그림 9와 같이 슬라이더에 정적인 부상 자세에 영향을 주는 기본적인 모드들을 고려했다면, 현재는 슬라이더와 연계된 미소한 서스펜션의 진동도 곧 슬라이더의 부상 안정성에 영향을 주어 디스크와의 접촉으로 이어질 수 있기 때문에 이전에는 고려조차 하지 않았던 50~150 kHz 대역의 플렉서(flexure) 고주파 모드

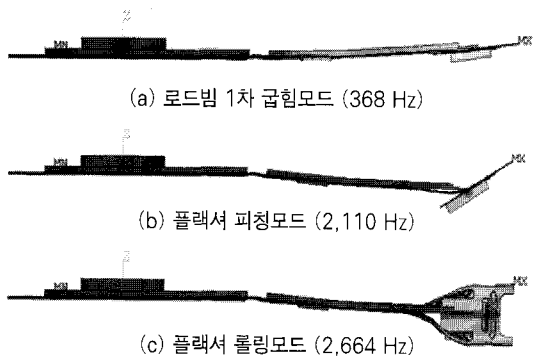
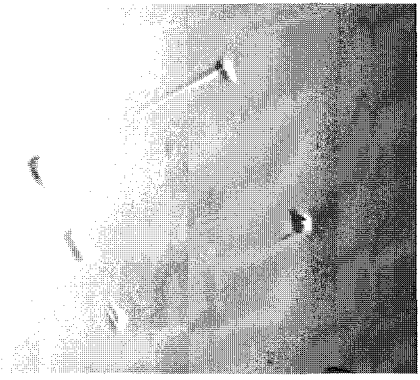
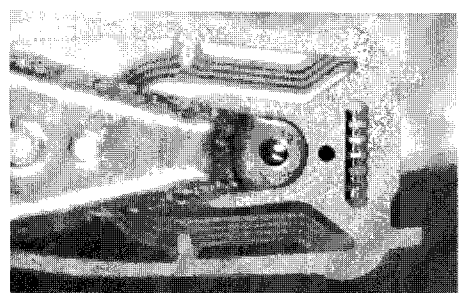


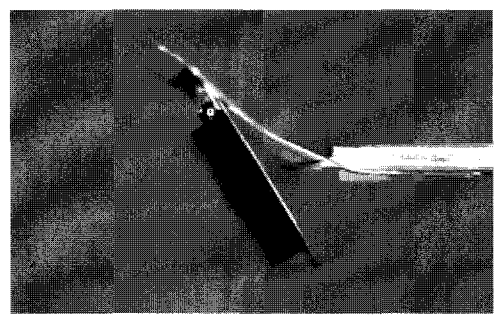
그림 9 서스펜션-슬라이더의 고유모드



(a) 헤드-디스크 슬랩



(a) 플렉서 파트



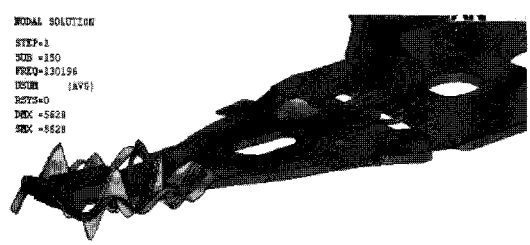
(b) 플렉서 힘

그림 11 외부 충격으로 인한 결함 발생

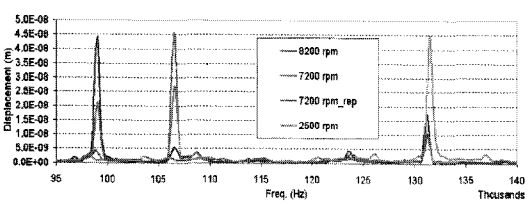
고주파 모드에 의한 FH 영향이 연구되고 이 영향을 줄이려는 서스펜션의 설계가 진행되고 있다.

3. 서스펜션의 내 충격 설계

외부 충격이나 진동 환경에 강건한 고성능 하드디스크의 구현을 위해 가장 중요한 드라이브 구성요소는 슬라이더(ABS)-서스펜션-액추에이터 시스템의 충격 특성이다. 특히 휴대용 하드디스크에서는 외부 충격에 대응하는 성능 향상이 필수적이다. 그림 11에서 보는 것과 같이 과도한 외부 충격으로 인하여 헤드-디스크 슬랩(slap)이 발생하면 디스크에 스크래치가 발생되거나 외부 충격에 의해서는 플렉서가 휘어 영구히 기록을 할 수 없는 경우도 발생하게 된다. 이는 곧 데이터의 훼손 및 드라이브의 고장을 유발하기 때문에 충격에 강건한 드라이브 설계는 필수적인 요소이다. 충격 성능을 향상시키기 위한 HSA(head stack assemble)의 설계 요소 중 중요한 부분이 헤드 리프트(head lift-off) 상태진단 및



(b) 플렉서 힘



(c) Measured frequency response

그림 10 고주파 대역 플렉서 진동

들에 대한 진동특성을 설계에 포함하고 있다(그림 10). 그림 10(c)는 98/107/132 kHz의 플렉서 고유진동이 디스크 RPM에 따라 슬라이더의 진동에 미치는 영향을 분석한 결과이다. 최근에야 이러한 슬라이더-서스펜션의

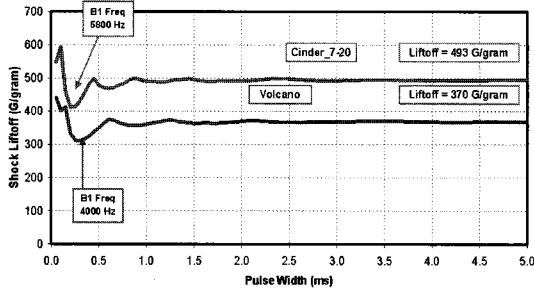


그림 12 충격 시간에 따른 lift-off 수준

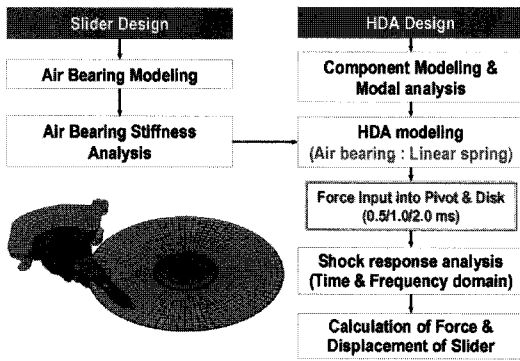


그림 13 내충격 해석 및 설계 프로세스

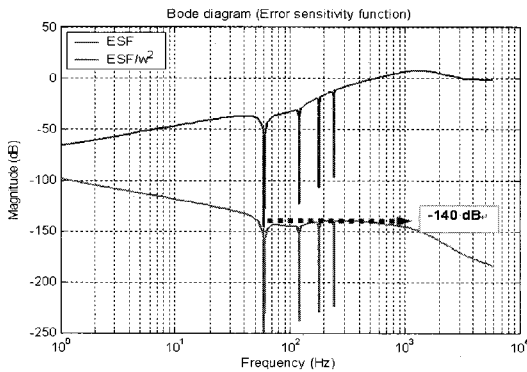
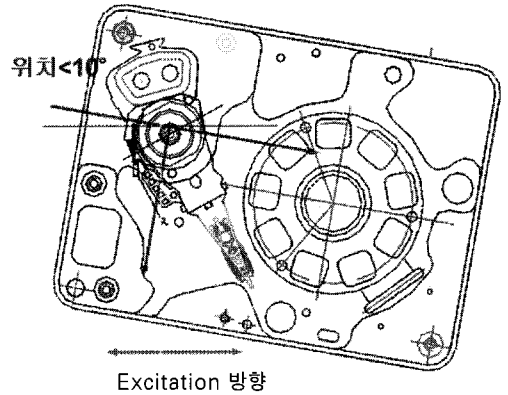


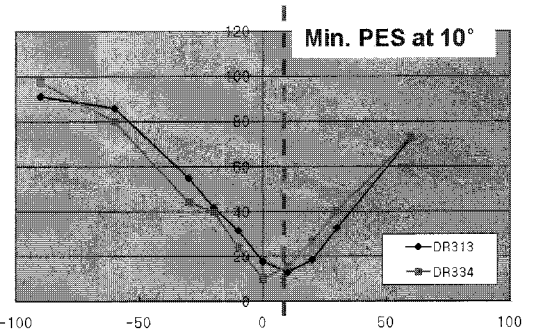
그림 14 HDD 제어기의 외란 응답 특성

HSA 설계 최적화이다(그림 12).

기존에는 서스펜션 단독의 설계를 통하여 이러한 헤드 리프트나 충격성능 해석을 수행하였다. 그러나 부상 높이가 낮아지면서 ABS의 특성이 이러한 외부 충격문제에 크게 기여하게 되었다. 그래서 현재에는 슬라이더의 ABS 강성까지 고려된 통합 프로세스를 유한요소모델등을 이용하여 구축하고, 이를 바탕으로 외부 충격에



(a) 드라이브 가진 방향



(b) 가진 방향에 따른 위치 오차 신호

그림 15 외란에 따른 드라이브의 헤드 위치 오차 신호(PES)의 변화

강건한 서스펜션의 설계가 진행되고 있다. 그림 13은 이러한 슬라이더 설계와 HSA 설계가 결합된 내충격 설계 프로세스를 보여주고 있다.

이러한 통합 설계 프로세스를 통하여 그림 12의 결과 처럼 충격 시간(duration)의 차이에 따른 헤드 리프트 발생 수준 등 더욱 실제 시스템과 가까운 해석을 수행하고 있으며, 이를 바탕으로 최근 초소형 휴대기기용 하드디스크에서는 동작 중 1000 G 이상의 외부 충격에도 견딜 수 있는 HSA를 설계 구현 하고 있다.

4. 외란에 강인한 HSA의 설계

기존의 데스크탑 HDD는 외부환경 및 진동특성에 대한 영향이 작아서 외부 진동에 대한 심각한 고려 없이도 드라이브를 개발하는 것이 가능하였다. 그러나 현재


는 100 mm 수준의 트랙 폭에서 데이터를 쓰고/읽고 있으며, 사용환경이 거치형에서 휴대용 기기에 응용이 증가하기 때문에 외부 외란에 더욱 강건한 HSA 설계가 필요하게 되었다.

또한 데이터의 전송속도가 중요한 서버등 많은 드라이브와 고속 냉각 팬이 함께 장착된 시스템에서는 자체 및 팬의 진동에 의해서 데이터의 전송속도 저하가 우려된다.

외부 진동이 발생한 상황에서도 원활한 작동을 위해서는 하드디스크의 서보시스템은 외란을 감지하여 그 영향을 최소화하도록 설계되어 있어야 한다. 현재 하드디스크의 외란에 대한 응답특성(그림 14)은 사용중에 발생하는 500 Hz 이하의 가진(2G 이하)에도 그 강건성을 충분히 확보하고 있으며, 트랙오차를 최소화하기 위한 외란의 예측 및 제어를 개발하고 있다. 그러나 제어기 성능에 한계가 있기 때문에 과도한 진동에 대해서는 헤드가 진동하지 않도록 기본적으로 HSA를 정밀 밸런싱하는 것이 요구된다. 초소형 드라이브의 HSA는 매우 가벼워서 기구적으로 밸런싱하는 것이 매우 어려우므로 그림 15와 같이 드라이브에 외란을 가하면서 실제 헤드의 위치 신호를 모니터링하면서 HSA의 불균형이 위치하는 각도(최소 PES) 및 반경을 찾는 방법이 개발되었다.

5. 맺음말

하드디스크 드라이브는 지속적인 기록 밀도의 증가

와 함께 환경 신뢰성 향상을 위하여 자체 진동이나 외부충격, 작은 진동까지도 고려한 강건한 시스템 설계를 하여야 한다. 이러한 환경에서 드라이브 메커니즘의 설계에 고주파의 미소 진동특성을 고려한 해석 및 설계 기술은 더욱 정교해지고 있으며 이 과정에서 다양한 진동 이론 및 실험 방법이 동원되고 있다. 드라이브의 성능 향상에 필수적인 진동 해석 및 설계 기술은 드라이브의 발전과 함께 앞으로도 계속될 것이다. 

참고문헌

- (1) Ambekar, R., Gupta, V., Bogy, D. B., 2005, "Experimental and Numerical Investigation of Dynamic Instability in the Head Disk Interface at Proximity," Transactions of the ASME, Vol. 127, pp. 530~536.
- (2) Zeng, Q. H. and Bogy, D. B., 1998, "Dynamics of Suspension-slider-air-bearing Systems: Experimental Study," IEEE Transaction of Mechatronics, Vol. 3, No. 3, pp. 210~217.
- (3) 박경수, 윤영진 외, 2007, "하드디스크에서 ABS와 서스펜션 사이에 연계모드들에 의한 부상불안정성 향상," 정보저장시스템공학회 동계학술대회 논문집.
- (4) 한윤식, 강성우 외, 2001, "시간-주파수 영역에서의 연성 충격 스펙트럼 분석을 통한 하드디스크 드라이브의 충격진동 제어," 한국소음진동공학회춘계학술대회논문집.