



HDD 디스크-스핀들 시스템에서의 마이크로 진동

조정석·김철손*
(삼성종합기술원 Storage Lab)

1. 머리말

HDD(hard disk drive)의 기록밀도가 높아짐에 따라 데이터를 기록하고 읽기 위해서는 수십 나노미터 수준의 위치제어 정밀도가 요구되고 있다. 현재 업계에서 개발중인 3.5인치 HDD의 기록밀도는 60 Gbits/in² (80 GB/platter)이며 이에 해당하는 트랙밀도는 100000 TPI(track per inch)이다. 트랙 폭은 254 nm로 달성해야 하는 추종 정밀도는 트랙 폭의 12%로 약 30 nm에 해당한다. 그림 1에 나타난 바와 같이 트랙밀도 증가에 따른 HDD가 만족해야 할 TMR(track mis-registration)을 예측하여 볼 때 현재의 디스크-스핀들 시스템으로는 약 80 kTPI가 되면 한계에 이르게 되고 80 GB/platter이상의 고용량을 달성하기 위해서는 디스크-스핀들의 초정밀 구동 뿐만 아니라 서보 시스템과 기계 시스템을 결합한 통합적인 설계가 필요하게 된다. 이와 같이 HDD 시스템에서 메커니즘의 한계에 가까운 정밀도를 구현하기 위해서는 나노 스케

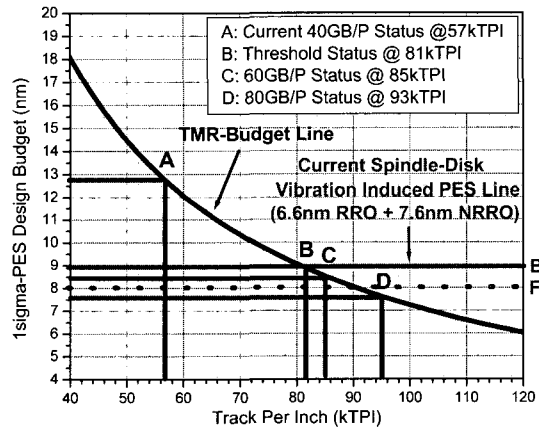


그림 1 트랙밀도에 따른 TMR budget

일의 초정밀 디스크-스핀들 시스템에 관한 연구/개발이 절대적으로 필요하다.

본 고에서는 기계공학의 결정체로 볼 수 있는 HDD 디스크-스핀들 시스템의 특징과 더불어 디스크-스핀들 진동의 이해와 30 nm 수준의 초정밀 시스템을 달성하기 위해 제안된 기술에 대해 살펴보았다.

2. HDD 디스크-스핀들 시스템의 특징

HDD 디스크-스핀들 시스템은 그림 2의 개략도와 같이 베이스와 커버 사이에 스프링들 모터, spacer, clamp-disk, 디스크로 구

* E-mail : cs_kim@sait.samsung.co.kr

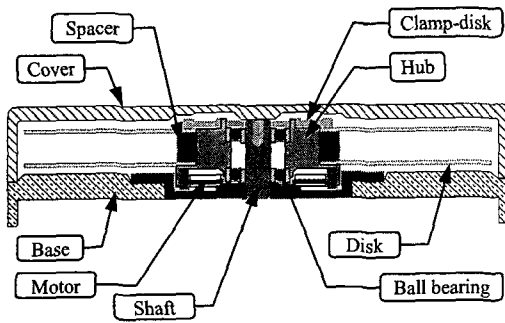


그림 2 HDD 디스크-스핀들 계의 개략도

성되어 있다. 스핀들 모터는 디스크를 일정한 회전속도로 회전시켜 주는 부품으로서 3.5인치 드라이브인 경우, 5400 rpm과 7200 rpm이 가장 일반적이다. 스핀들 모터는 모터부, 축, 허브, 베어링으로 구성되어 있는데, 현재 7200 rpm 제품의 경우 저진동화 및 저소음화를 위해서 볼 베어링에서 FDB (fluid dynamic bearing)로 대체되고 있는 추세이다.

지금까지의 HDD의 저진동화 연구방향은 디스크-스핀들 시스템의 동력학적 설계에 기초한 디스크-스핀들 고유 진동수 향상, 볼 베어링 결합 주파수와 디스크-스핀들 고유 진동수의 회피설계, 디스크 두께의 증가를 통한 디스크 강성 증대 및 볼 베어링의 가공 정밀도 개선 등이 주를 이루었다. 표 1은 TPI가 증가함에 따라서 디스크 두께 및 디스크-스핀들 시스템의 고유 진동수가 계속 증가하여 왔음을 보여주고 있다.

볼 베어링 스핀들의 경우 결합 주파수와 디스크-스핀들 시스템의 고유 모드가 근접하게 되면 큰 진폭의 진동이 발생하게 되는데, 이는 HDD의 고밀도화를 저해하는 직접적인 원인이 된다. FDB는 진동/소음 관점에서 볼 베어링에 비해 성능이 우수하다는 것

표 1 트랙밀도에 따른 스핀들 고유진동수

Year	1999	2000	2001
TPI	20000	35000	57000
Disk thickness	0.8t	1.0t	1.27t
Conical mode backward/forward	430 /610	530 /710	610 /790
Disk (1,0) mode	500 /680	710 /640	830 /1010

이 널리 알려져 있는 것으로 HDD의 고밀도화 및 저소음화를 위한 필수 요소이다. 개발 초기의 FDB는 윤활유 누수 및 높은 부하전류 등 몇 가지 문제가 있었으나 현재는 상당부분 해결되어 있다.

최근에 기록 밀도가 높아짐에 따라 디스크-스핀들 시스템 진동 중에서 고속회전에 의한 공기유동 가진에 의해 발생하는 진동을 디스크와 상대면의 간극을 작게 하여 스퀴즈 필름 효과를 이용하여 디스크에 댄핑을 주어 진동을 낮추기도 한다.⁽²⁾ 디스크와 베이스 간극, 디스크와 커버의 간극을 조절하여 디스크 진동을 줄이는 방법 이외에 그림 3과 같이 디스크와 디스크 사이에 원형판을 이용하여⁽³⁾ 디스크-스핀들 시스템의 진동을 줄이는 방법도 제안되었다. 공기 유동에 의한 디스크 진동의 원인을 규명하는 연구로서 디스크와 디스크 shroud 사이의 압력 변동을 측정하거나,⁽⁴⁾ 유동장 해석과 구조 해석을 동시에 수행하여 디스크에 가

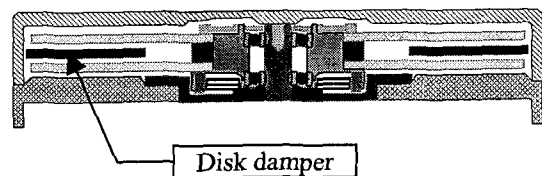


그림 3 디스크 댄퍼의 개략도

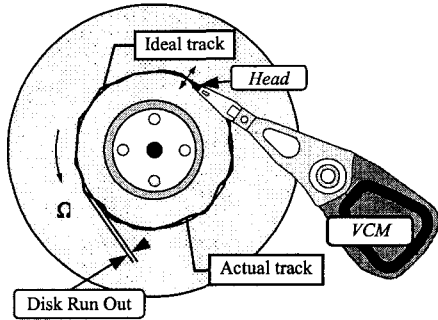


그림 4 HDD에서의 디스크 런아웃

해지는 압력을 구하여 디스크 진동 스펙트럼을 얻는 등⁽⁵⁾ 다양한 연구가 진행되어 왔다.

2. 디스크-스핀들 시스템 진동 분석

그림 4에 HDD에서 발생하는 디스크 런아웃을 개념적으로 나타내었다. 이상적인 트랙의 궤적은 진원이지만 디스크-스핀들 시스템의 진동에 의해 실제 트랙과 이상 트랙의 차이인 디스크 런아웃이 발생하며 이러한 디스크 런아웃은 헤드가 트랙에 읽고 쓸 때 에러를 발생시키는 주요한 요인이 된다. HDD에서 전체 디스크-스핀들 시스템의 진동은 TIR(total indicated run out)이라 하며, 회전주기마다 반복적으로 나타나는 성분(RRO, repeatable run out)과 반복되지 않는 성분(NRRO, non-repeatable run out)로 나눌 수 있다. RRO는 주로 디스크-스핀들 시스템의 unbalance force와 clamp-disk의 clamping force의 불균형으로 인하여 발생하며, 회전 주파수의 1x, 2x, 3x, 4x 성분이 가장 지배적이다. 하지만, 제어기에서는 RRO controller를 이용하여 상기한 성분을 filtering하여 보상하므로 PES(position

error signal) 측면에서는 크게 문제되지 않는다. 반면, NRRO는 볼 베어링의 결함에 의한 가진과 고속 회전시 발생하는 공기 유동에 의한 가진에 의해 주로 발생하며, 주파수 성분들도 다양하고 크기도 일정하지 않아 PES측면에서도 주의 깊게 다루어야 한다. 특히, 서보 제어기의 외란 증폭대역에서 발생하는 NRRO는 고밀도화를 저해하는 직접적인 원인이 되므로 반드시 작게 해야 한다.

3. 스핀들계의 진동 측정 및 정밀 분석

디스크-스핀들 시스템의 진동 측정은 주로 LDV(laser doppler vibrometer) 혹은 정전 용량 캡센서에 의해 이루어진다. 디스크-스핀들 진동은 크게 축 방향 진동과 반경 방향 진동으로 나뉜다. 축 방향 진동은 LDV나 캡센서 모두 이용할 수 있으나, 반경 방향 진동은 디스크 면 거칠기 등으로 인해 LDV를 이용하는 것은 적당하지 않아 일반적으로 캡센서를 사용하여 측정한다. 나노 스케일의 진동을 측정하기 위해서는 분해능이 2~8 nm 정도 되는 센서를 사용하는 것이 측정 정밀도를 높일 수 있다.

그림 5는 캡센서를 이용하여 반경 방향 디스크 런아웃을 측정하는 실험 장치 개략도이고, 그림 6은 LDV를 이용하여 축 방향 디스크 런아웃을 측정하는 실험 장치 개념도를 나타낸다. 그림 7은 축 방향 디스크 런아웃을 LDV로 측정한 예로서, 디스크-스핀들 시스템의 TIR은 전장에서 설명한 바와 같이 회전속도에 동기되는 RRO성분, 고속 회전에 의한 공기유동 가진에 의한 디스크 모드 및 불결함 주파수에 의한 NRRO 성분

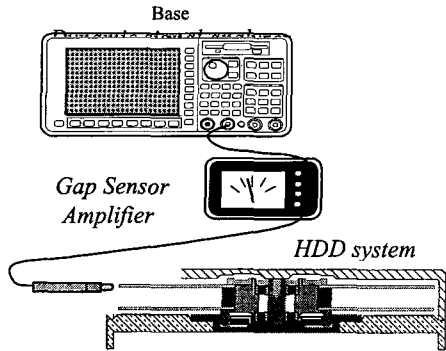


그림 5 반경방향 런아웃 측정장치 개략도

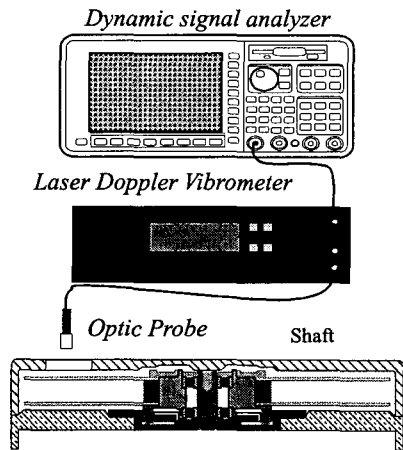


그림 6 축방향 런아웃 측정장치 개략도

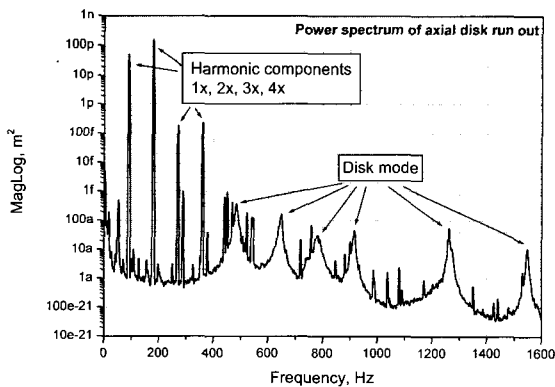


그림 7 축방향 TIR 스펙트럼

으로 구성되어 있다.

측정된 런아웃 데이터로부터 NRRO의 크기를 분석하는 것은 매우 중요하다. NRRO의 크기는 HDD의 기록밀도를 저해하는 직접적인 원인이기 때문이다. 대표적인 NRRO 분석방법으로 평균법과 주파수 해석법[6]이 있다.

평균법은 일정 회전주기 동안 N번 측정된 런아웃 데이터를 RRO와 NRRO로 분리하는 방법으로서 RRO는 N번의 일정회전 주기의 런아웃 데이터를 평균화하여 얻을 수 있고, NRRO는 일정 회전 주기 동안의 데이터로부터 RRO를 빼서 얻는다. 평균법에서는 일정회전 주기 동안의 데이터를 정확하게 얻어야 하므로 정확한 인덱스 신호가 필요하다. 스피들의 각 회전마다 동일한 위치에서 측정되지 않으면 NRRO분석이 부정확하게 되므로 별도의 encoder 혹은 제어 보드가 필요하다. 주파수 해석법은 주파수 영역에서 런아웃을 측정하여 NRRO를 분리하는 방법으로서 TIR로부터 회전 harmonics를 제거하여 NRRO 스펙트럼을 얻는다. 주파수 해석법에는 인덱스 신호가 필요하지 않아 간단하면서도 신뢰할 수 있는 측정이 가능한 방법이다. 그림 8은 주파수 영역에서 회전속도 harmonics를 제거하고 난 다음의 스펙트럼으로 디스크 런아웃의 NRRO 스펙트럼을 나타낸다.

시간영역에서 런아웃의 크기와 파워 스펙트럼과의 관계는 랜덤 신호의 경우 Parseval's theorem를 이용하여 얻을 수 있다. 즉, 주어진 주파수 영역에서의 파워 스펙트럼(rms)의 합은 시간 영역 신호의 분산과 같다.

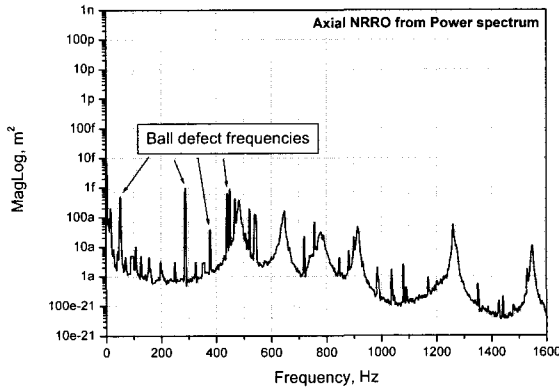


그림 8 축방향 NRRO 스펙트럼

$$\sigma^2 = \sum \text{RMS Power spectrum} \quad (1)$$

식 (1)을 이용하여 표준편차를 구해보면 그림 7의 TIR은 10.1 μm , 그림 8의 NRRO는 60.3 nm이다. 식 (1)은 주파수 해석법으로 구한 NRRO의 overall 크기를 구할 때 유용하게 사용되고 있다.

4. 맺음 말

3.5인치급 HDD는 이제 40 GB/platter를 넘어 80 GB/ platter를 향해 가고 있다. 이 경우 헤드 진동은 약 30 nm이내로 규제하고 있다. PES로 나타내지는 헤드 진동은 디스크-스핀들 시스템의 진동뿐만 아니라 windage에 의한 진동, servo track writer로부터 기인하는 written-in RRO를 모두 포함하고 있으며, 현재 디스크-스핀들 시스템의 NRRO 크기만으로 이미 규제된 값보다 훨씬 크다. 규제된 값을 넘어버린 진동을 갖는 디스크-스핀들 시스템으로 80 GB/

platter를 달성할 수 없는가? 필자는 그렇지 않다고 생각한다. 여기에는 서보 제어를 사용하여 위치 오차를 보상하는 기술이 숨어 있다. 이제는 서보 제어와 함께 디스크-스핀들 시스템을 이해하고 취급해야 하며 나노 진동을 달성하기 위한 진동 저감 설계와 더불어 나노 진동에 맞춘 새로운 진동 평가방법에 대하여 깊이 생각해야 될 때라고 생각한다.

참고 문헌

- (1) Deeyiengyang, S. and Ono, K. 2001, "Suppression of Resonance Amplitude of Disk Vibrations by Squeeze Air Bearing Plate," IEEE Trans. Magn., Vol. 37, No. 2, pp. 820~825.
- (2) Kang, S. W., et al., "Disk Damper for Reducing Disk Vibration of Storage Devices," Apr., 2001, US Pat. Pending
- (3) Imai, S., 2001, "Fluid Dynamics Mechanism of Disk Flutter by Measuring the Pressure Between Disks," IEEE Trans. Magn., Vol. 37, No. 2, pp. 837~841.
- (4) Tatewaki, M., Tsuda, N. and Maruyama, T., 2001, "An Analysis of Disk Flutter in Hard Disk Drives in Aerodynamics Simulations," IEEE Trans. Magn., Vol. 37, No. 2, pp. 842~846.
- (5) Jang, G. H., Kim, D. K. and Oh, J. E., 1999, "New Frequency Domain Method of Nonrepeatable Runout Measurement in a Hard Disk Spindle Motor," IEEE Trans. Magn., Vol. 35, No. 2, pp. 833~838.