

하드 디스크 드라이브 디스크-회전체 계의 실험적 모드 해석

°김철순*, 박종승**

Experimental Modal Analysis of Disk-Spindle System in Hard Disk Drive

Cheol-Soon Kim and Jong-Seung Park

ABSTRACT

In this work, to identify the dynamic characteristics of disk-spindle system in hard disk drive, experimental modal analysis was performed. And an experimental analysis system including testing apparatus, precision sensors, and analysis software was established in order to perform the testing effectively. From the experimental results, coupled and uncoupled modal characteristics of 3-disk spindle system are clearly identified.

1. 서론

HDD(Hard Disk Drive)는 자기테이프, CD-ROM 등에 비해 매우 빠른 데이터 전송 속도를 가지고 있고, 대용량화가 가능하여 정보 저장기기 중 가장 중요한 위치를 차지하고 있다. 최근 컴퓨터의 발달과 함께 정보화 사회로의 급진전 및 S/W의 대형화에 따라, 90년 이후 HDD의 기록 용량이 매년 1.6배 정도로 급격히 증가해 왔다. 또한 단위 시간에 처리해야 하는 데이터의 양이 크게 증가함에 따라 빠른 데이터 탐색 및 전송속도가 필수 요구조건으로, 이에 따라 디스크의 회전수도 계속 증가하여 최근 12,000rpm에 이르는 제품도 출시되고 있다.

HDD 시스템은 Fig. 1의 개략도와 같이 기록 매체인 자기디스크(magnetic disk)와 이를 일정속도로 회전시키는 스피들(spindle), 데이터를 Read/Write하는 자기헤드(magnetic head) 및 이를 구동하는 VCM(voice coil motor) Actuator, 그리고 전체를 지지/고정하는 베이스(base) 및 커버로 구성되어 있다. 그리고 헤드를 원하는 데이터 트랙(track)으로 이동/유지시키는 Servo 제어기 등으로 구성된 회로가 있다.

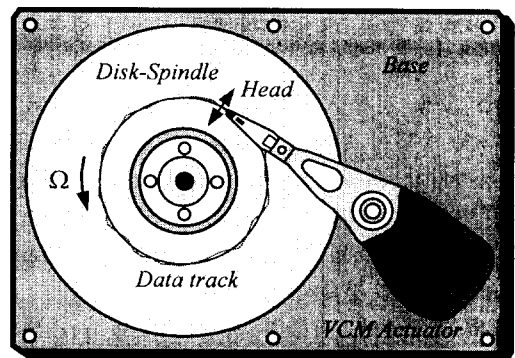


Fig. 1 Schematics of HDD Mechanism

HDD에서 헤드가 자기디스크 표면에 데이터를 정확하게 읽고/쓰기 위해서는, 헤드의 서보 제어가 정밀하게 유지되어야 하지만 근본적으로 디스크-스핀들이 고속 회전시에도 주어진 회전 정밀도 이내에서 안정되게 회전하여야 한다. HDD 디스크-스핀들 시스템은 Fig.2와 같이 고정축(shaft), 베어링(bearing), 허브(hub)의 스피들을 모터와 디스크, 스페이서(spacer), 클램프(clamp) 등의 디스크 스택과 스피들을 지지하는 베이스 및 커버 등으로 구성된다. HDD 스피들의 진동은 스피들의 회전 주기에 따라 반복적으로 발생하는 진동 (RRO, Repeatable Runout),

* 정회원 삼성종합기술원 정밀기계 LAB

** 삼성종합기술원 정밀기계LAB

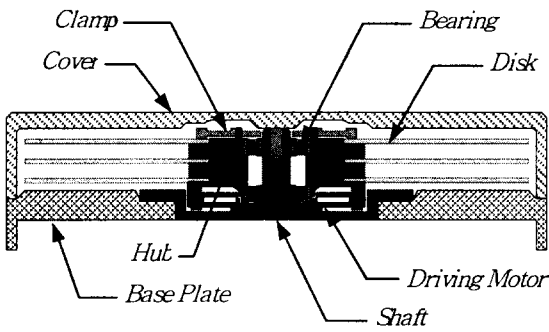


Fig. 2 Schematics of HDD Disk-Spindle System

그리고 일시적으로 발생하는 비주기적인 진동(NRRO, Non-Repeatable Runout)으로 구분할 수 있는데 주로 문제가 되는 것은 NRRO이다[1, 2, 3]. HDD에서 요구되는 스피들의 회전 정밀도는 트랙 밀도 즉 TPI(tack per inch)에 의해 결정되는데, 최근 기록 밀도의 증가에 따라 스피들의 NRRO는 $0.15\mu\text{m}$ (at 8000TPI) 이하로 유지되는 것이 요구되고 있다. NRRO의 주요 발생 원인은 불베어링의 결함에 의한 가진과 고속 회전시 발생하는 공기 유동에 의한 가진 등이며, 이러한 가진력이 디스크-회전체 시스템의 고유 진동수 근처에 존재할 때 증폭되어 큰 진폭의 응답이 발생하게 된다. HDD의 기록 밀도를 향상시키기 위해 스피들 시스템의 회전 정밀도를 높여야하며, 이에 따라 시스템에서 발생하는 가진력과 함께 시스템의 고유 특성(natural frequency & mode shape)을 정확히 아는 것이 필요하다.

본 연구에서는 HDD 디스크-스핀들 시스템의 동특성 규명을 위해 HDD에 적합한 실험적 모드해석 시스템을 구성한다. 실험시 가진 방법으로는 충격망치(impact hammer)를 정지 및 회전시에 사용하였으며, 디스크 3장의 상대적인 모드를 규명하기 위해 디스크 사이에 삽입할 수 있는 센서를 이용하였다. 구성된 실험 시스템을 이용하여 정지 및 회전시 디스크-스핀들 시스템의 동특성을 실험적으로 규명한다. 특히 HDD에서 문제가 되는 3장의 디스크와 스피들이 연성된(coupled) 모드[4, 5, 6]에 대한 실제 거동을 규명한다.

2. 디스크-회전체의 실험적 모드 해석

HDD 디스크-스핀들 시스템에 대한 실험적 모드

해석을 위해 Fig. 3에 나타낸 것과 같은 측정 시스템을 구축하였다. 실험장치는 HDD 고정시스템, 비접촉 변위측정 시스템(ADE 3401, capacitance probe, 40kHz band), 충격 가진기(B&K 8203 impact hammer, 20kHz band), 주파수 분석기(HP 35670A 4-Ch.), 그리고 모드해석 S/W(LMS CADA-PC)로 구성되어 있다.

실험대상 시스템인 3.5" HDD는 디스크의 외경이 95mm, 두께가 0.8mm, 고정부 내경이 33mm, 그리고 디스크 사이의 간격은 2.75mm이다. 3장의 디스크가 적층되어 있는 HDD의 경우 디스크간의 간격이 좁아 측정과 가진이 어렵다. 이를 해결하기 위해 두께 1.9mm의 얇은 판 형태의 정전형 비접촉 변위센서를 디스크 사이에 넣어 모든 디스크의 변위를 측정하였다. 그리고 XYZ-stage에 센서를 부착함으로써

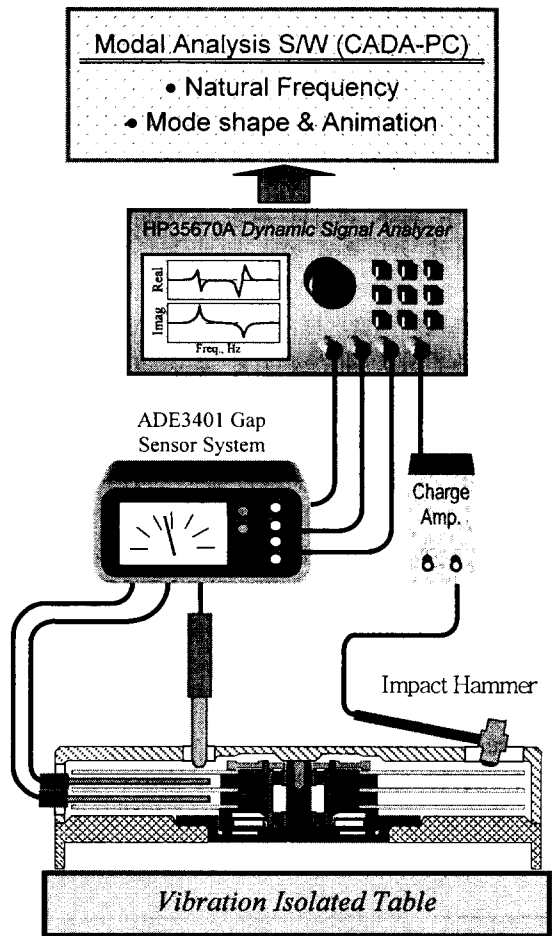


Fig. 3 Schematics of Modal Testing Setup

이동하면서 디스크의 변위를 측정할 수 있도록 하였다. 가진 방법은 소형 Impact Hammer를 디스크의 정지 및 회전시에 사용하였는데, 이 방법을 사용한 결과 회전시에도 간단하면서 효과적으로 디스크를 가진할 수 있었다.

모드해석 실험시 상면 디스크의 한점에서 가지를 하고 각 디스크의 36점(반경방향 3개×회전방향 12개)에서 축방향 변위를 측정하였다. 3장의 디스크에서 주파수 응답함수를 신호분석기(HP35670A)를 이용하여 얻고, 이를 모드 해석 프로그램으로 전송하여 고유진동수 및 모드 특성을 분석하였다[7].

3. 실험결과

Table 1은 HDD 디스크-스핀들 시스템의 정지시와 4500rpm으로 회전시의 고유진동수를 나타낸 것이다. 4500rpm으로 회전시의 결과를 보면 정지시에 1개의 고유진동수로 나타났던 모드들이 Axial 모드와 disk(0,0)모드를 제외하고, 회전주파수에 거의 비례하여 감소하는 후진(backward) 모드와 증가하는 전진(forward) 모드로 분리됨을 알 수 있다. 특히 Conical 모드의 경우는 HDD 스펀들처럼 베어링 사이의 간격이 좁고 디스크가 밀집된 구조를 가진 경우 고유진동수의 변화가 크게 나타나게 된다. 그리고 회전시 고유진동수가 400~600Hz 근처에 7개가 존재하며, 서로 다른 모드들이 매우 근접하여 나타남을 볼 수 있다.

Fig. 4는 디스크-스핀들 계의 Conical 모드로, 디스크와 베어링을 포함한 스펀들이 서로 연성되어 나타나는 것을 볼 수 있다. 이를 보면 적층되어 있는 3장의 디스크가 모두 같은 위상으로 움직이며, 클램프(clamp)로 고정되어 있는 디스크의 내경과도 같은 위상으로 진동하고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 디스크의 (1,0)모드 현상으로, 디스크의 한 직경을 중심으로 한쪽은 (+)로, 한쪽은 (-)로 진동하는 것을 볼 수 있다. 여기서 디스크 내경은 고정된 상태로 있으며 디스크상에 1개의 절 직경(Nodal Diameter)이 있어 Fig. 4의 Conical 모드와 구별된다. 특히 이 모드는 3장의 디스크가 관성 균형을 이루어 스펀들의 진동과 분리된(uncoupled) 현상을 보이며 고유진동수는 디스크 1장일 경우의 (1,0) 모드와 같은 값을 갖는다.

Table 1 Natural frequencies of HDD Disk-Spindle System

Mode	Natural frequency [Hz]	
	Stationary	$\Omega = 4500$
Conical (b)	535	460
Conical (f)	535	605
Axial	525	525
Disk (1b,0)	589	525
Disk (1f,0)	589	670
Disk (0,0)	600	605
Disk (2b,0)	712	560
Disk (2f,0)	712	870
Disk (3b,0)	1146	935
Disk (3f,0)	1146	1382
Disk (4b,0)	1889	1607
Disk (4f,0)	1889	2205

* f, b denotes forward and back mode respectively.

Fig. 6은 디스크와 스펀들이 축방향으로 연성되어 진동하는 모드이다. 3장의 디스크 모두가 같은 위상을 갖고 우산모양으로 움직이며, 클램프로 고정되어 있는 디스크의 내경도 디스크와 같은 위상으로 진동함을 알 수 있다. 3장의 디스크에서 서로 약간씩 다른 형상을 나타내는 것은 디스크 내경의 고정조건이 모두 다르기 때문이다.

디스크와 스펀들이 연성되어 나타나는 Conical 모드와 Axial모드는 디스크의 고정 조건 및 베어링 강성과 베어링 사이의 간격 그리고 플랜지의 지지 강성에 의존한다. 따라서 디스크와 스펀들이 연결된 시스템의 해석시 반드시 두 시스템의 연성을 고려하여 해석해야 함을 알 수 있다.

Fig. 7은 디스크가 우산 모양으로 진동하는 disk(0,0)모드로, 디스크 (1,0)모드와 마찬가지로 디스크 내경부의 진동은 거의 없고 디스크만 진동함을 알 수 있다. 여기서 3장의 디스크가 Fig. 5와 마찬가지로 관성 균형을 이루어 스펀들의 진동과 분리된 현상을 보이며, 고유진동수는 디스크 1장일 경우의 (0,0) 모드와 같은 값을 갖는다.

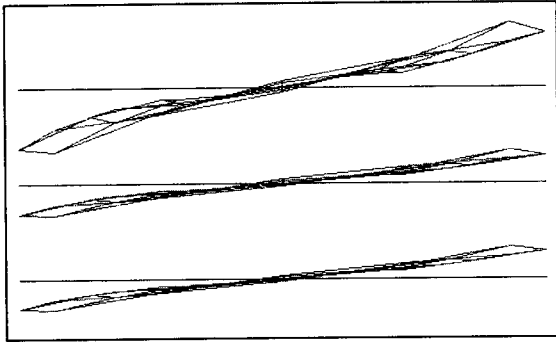


Fig. 4 Coupled conical mode [535 Hz]

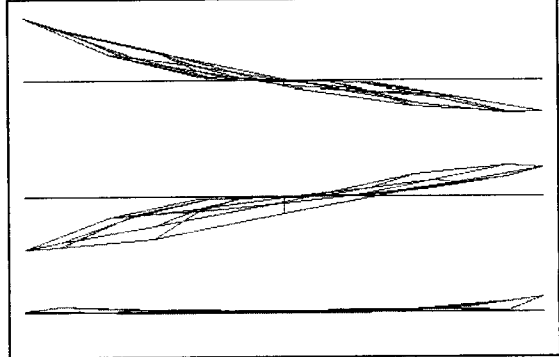
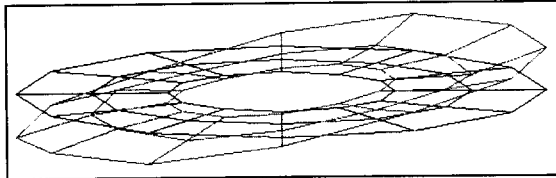


Fig. 5 Disk (1,0) mode [589 Hz]

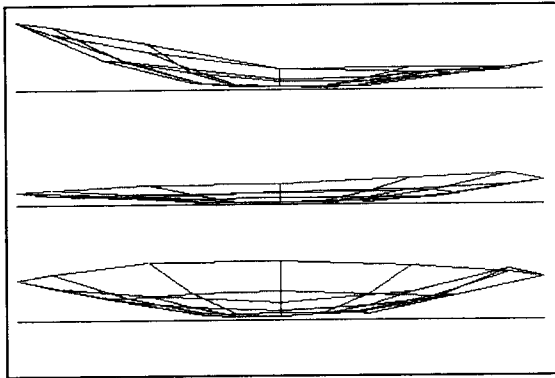
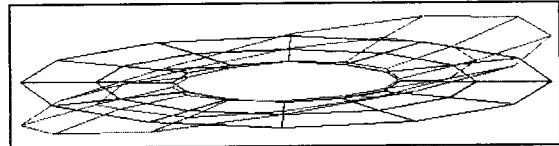


Fig. 6 Coupled axial mode [525 Hz]

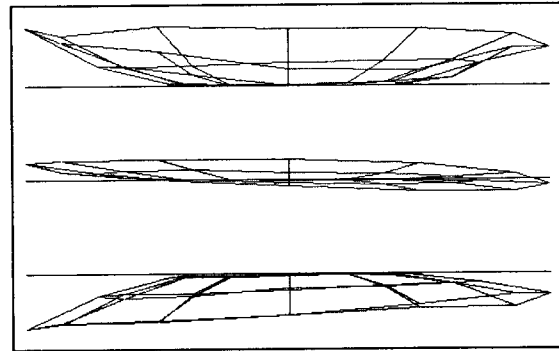
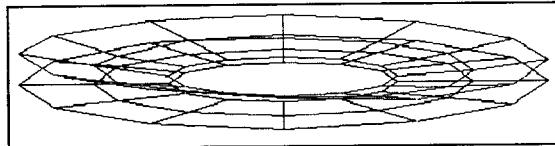


Fig. 7 Disk (0,0) mode [600 Hz]

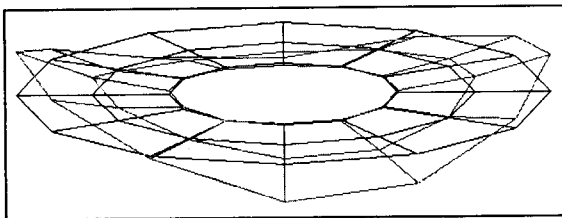
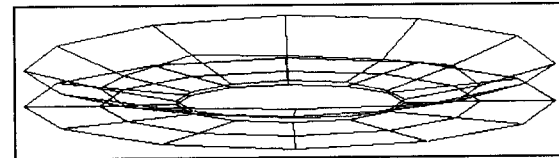


Fig. 8 Disk (2,0) mode [712 Hz]

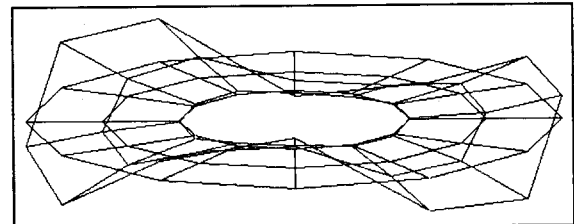


Fig. 9 Disk (3,0) mode [1146 Hz]

Fig. 8과 9는 절 직경이 2개/3개 있는 디스크 (2,0)모드 및 (3,0)모드이다. 이는 상부 디스크만의 모드 형상으로부터 구한 것이며, 이를 보면 내부 고정 조건이 유지됨을 볼 수 있다.

스핀들과 분리된 디스크 모드[Fig 5, 7, 8, 9]는 디스크의 Clamp 조건에 따라 고유진동수가 크게 달라지게 된다. 따라서 디스크 모드의 정확한 해석을 위해서는 실제 HDD에서 유효 Clamping 직경을 적절하게 모형화하는 것이 필요하다.

HDD 디스크-스핀들 시스템의 진동은 기록밀도에 영향을 미치는 중요한 기계적 특성의 하나인데, Conical 모드의 전진모드, (0,0) 모드, (1,0) 모드의 후진모드, (2,0) 모드의 후진모드 등이 대개 460 ~ 605 Hz 사이에 집중되어 있기 때문에, 모드들이 뚜렷이 구분되지 않거나 근접하여 나타나는 경우도 있다. 향후 고밀도 기록을 위해 특히 디스크 모드 중 후진모드는 회전수가 증가할 때 모드차수×회전수에 비례하여 고유진동수가 감소하여 볼베어링의 결합 주파수 등과 공진을 일으키기 쉬우므로 고속 고밀도 HDD의 설계시에는 반드시 고려되어야 함을 알 수 있다.

4. 결론

HDD 디스크-스핀들 시스템의 동 특성 규명을 위해 HDD에 적합한 충격가진 및 비접촉 변위 측정 장치 등으로 구성된 실험적 모드해석 시스템을 구성하였다. 이를 이용하여 디스크-스핀들 시스템의 정지 및 회전시의 고유진동수와 모드특성을 구하였다. 특히, 단순히 디스크 자체의 진동특성 뿐만 아니라 3장의 디스크와 스핀들이 연성된 진동현상을 정확히 분석하였다.

참고 문헌

1. K. Ono, N. Saiki, Y. Sanada, A. Kumano, "Analysis of Nonrepeatable Radial Vibration of Magnetic Disk Spindles," ASME Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 113, 1991.
2. E. J. Klein, "The Asynchronous Runout of Spindles," ASME DE-Vol. 7, 1987.
3. G. Bouchard, L. Lau, and F.E. Talke, "An

- Investigation of Non-Repeatable Runout," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-23, No.5, 1987.
4. C.W. Lee, H. S. Jia, J. H. Seo, C. S. Kim, and S. B. Chun, "Prediction of Coupled Vibrations in Hard Disk Drive Spindle System," ASME Proceedings of DETC'97, Sacramento, 1997.
5. R.G. Parker, C.D. Mote, Jr. "Vibration and Coupling Phenomena in Asymmetric Disk-Spindle Systems," ASME Proceedings of ISPS-Vol. 1, 1995.
6. I.Y. Shen, C.P. Roger Ku, "On the Vibration Analysis of Multiple Rotating Flexible Disks," ASME Proceedings of ISPS-Vol. 1, 1995.
7. 김철순, 박종승, 김한준, HDD 스핀들 시스템의 진동분석, 삼성종합기술원 보고서, 1996.