

정보저장기기용 회전디스크의 임계속도 및 플러터 속도에 관한 연구

°이승엽*, 운동화**

Critical and Flutter Speeds of Rotating Disks in Information Storage Devices

Seung-Yop Lee*, Dong-Wha Yun**

Abstract

Recent trends in information storage devices disk are the transition from CD drives to high density DVD drives, the development of writable disk drives and the appearance of several high-density portable disk drives. In some flexible disk drives, self-excited disk vibrations become severe as rotation speed increases near or above critical speed. Critical speeds of CD/DVD, ASMO and floppy disks are experimentally measured and compared with analytical predictions. Flutter instability caused by aero-induced disk vibration at high speeds are experimentally observed. In ASMO, three nodal-diameter mode experiences its flutter at 8750 rpm with the frequency lock-on phenomenon. The CD/DVD disk does not have the aero-induce flutter up to 14,000 rpm.

1. 서론

정보전달 및 저장기술의 급격한 발전에 힘입어 정보사회의 실현이 더욱 가속화 되고 있다. 특히 인터넷의 대중화와 더불어서 멀티미디어 정보를 취급하게 됨으로 개인용 컴퓨터(PC)로부터 초고속 초대형 컴퓨터에 이르기까지 엄청나게 많은 정보의 저장용량을 요구하게 되었으며 다양한 정보저장기기에 대한 폭발적인 수요를 불러일으키게 되었다.

1957년 IBM이 최초의 하드 디스크 드라이브(Hard Disk Drive, 이하 HDD)인 RAMAC (IBM 350)을 개발한 이후 수십년 동안 HDD는 대표적인 정보저장기기로서 정보산업발전에 크게 기여해왔다. 그리고, 80년대 이후 멀티미디어 시대가 본격화 되면서 저장매체로 CD-ROM으로 대표되는 광디스크 드라이브의 보급이 급속하게 이루어졌다. 정보저장기기는 기계, 전자 그리고 재료 공학등 공학 전반의 기술 협력과 발전이 요구되어지는 첨단 기기로서 그 어느 분야보다도 치열한 개발경쟁이 이루어지고 있는 첨단 산업이다

매년 60%의 저장밀도의 증가가 이루어지고 있는 HDD는 그동안 컴퓨터의 메인 저장기기로서 발전되어 왔으나 최근에는 다양한 휴대용 정보기기에 응용되도록 소형의 하드디스크 및 광디스크 드라이브가 개발되고 있다. 1984년에 세계 최초로 Compact Disk (CD)가 개발된 이후로 다양한 형태의 광 디스크 드라이브가 사용되고 있다. CD-ROM의 경우 고용량의 데이터 전송률을 요구하는 소비자의 욕구를 만족시키기 위해 급격한 디스크 회전 속도 경쟁이 이루어졌다. 고밀도 및 기록가능 광 디스크 드라이브에 대한 요구는 DVD (Digital Versatile Disk)와 여러 형태의 기록가능(writable) 광디스크의 출현을 가져왔다. 이같은 CD-ROM 드라이브에서 고밀도 DVD 드라이브로의 전환과 기록가능 드라이브의 사용은 정보 저장과 재생시 오차를 줄이기 위한 기계적 공차와 진동의 저감 그리고 트랙킹과 포커싱 매커니즘의 개선이 필요하게 되었다.

본 글에서는 대표적인 정보저장기기인 하드디스크 드라이브와 CD 및 DVD를 포함하는 광디스크 드라이브의 최근 동향과 회전 디스크의 기계적 진

* 서강대학교 기계공학과, 정회원
** 서강대학교 대학원 기계공학과

동 특성을 살펴보기로 한다. 고속 회전하는 정보 저장 디스크에서 나타나는 진동 특성과 관련하여 고유진동수가 제로가 되는 임계속도와 고속 회전시 공기 유동과의 연성에 의한 플러터 불안정성이 발생하는 플러터 속도에 대한 실험적인 결과들을 소개한다.

2. 광디스크 드라이브의 기계적 진동

2.1 광디스크 회전속도

디스크의 임계속도의 30% 정도에서 회전하는 하드디스크 드라이브는 저장밀도의 증가에 연구 초점이 맞추어 있으나 저장용량이 고정되어 있는 CD-ROM 이나 DVD-ROM 은 데이터 전달율을 높이기 위한 디스크 회전속도의 증가에 관심이 집중되어 왔다. 최근 3년 동안 CD-ROM 의 회전속도가 8 배속에서 48-52 배속으로 비약적인 증가가 이루어졌다. 고밀도 광디스크인 DVD-ROM 의 경우에는 최근 12 배속의 제품이 출시되고 있는데 디스크 회전속도에 있어서는 52 배속 CD-ROM 과 비슷하다. CD 및 DVD 디스크의 임계속도는 약 7000 rpm 정도로 측정되어지는데 회전속도의 배속 경쟁 때문에 CD-ROM 과 DVD-ROM 모두 이미 초임계속도 (supercritical speed)에서 디스크가 회전하고 있다 [1]. 현재 CD 및 DVD-ROM 의 회전속도와 배속 그리고 데이터 전달율을 현재의 HDD 와 비교하여 Table 1 에 나타내었다.

Table 1 Comparison of CD, DVD and HDD

Feature	CD	DVD	3.5" HDD
Storage(MB)	680	4700(one layer)	10 GB (1 장)
Disk dia.(mm)	120	120	90
Disk Thick.(mm)	1.2	1.2 (2x 0.6)	0.8
Min. pit leng. (μm)	0.83	0.4	-
Laser waveleng.(nm)	780	635-650	-
N.A.	0.45	0.6	-
Track pitch(μm)	1.6	0.74	-
Track density(TPI)	16,000	34,000	30,000
Bit density(BPI)	43,000	96,000	300,000
Rotation speed(rmp)	6000-9000(48X)	6000-9000 (12X)	7200/10,000
Max.Focus.Toleran	1.0	0.5	-
Max.Track.Toleran	0.1	0.05	0.13

2.2 광디스크 드라이브 구조

Fig. 1 에서 보는 바와 같이 전형적인 CD/DVD-ROM 드라이브는 로딩계, 피딩계, PCB(Printed Circuit Board)계 그리고 프레임계로 구성된다. 로딩계는 CD/DVD 디스크의 탈착을 위한 디스크 트레이와 로딩모터를 포함한다. 피딩계는 광 픽업, 픽업 이송하는 피딩모터와 디스크의 스피들 모터로 구성되는 드라이브의 핵심적인 부분이다. 광 픽업은 광디스크 상의 데이터가 기록된 위치에 레이저를 입사시켜 그 반사광을 받아들여 디스크 표면에 쓰여진 데이터를 읽는다. 이 픽업은 레이

저 다이오드, 대물렌즈(object lens), 서스펜션, VCM 을 포함한다. 이송장치(feeding mechanism)는 피딩모터를 이용하여 광픽업을 이송해주며 랙-피치언 방식, 피드 스크루 방식, 리니어 모터 방식이 이용된다.

광디스크 드라이브에서 가공 및 조립 오차와 기계적 진동은 대물 렌즈의 트래킹과 포커싱 구동시 위치 오차를 야기시킨다. 고밀도의 디스크에서는 홈집과 작은 결함들에 의해 발생하는 오차도 무시할수 없으나 디스크/스핀들 시스템과 광 픽업에서의 발생하는 진동은 이러한 오차에 중대한 영향을 일으킨다. 광 디스크 드라이브에서 중요한 진동은 디스크 질량 불균형, 스피들에 의한 가진, 기계적 공진, 임계회전속도 불안정성 (critical speed instability) 그리고 디스크 플러터 등을 포함한다. 디스크와 픽업 시스템 양쪽에서 진동을 줄이는 기술은 디스크 드라이브의 저장밀도 및 성능을 향상시키기 위해서 절대적으로 필요하다.

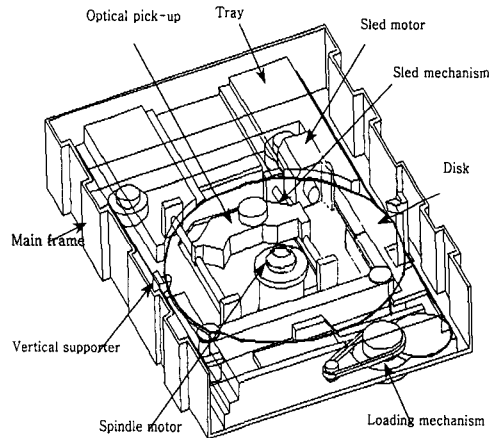


Fig. 1 Mechanical parts of a typical CD/DVD-ROM

저 고밀도 DVD 드라이브와 고속 CD-ROM 드라이브는 정확한 트래킹과 포커싱을 필요로 한다. 광디스크 드라이브에서 트래킹은 리니어 피딩모터 (linear feeding motor)와 렌즈 액츄에이터 (actuator)의 2 단계로 구성되어 있다. 렌즈 액츄에이터는 선 또는 판 스프링에 의해서 픽업이송장치에 매달려 있다. 트래킹 서보는 피딩 모터를 구동하여 픽업을 광디스크의 원하는 부분으로 이송하며 그 다음 렌즈 액츄에이터의 VCM 에 의해서 픽업의 대물렌즈가 미세한 운동을 하게 된다. 렌즈 액츄에이터는 약 100 μm의 움직임의 범위를 가지고 있다. 현재 CD 의 경우 렌즈는 트래킹 방향으로 0.1 μm과 포커싱 방향으로 1 μm의 오차안에서 렌즈를 움직여야 원하는 정보를 오차 없이 읽을

수 있다. 그러나, 작은 트랙 피치와 단과장 레이저를 사용하는 DVD 경우는 CD 보다 약 2 배 정도의 트랙킹과 포커싱의 정확도가 요구된다.

Table 2 는 액츄에이터에서 발생하는 트랙킹/포커싱의 상호 연성 및 경사운동을 일으키는 주요 원인을 나타낸다. 제작과정상 발생하는 조립오차나 자기장에 의한 편심력(eccentric force)에 의해 발생하는 구조적인 형태에 의한 원인과 탄성공진과 같은 동적 응답과 정적 간섭(static interference)에 의한 공진에 의한 원인 등으로 크게 나눌 수 있다.

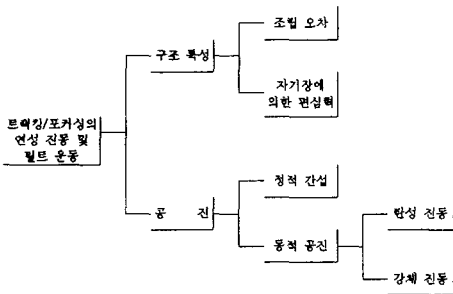


Fig. 2 Diagram for mechanical vibrations in pick-up system

광디스크 드라이브는 레이저를 이용하여 비접촉식으로 정보를 기록하고 재생하기 때문에 광픽업 장치의 개발이 가장 중요한 핵심기술로서 이에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 고배속 및 고밀도의 광디스크 드라이브에서는 고대역(high bandwidth) 및 높은 정밀도 특성을 갖는 광픽업 시스템이 요구된다. 특히 대물 렌즈를 디스크의 면진동이나 편심 등의 외란에 정밀위치를 추종하도록 하여 포커싱과 트랙킹 동작이 가능한 광픽업 액츄에이터에 개발이 필수적이며 설계시 디스크로부터 안정적인 데이터 재생을 위해서 기계적인 동적 안정성이 절실히 요구된다. 광디스크 드라이브에 있어서 대물렌즈를 포함하는 보빈(Bobbin) 구조물이 와이어 서스펜션에 의해 지지되는 일반적인 2 축 서보 액츄에이터는 "cross action"이라 불리는 트랙킹 과 포커싱의 연성된 진동을 유발한다 [3]. 이와 같은 서스펜션의 트랙킹과 포커싱 방향으로의 상호 연성과 회전모드에 의한 부차공진은 광픽업 액츄에이터의 성능을 저하시키므로 이의 영향을 최소화하기 위한 설계는 매우 중요하다.

3. 회전 디스크의 진동

3.1 모드 분리와 임계속도

회전하는 디스크의 진동은 Lamb 과 Southwell [5,6] 이래로 많은 연구가 있어왔고 최근에는 하드 및 광디스크를 포함한 정보저장기 분야의 진동해석에 응용되고 있다. 회전 디스크의 횡방향 진동(transverse vibration)은 정지 관찰자의 절대 좌표계와 디스크의 고정되어 함께 회전하는 회전 좌표계의 두 가지로 나타낼 수 있다. 정지한 구조물의 진동과 비교하여 회전 디스크에서 나타나는 중요한 동역학적 특징은 회전 응력과 모드 분리 현상, 그리고 임계속도 및 플러터 속도등을 들 수 있다. 정지한 디스크의 횡방향 진동은 디스크의 굽힘강성을 고려하는 원판(circular plate)으로 나타낼 수 있다. 디스크가 회전하게 되면서 면방향(in-plane)으로 원심력이 작용하여 반경방향과 원주방향으로 응력이 발생한다. 따라서 회전 좌표계에서 측정된 진동모드의 고유진동수는 정지시에 비해서 고유진동수가 증가하게 된다. 회전 디스크의 고유진동수는 정지 디스크의 고유진동수는 다음과 같다.

$$\omega_{mn}^2 = (\omega_{mn}^s)^2 + \Omega^2(a_n + n^2\beta_n)$$

여기서, ω_{mn}^s 은 정지 디스크의 고유진동수를 나타내며 a_n 과 β_n 은 각각 디스크 회전에 의한 반경방향과 원주방향의 응력 효과를 나타내는 값이다. 고유진동수 아래첨자 m 은 절점원 (nodal circle)을 의미하며 n 은 절직경(nodal diameter)을 의미한다. 위의 고유진동수는 회전 좌표계에 관찰된 것이므로 정지 관찰자에서 측정된 고유진동수로 변환하면 각각 전진파(forward wave) 및 후진파(backward wave) 고유진동수로 나타난다.

$$\omega_{mn}^f = \omega_{mn} + n\Omega, \quad \omega_{mn}^b = \omega_{mn} - n\Omega$$

전진 고유진동수는 회전속도에 비례하여 증가하며 후진 고유진동수는 반대로 감소한다. 디스크의 회전속도가 증가하면서 후진파 고유진동수는 영이 되는데 이때를 임계속도(critical speed)라 정의한다. 이를 정리하면 다음과 같다.

$$\Omega_{cr} = \frac{\omega_{sn}}{\sqrt{n^2(1-\beta_n) - \alpha_n}}$$

디스크의 회전임계속도는 원주방향 이동과의 진행속도가 디스크의 회전속도와 같게 되는 경우로 정의할 수도 있다. 이때 정지한 횡방향 외력에 의해서 디스크는 좌굴 불안정성(buckling instability)을 일으키게 된다. 회전속도가 증가하면서 처음으로 임계속도가 되는 진동모드를 임계모드라 정의하며 임계모드는 디스크의 물성치와 반지름비에 따라 다르게 된다.

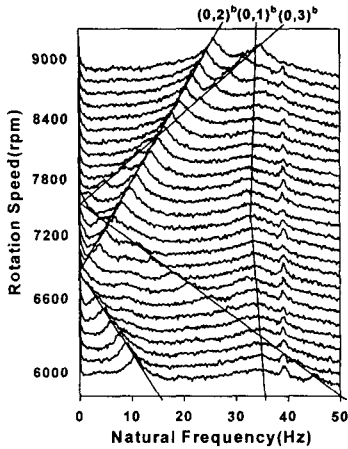


Fig. 3 Experimental natural frequency of CD/DVD

CD/DVD의 회전속도 증가와 함께 발생하는 모드 분리 현상과 임계속도가 실험적으로 관찰된 결과가 Fig. 3에 나타나 있다 [6]. 그림에서 보는 바와 같이 (0,2) 모드가 6800 rpm에서 제일 먼저 고유진동수가 영이 된다.

디스크에 발생하는 진동모드는 절점원과 절직경의 개수에 따라 다양한 형태가 나타나는데 일반적으로 정보저장기에 사용되는 반지름 비를 갖는 원판은 절직경을 갖는 진동모드가 저주파 고유진동수를 갖게 된다. 다음은 회전 디스크의 임계속도를 클램프 반지름 비의 함수로 계산하여 표현한 식이다 [7].

$$\Omega_{cr}(rpm) = \sqrt{\frac{Et^2}{\rho R_o^4} \left[42.3 \left(\frac{R_i}{R_o} \right)^2 + 2.4 \left(\frac{R_i}{R_o} \right) + 11.0 \right]}$$

이 식을 이용하여 Table 2에 다양한 정보저장기의 임계속도와 현재 상용제품에 사용되는 회전속도를 비교하였다. 임계속도의 30% 정도에서 회전하는 하드디스크에 비해서 현재의 CD-ROM 및 DVD-ROM에서 광디스크는 임계속도 이상으로 회전하고 있음을 볼 수 있다. 디스크가 초임계속도에서 회전할 때 발생하는 좌굴 불안정성은 정지한 수직력에 의해서 발생한다. 따라서 임계속도 이상에서 회전하는 디스크 드라이브 설계시 드라이브 내부 구조에 의해서 발생하는 디스크 주위의 공기유동에 의한 압력이 불균형되지 않도록 설계하여야 한다 [2].

현재의 CD-ROM 드라이브의 회전속도가 디스크의 임계속도 이상에서 회전하므로 CD/DVD 디스크의 진동 특성을 향상시키기 위해 새로운 사출성형법을 사용하여 디스크에 초기 잔류응력을 가함으로 디스크의 고유진동수 및 임계속도를 향상시킬

수 있다 [6]

Table 2 Comparisons of CD, DVD and HDD

	R_o (mm)	R_i (mm)	t (mm)	Ω (rpm)	Ω_{cr} (rpm)
3.5" Floppy	43.0	12.5	0.05	360	724
Iomega ZIP	43.0	12.5	0.05	3600	724
ASMO	60	15	0.6	2000-3000	3560
CD	60	15	1.2	6000-8000	7122
HDD	47.5	15	0.8	5400-10000	29050

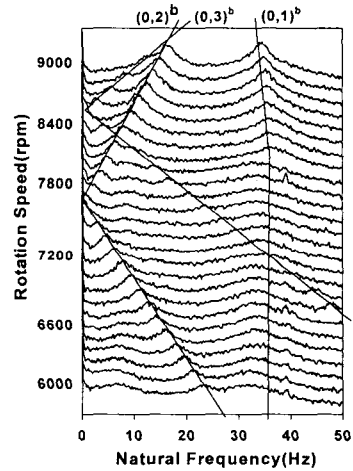


Fig. 4 Experimental natural frequency of new CD/DVD disk [6]

Fig. 4는 이러한 방법으로 0.3Mpa의 초기응력을 갖도록 제작된 디스크의 실험 결과를 나타낸다. Fig. 3과 비교하여 (0,2) 모드의 임계속도는 6800rpm에서 7600rpm으로 (0,3) 모드는 7400rpm에서 8500rpm으로 약 12% 증가됨을 볼 수 있다.

3.2 공기유동에 의한 디스크의 플러터

디스크가 임계속도 이상인 초임계속도에서 회전하게 될 때 디스크 주위의 공기유동에 의해서 디스크의 유체유발진동(fluid-induced vibration)이 발생하여 플러터 불안정성이 일어날 수 있다. 최근에 정보저장기용 디스크의 회전속도가 급격히 증가되면서 공기유동과의 연성에 의한 회전 원판의 진동 불안정성에 대한 많은 연구들이 이루어지고 있다. [8,9]. 일반적으로 디스크 주위의 공

기유동은 원주방향으로는 회전 분포 감쇠로 그리고 반경방향으로는 분포 강성으로 작용하여 회전 디스크의 동적 안정성을 향상시킨다. 회전속도 이상에서는 공기 유동이 디스크의 동적 불안정성을 발생시키는데 이때의 속도를 플러터 속도라 정의한다. 이러한 플러터 불안정성의 원인으로서는 공기 유동의 의한 원주 방향 회전 분포 감쇠의 속도가 디스크의 진동파의 이동 속도보다 크게 되어 디스크의 회전 운동에너지가 디스크의 진동에너지로 변환되기 때문이다. 공기유동의 반경방향 분포 강성은 디스크의 진동 특성을 향상 시키는데 예를 들면 디스크가 고정된 면에 가까이 회전할 때는 초임계속도에서도 진동 안정성을 이룰 수 있다.

ASMO 디스크

다양한 형태의 회전 디스크의 플러터 연구에도 불구하고 광디스크 드라이브의 공기유동에 의한 플러터 불안정성은 최근에야 실험적으로 증명되었다 [10]. 논문에서는 CD의 두께의 절반인 ASMO 디스크를 사용하여 실험하였다. 임계속도 이상으로 디스크가 회전하게 되면서 플러터가 일어나는 현상을 관찰하기 위해서 10,000rpm 까지 150rpm 단위로 회전 속도를 올려가면서 실험한 디스크 진동의 주파수 성분을 Fig. 5 에 나타내었다.

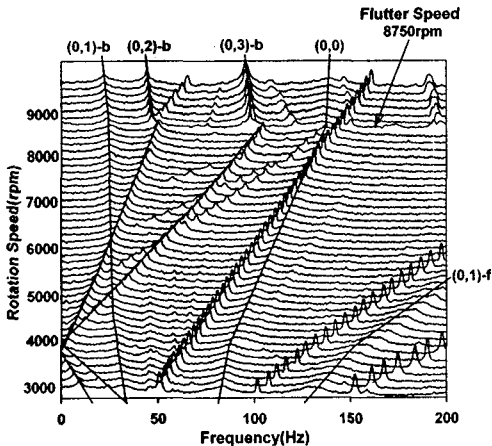


Fig. 5 Experimental natural frequency of ASMO

그림에서 보는 바와 같이 8750rpm 부근부터 (0,3)모드의 후진파 모드의 진폭이 갑자기 증가함을 볼 수 있으며 후진파 고유진동수가 임계속도 이후로 회전속도에 따라 증가하다가 플러터 속도 이후에는 증가되지 않음을 볼 수 있다. 이는 기존 연구에서 관찰된 결과[9]와 일치함을 알 수 있으며 이러한 현상을 일반적으로 Frequency lock-on 현상이라 한다. 따라서 8750rpm 을 ASMO 디스크의 플러터 속도가 되며 플러터가 발생하는 진동

모드인 (0,3) 모드를 플러터 모드라 정의한다.

Fig. 6 은 같은 실험에서 변위 진폭의 최소값과 최대값의 차이를 표시한 것이다. 8750rpm 이후에서는 그 이전보다 훨씬 큰 진폭을 갖게 됨을 알 수 있는데, 이러한 결과들을 종합해서 볼 때 8750 rpm 이후에서는 디스크에 플러터 불안정성이 발생할 수 있다.

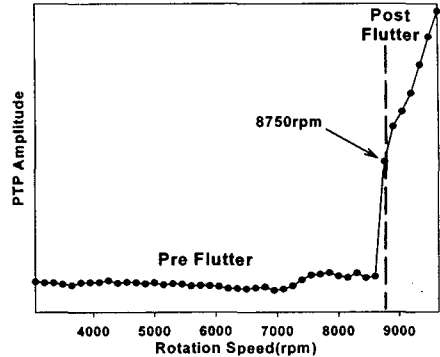


Fig. 6 Peak-to-Peak amplitude of ASMO

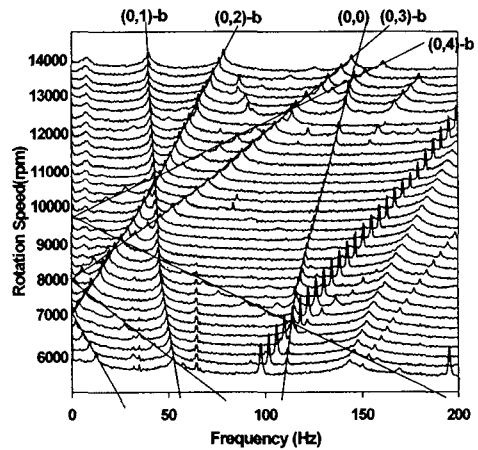


Fig. 7 Experimental natural frequency of CD/DVD

CD/DVD 디스크

CD/DVD 의 경우는 ASMO 디스크에 비해 두께가 두배이므로 매우 고속에서 플러터 불안정성이 나타날 것으로 예상된다. Fig. 7는 실제 CD에 대해서 15000 rpm 까지 회전할 수 있는 특별히 제작된 스피들 시스템에서 실험한 결과이다 [11].

14000rpm 까지 ASMO 디스크에서 나타난 바와 같은 Frequency lock-on 현상이나 큰 진폭이 나타나지 않음을 볼 수 있으며 따라서 CD/DVD 는 현재 속도보다 14000rpm 까지는 회전속도의 증가가 가

능하나 고속 회전시 발생하는 상당량의 소음 및 진동 그리고 소비 전력의 문제 때문에 지금과 같은 계속적인 회전속도의 증가는 불가능할 것이다.

하드 디스크

하드 디스크의 경우에는 Table 1 에 계산된 바와 같이 약 29,000 rpm 의 고속에서 임계속도를 갖기 때문에 그 이상의 회전속도에서 발생하는 플러터 불안정성은 실험적으로 실현 불가능하다. 최근 에 Kim et. al [12]은 실험 가능한 회전속도까지의 데이터를 이용하여 하드 디스크가 약 35,000rpm 에서 플러터가 일어남을 예측하였다.

4. 결론

본 연구에서는 정보저장기로서 광디스크 드라이브의 개발 동향과 회전 디스크를 중심으로 기계적 진동이 관련하여 임계속도와 공기 유동에 의한 플러터 불안정성에 연구하였다. 드라이브 성능에 미치는 영향을 살펴보았다. 현재 CD/DVD-ROM 드라이브에서는 디스크 회전속도가 최고 9000rpm 정도로 초임계속도에서 회전하고 있다. 임계속도를 높이기 위한 연구들 중 사출 성형시 초기 응력을 인위적으로 가하는 방법을 소개하였다. 데이터 전달율을 높이기 위한 회전속도의 계속적인 증가를 위해서는 공기유동과의 연성에 의한 소음 및 플러터 불안정성에 대한 대책이 요구된다. 그 동안 연구되었던 CD, DVD 및 ASMO 디스크의 회전 임계 속도 및 플러터 불안정성이 생기는 속도에 대한 실험 결과를 소개하였다. 기존의 광디스크 드라이브의 고속화 및 고밀도화뿐만 아니라 다양한 휴대용 정보저장기에 사용되는 초소형 정보저장기 및 근접장 렌즈를 사용한 차세대 광디스크 드라이브의 개발을 위해서 기계적 진동에 대한 연구와 종합적인 저감 대책이 절대적으로 요구된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 981-1002-013-2)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Lee, S.-Y., and Kim, S., "Mechanical Issues in Optical Disk Drives," *The 9th Symposium on Information Storage and Processing Systems, IMECE*, Vol. 4, pp. 81-90, 1998
2. Park, G., Song, I., Kim, S., and Lee, S.-Y., "Airflow and Sound Induced by Disk Rotation in DVD Drives, Part I: Effect of Design Parameters," *Journal of Information Storage and Processing Systems*, Vol. 2,

- No. 1, pp. 3-11, 2000
3. Saskusa, S, et al, "Directionally Coupled Vibration of a Two-Dimensional Actuator for CD Players", *JSME International Journal*, Vol. 57, No. 537, pp. 1492-1497, 1991
4. Lamb, H. and Southwell, R. V., "The Vibration of a Spinning Disk," *Proceeding of the Royal Society*, Vol. 99, pp. 272-280, 1921 I
5. Iwan, W. D., and Moeller, T. L., 1976, "The Stability of a Spinning Elastic Disk with a Transverse Load System," *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 43, pp. 485-490
6. Lee, S.-Y. and Kim, S "Design and Vibration Analysis of a New Optical Disk with Initial Stress," *Journal of Information Storage and Processing Systems*, Vol. 3, No. 1, pp. 1-8, 2001
7. Chonan, S., "On the Critical Speed of a Rotating Circular Plate," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 54, pp. 967-968, 1987
8. D'Angelo, C. and Mote, C. D. "Aerodynamically excited vibration and flutter of a thin disk rotating at supercritical speed," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 168, pp. 15-30, 1993
9. Hosaka, H. and Crandall, S. H., "Self Excited Vibrations of a Flexible Disk Rotating on an Air Film above a Flat Surface," *Acta Mechanica*, Vol. 3, pp.115-127, 1992
10. 김지덕, 이승엽, "고속회전시 광디스크의 플러터 불안정성: 이론적 예측과 실험 비교," *한국소음진동공학회 2000년도 추계학술대회*, pp. 777-783
11. Lee, S.-Y. and Kim J., "Critical and Flutter Speeds of Optical Disks," *Journal of Information Storage and Processing Systems*, (Submitted in 2001)
12. Kim, B. C., Raman, A. and Mote, C. D. "Prediction of Aeroelastic Flutter in a Hard Disk Drives," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 175, pp. 309-325, 2000