

HDD 디스크-스핀들 시스템의 동특성 개선에 관한 연구

좌성훈* · 손진승* · 이행수* · 홍민표* · 고정석* ·^o곽주영* · 조은형*

A Study on Dynamic Performance Improvement of HDD Disk-Spindle System

Sung Hoon Choa, Jin Seung Sohn, Haeng Soo Lee, Min Pyo Hong, Jeong Seok Koh,
Joo Young Kwak, Eun Hyung Cho

Abstract

This paper investigated the dynamic performance of HDD disk-spindle system to reduce disk fluttering. Rocking frequencies of the disk-spindle system and radial NRRO are measured to escape the ball defect frequencies and to determine the relative optimal position of the disk in the motor. It was found that disk fluttering was reduced by increasing disk thickness, inserting viscoelastic material between the disk and the spacer and decreasing the gap between the disk and the base.

1. 서론

하드 디스크 드라이브(HDD: hard disk drive)는 정보 산업 발전에 가장 크게 기여해 온 정보 저장 기기이다. HDD의 저장 용량 확대는 꾸준히 증가되어 왔는데 HDD 저장 용량의 팽목할 만한 증가의 요인은 HDD 면기록 밀도(areal density)의 경이적인 증대라 할 수 있다. 면기록 밀도는 선기록 밀도(linear density, BPI: bits per inch)와 트랙 밀도(track density, TPI: tracks per inch)의 곱으로 결정된다. BPI의 증가는 자기 기록 기술의 발전에 전적으로 기인하며, TPI의 증가는 기계적 동특성 향상에 크게 의존한다.

HDD에서 헤드가 디스크 트랙 위의 자료를 읽고 쓸 때 발생하는 오작동인 트랙비정렬(TMR: track misregistration)은 HDD 저장 용량과 관련된 트랙 밀도를 제한하는 중요한 요소가 되며, TMR의 직접적인 원인이 되는 것은 디스크-스핀들 시스템의 진동이다. 디스크-스핀들 시스템의 진동은 회전 속도의 상수 배로 반복되는 진동(RRO: repeatable runout)과 비반복적인 진동(NRRO: non-repeatable runout)으로 나뉜다. RRO는 servo 제어 시스템에 의해 어느 정도 보상할 수 있으나,

NRRO는 보상할 수 있는 방법이 없기 때문에 어느 정도 이상으로 커지면 TMR이 발생하게 된다. NRRO의 주가진원은 볼 베어링의 결함에 의한 가진과 고속 회전 시 발생하는 공기 유동에 의한 가진으로 알려져 있다.

TMR은 디스크-스핀들 시스템의 NRRO에 크게 영향을 받기 때문에 이에 대한 측정, 해석 및 저감에 관한 많은 연구들이 진행되어 오고 있다. Bouchard와 Lau 등[1]은 시간 영역과 주파수 영역에서의 NRRO 측정 방법을 제시하여 볼 베어링과 유체 베어링의 NRRO를 측정하였다. Klein[2]은 디지털 주파수 분석기를 이용한 반경 방향의 NRRO 측정 방법을 개발하였는데, 이 방법은 볼 베어링 결함의 측정뿐 아니라 정밀 스펙들 모터의 설계에도 이용되었다. Richter와 Talke [3]는 반경방향과 축 방향의 NRRO를 측정하여 그 상관 관계를 규명하였으며, 베어링 결함과 NRRO의 연관성에 관한 연구를 수행하였다. 한편, 디스크-스핀들 시스템은 디스크와 베어링의 연성에 의한 rocking mode를 갖는다. Rocking 주파수는 일반적으로 HDD 시스템에서 가장 낮은 주파수로 볼 베어링 결함 주파수에 의해 쉽게 가진 될 우려가 있다[4,5]. Frees[4]는 볼 베어링 결함 주파수가 rocking 주파수 근처에 있는 경우 공진 현상으로 인해 NRRO의 진폭이 커짐을 이론적 및 실험적 방법을 통해 보여 주었으며, Wang[5]은 rocking 현상에 대한 기본적인 개념을 정립하고 최적 스펙들 모터 설계를

* 삼성종합기술원 MEMS LAB.

위한 가이드를 제공하였다. 디스크에 저장된 정보를 헤드로부터 읽어 들이는 전달 속도는 디스크 회전 속도에 비례한다. 그러나, 고속 회전하는 HDD는 무시할 수 없는 공기 유동이 생기고 헤드 suspension이나 디스크 모드를 가진하게 되어 TMR를 유발하게 된다. D'Angelo 등[6]은 공기 유동에 의한 디스크 진동인 flutter가 트랙 밀도와 고속 회전을 요구하는 HDD에서 더 이상 무시될 수 없는 인자임을 표명했다. McAllister[7,8]는 실험적 방법을 통해 공기 유동에 의한 디스크 flutter가 디스크 재질 및 형상과 관련이 있다는 사실을 밝혀 내고, 고탄성 재료나 고감쇠 박층 재료의 사용으로 디스크 flutter가 현저히 줄어들음을 확인하였다. 공기 유동을 고려한 드라이브 내부 디자인 변경으로 디스크 flutter를 감소시키는 연구도 수행되었는데, Imai와 Tokuyama 등[9]은 디스크와 shroud 사이의 간극을 조정함으로써 디스크 flutter를 저감시킬 수 있었다. Imai와 Saegusa[10]는 회전 디스크 사이의 압력을 측정하여 디스크 flutter와 압력 변동사이의 상관 관계를 규명하였으며, 마찬가지로 디스크와 shroud 사이의 간극을 감소시켜 flutter를 줄일 수 있었다.

HDD 디스크-스핀들 시스템의 동특성이 개선됨을 확인하는 방법은 관점에 따라 여러가지가 있을 수 있으나 그 중 하나로 헤드가 데이터를 읽어 들이는 디스크의 진동량 저감으로 확인될 수 있으므로 본 논문에서는 먼저 현 시스템의 동특성을 다각도로 파악하기 위해 disk rocking mode, disk radial NRRO 측정의 실험을 행하여 디스크의 시스템 동적 거동에 대한 상대적인 최적위치를 선정하고, 추가적인 동특성 개선을 위하여 디스크의 두께 증가, 디스크의 장착 위치 변경, 점탄성 물질을 디스크와 spacer 사이에 삽입, 디스크와 베이스간의 간극을 줄였을 때 생기는 공기에 의한 진동감쇠의 효과 등을 적용하여 디스크의 축 방향 flutter 저감을 확인하고자 한다.

2. 실험 장치

본 실험에 사용된 HDD는 현재 삼성에서 생산/판매하는 "Spinpoint" 라는 상품명인 HDD로서 기록밀도는 20GB/platter 이고 회전속도는 5400rpm 이며 다음과 같은 실험을 통해 시스템의 동특성 개선을 하고자 하였다.

1. rocking mode 측정
2. radial NRRO 측정
3. axial flutter 측정

2.1 디스크 rocking mode 측정 실험

디스크의 rocking mode를 측정하기 위한 실험장치는 Fig. 1과 같다. 디스크가 정지 또는 회전

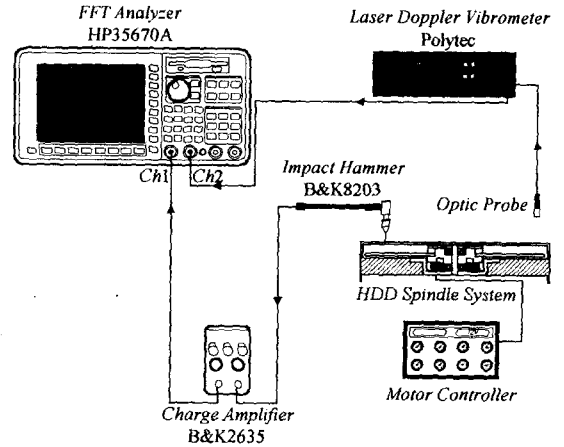


Fig. 1 Experimental setup for disk rocking mode

할 때, impact hammer로 가진을 하고 LDV로 응답을 받아 FFT analyzer로 주파수 분석을 한다.

2.2 디스크 radial NRRO 측정 실험

디스크 끝단부(OD)의 반경방향 NRRO를 측정하는 실험장치도는 Fig. 2와 같이 HDD 고정용 지

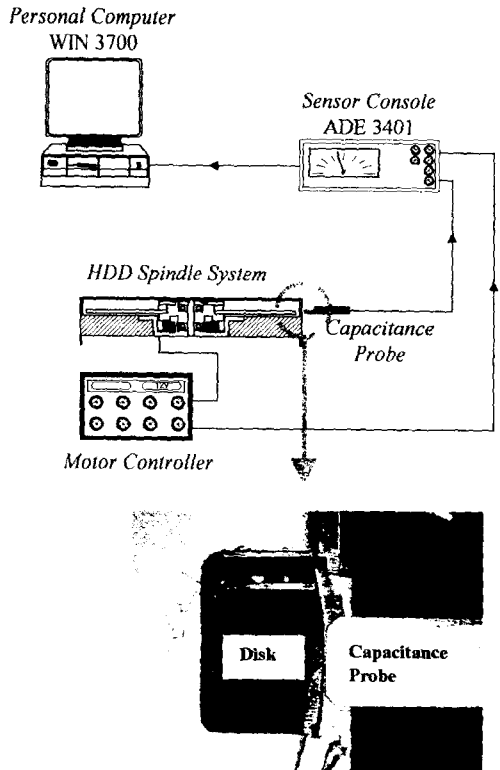


Fig. 2 Experimental setup for disk radial NRRO

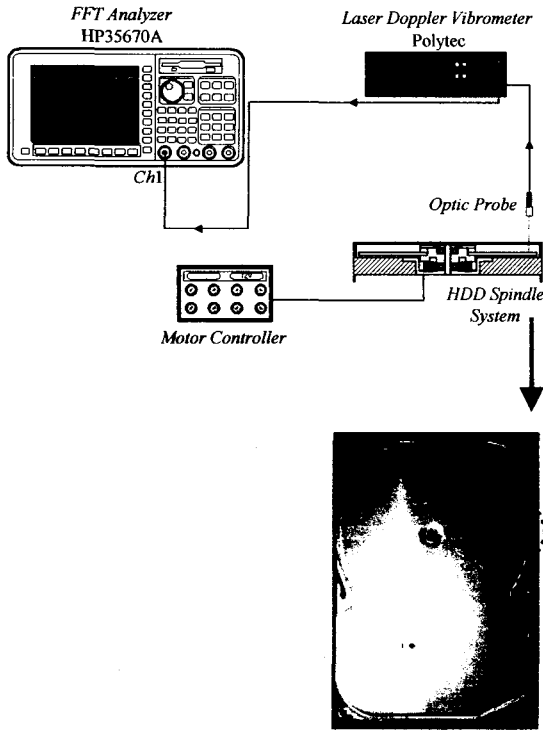


Fig. 3 Experimental setup for axial disk flutter

그 및 방진테이블, 스피들 구동기, 비접촉 변위 측정 시스템(ADE 3401, capacitance probe), ADE 장비 전용 신호처리 시스템(WIN3700)으로 구성되어 있다. 디스크와 센서와의 간극은 0.0001 inch 이내로 하여 보다 안정된 데이터를 받고자 하였으며, 총 256 회전에 각 회전당 256 개 데이터를 받도록 세팅하였다.

2.3 디스크 axial flutter 측정 실험

디스크 끝단부(OD)의 축 방향 진동량(disk axial flutter)을 측정하기 위한 실험장치는 Fig. 3 과 같다. 실험장치는 HDD 를 견고하게 고정하기 위한 지그 및 방진테이블, 측정 센서에 해당되는 LDV (laser Doppler vibrometer), 신호처리를 위한 주파수 분석기(HP35670A)로 구성되어 있다. 본 실험에서 LDV 는 disk flutter 의 속도량을 측정하게 되는데 감도는 25mm/s/V, tracking filter 는 100kHz 로 세팅하였다. 주파수분석기에서는 주파수 span 을 1.6 kHz 까지로 하고 flattop window 를 사용하여 신호를 처리하였으며, 디스크 고유 모드에 본 실험의 주 관심 대상이므로 평균법[1]을 이용하여 디스크 회전수 및 그 배수 성분은 제거하였다. 또한 HDD 내 공기유동이 disk flutter 에 무시할 수 없는 영향을 미친다는 연구결과[6]가 있어, 공기유동의 변화를 최소화 하기 위해서 디스크의 끝단부가 측정되도록 Fig. 3 과 같이 커버쪽에 LDV 의 laser 가

Table 1 Disk rocking frequencies

Sample Description			Rocking Frequency (Hz)		
Base	Motor	Disk location	Static	Dynamic (5400rpm)	
				Lower	Upper
Old	#1	Top	786	708	882
		Bottom	788	712	881
New	#1	Top	792	700	882
		Bottom	800	712	894
	#2	Top	804	714	894
		Bottom	788	702	878

충분히 통과할 정도의 작은 구멍을 뚫어 실험하였다.

2.4 실험 Sample Description

Base 는 현재 양산하는 HDD 에 적용중인 모델 (Table 1 의 “Old”)와 base 두께를 증가시킨 새로운 모델(“New”)을 준비하였으며, spindle motor 는 ball bearing 을 적용한 현재 양산중인 모델(“#1”)과 NRRO 가 저장된 새로운 모델(“#2”)을 준비하였다. 디스크의 두께는 40mil 과 50mil 로 비교 실험하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 디스크 최적 위치 선정

디스크 rocking mode 측정 실험중 디스크의 장착은 Fig. 4 와 같이 하였다. Table 1 은 그 실험결과로서 Rocking mode 는 모터와 디스크에 영향을 받으므로[4,5], Table 1 에서 보는 바와 같이 베이스의 변경에 따른 rocking frequency 는 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 한편 디스크의 장착 위치에 따라 rocking frequency 의 변화가 있음을 알 수 있는데, rocking frequency 가 ball defect frequency 에 의해 가진 되지 않도록 디스크의 장착 위치를 선정하는 것이 기본 방안이다[4]. 따라서, 모터의 NRRO 를 측정하여야 하나 본 실험은 디스크 반경방향 NRRO 측정 결과이므로 모터의 ball defect frequency 뿐만 아니라 디스크의 고유 진동 모드들도 나타나

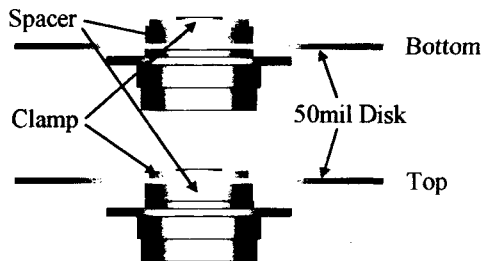


Fig. 4 Disk location on a motor

게 된다. NRRO의 주 원인으로 거론이 되는 ball defect frequency 들은 이론적으로 다음과 같이 계산 된다[2].

$$F_r = \frac{N}{60}$$

$$F_C = \frac{F_r}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \theta \right)$$

$$F_i = F_r - F_C$$

$$F_B = \frac{F_r}{2} \left(\frac{D}{d} \right) \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \theta \right)^2 \right]$$

여기서,

- N : shaft rotational speed (=5400rpm)
- d : ball diameter (=1.588mm)
- D : pitch diameter at the center of ball (=9.1mm)
- θ : contact angle of the ball bearing (=23.23deg)
- F_r : rotational freq.
- F_C : cage freq. (outer race)
- F_i : outer race freq. with respect to cage
- F_B : ball defect (axial)

이고, 위 네 주파수들을 기본주파수로 하여 모터가 회전시 다음과 같은 ball defect frequency 들이 나타나게 된다.

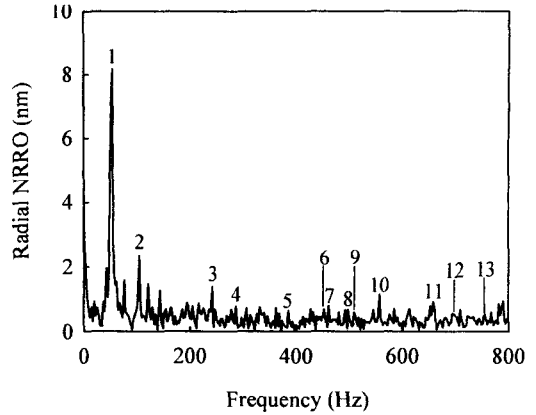
Table 2 Ball defect frequencies

Defect freq.	Interpretation
nzF_C	outer race (axial)
$nzF_C \pm F_r$	outer race (radial) forward/backward
nzF_i	inner race
$2nF_B \pm F_i$	ball defect (radial) forward/backward
$2nF_B$	ball defect (Axial)

여기서,

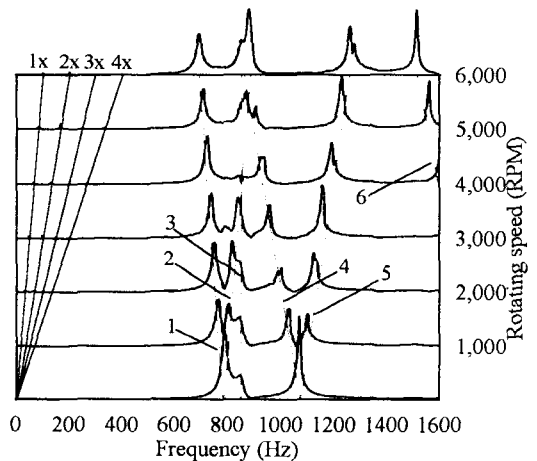
- n : positive integer (1, 2, 3, etc.)
- z : number of balls (=10)

위 식들에 의해 계산된 ball defect frequency 들을 바탕으로 디스크 radial NRRO 를 측정 한 그래프 상에 표시하면 Fig. 5 와 같다. 디스크까지 장착된 시스템의 NRRO 측정이므로 No. 12 에 rocking frequency 가 나타남을 볼 수 있다. Table 1 의 rocking frequency 와 Fig. 5 의 NRRO 측정 결과로는 디스크 장착 위치가 top/bottom 모두 가능하겠으나 본 논문에서 추가로 적용할 진동 저감 방안 등을 고려했을 때 디스크의 장착 위치는 bottom 쪽이



No.	Freq. (Hz)	Interpretation
1	53	ball revolution (=cage freq.)
2	104	ball revolution (2x)
3	247	ball rotation
4	287	outer race backward
5	374	outer race axial
6	452	ball radial backward
7	469	outer race forward
8	498	ball axial
9	523	inner race
10	557	ball radial forward
11	658	outer race backward (2x)
12	702	disk rocking frequency
13	755	outer race axial (2x)

Fig. 5 Disk radial NRRO



No.	Interpretation
1 / 2	rocking backward / forward
3	disk (0,0)
4 / 5	disk (1,0) backward / forward
6	disk (2,0) backward

Fig. 6 Waterfall plot

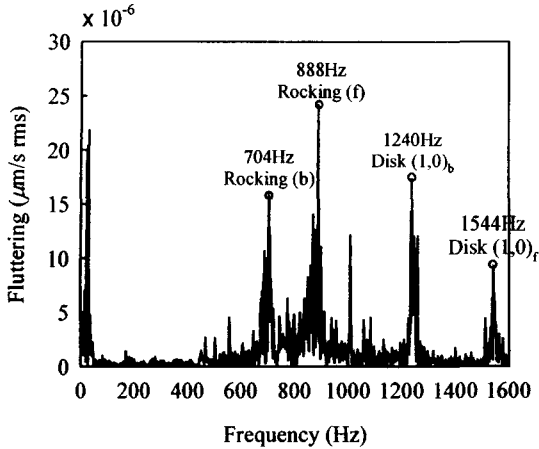


Fig. 7 Disk axial flutter

Table 3 Disk axial flutter reduction

Sample Description		Flutter (μm/s)	Improvement (%)
disk thickness	40 mil	210.6	39.9
	50 mil	126.7	
disk location	middle	131.7	12.1
	top	123.9	
	bottom	115.8	
motor	# 1	115.8	32.6
	# 2	78.1	
viscoelastic material	before	78.1	31.2
	after	53.7	

유리할 것으로 판단된다. 한편, 모터 회전수를 1000rpm 부터 6000rpm 까지 1000rpm 씩 증가 시키면서 측정된 rocking mode 에 대한 waterfall plot 은 Fig. 6 과 같다. Rocking mode 및 디스크의 고유 모드들이 뚜렷하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

3.2 디스크 flutter 저감

디스크 축 방향 flutter 를 줄이기 위해 본 실험에서는 디스크의 두께 변화, 디스크 장착 위치 변화, 디스크와 spacer 사이에 점탄성 물질 삽입, 디스크와 베이스간의 간극 변화등의 시도를 하였다. Fig. 7 은 디스크 flutter 측정시 주파수 영역에서 그려지는 전형적인 그림이며, Table 3 은 그 실험결과로서 디스크의 주요 주파수들의 속도량에 대한 RMS 값으로 상대비교 하였다. 이론적으로 디스크의 고유진동수는 디스크의 물성치, 기하학적 형상, 경계조건 등에 따라 달라지며 디스크의 고유진동수를 증가 시키면 디스크의 flutter 를 저감시킬 수 있다는 연구결과가 있는데[7,8], 본 실험결과 디스크두께가 40mil 에서 50mil 로 증가했을 경우 약 40%의 진동저감 효과를 보여주고 있음을 알 수 있다. Motor 의 변경에 의해 30%정도의 개선효과를 볼 수 있으며, 점탄성 물질(viscoelastic material)

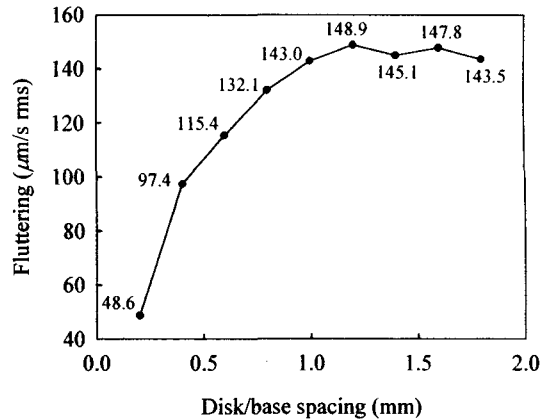


Fig. 8 Disk axial flutter reduction by disk/base spacing

을 삽입하여 30% 이상의 추가적인 진동 저감의 효과를 볼 수 있었는데 실제 시스템으로의 적용은 점탄성 물질의 열팽창성, outgassing, 내구성 등을 고려해야 할 것으로 사료된다. 한편, 최근 들어 새롭게 부각되고 있는 유체베어링을 적용한 spindle motor 에 50mil 디스크를 장착하여 디스크 flutter 를 측정하였는데 #2 대비 약 17% (64.6μm/s)의 저감 효과가 있음을 확인할 수 있었다. 여기서 한가지 주목할 만한 사항은 ball bearing 을 적용한 spindle motor 의 최저 flutter 량(Table 3 의 53.7μm/s) 이 유체베어링을 적용한 spindle motor 의 일반적인 flutter 량(64.6μm/s) 이하가 가능하다는 점인데, 본 실험에서 사용한 ball bearing 을 적용한 spindle motor 의 flutter 저감 방법은 앞에서 언급했듯이 고려해야 할 문제가 다수 있는 관계로 ball bearing spindle motor 로는 진동 저감의 한계가 있다고 판단된다.

본 실험으로부터 디스크 장착 위치가 변함에 따라 진동량이 달라짐을 알 수 있었는데, HDD 내 공기유동에 의한 효과가 있을 것으로 추정되어 디스크와 베이스의 사이의 간극을 조정하여 실험을 행하였다. Fig. 8 은 그 실험 결과로서 간극이 1.0 mm 이상에서는 비슷한 값을 보이다가 0.8 mm 이하에서는 disk flutter 의 현저한 저감을 보이고 있다. 특히 0.4 mm 에서 0.2 mm 로 변할 때는 진동값이 반으로 줄어들음을 알 수 있다. 본 실험은 디스크가 고속 회전할 때 디스크와 베이스 사이의 공기가 진동감쇠 효과를 보인 결과로 보여지며[6], 추후 디스크와 베이스 사이의 간극 대비 디스크 진동량과의 상관관계에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

4. 결론

HDD 디스크-스핀들 시스템의 동특성 개선을 위

하여 본 논문에서는 디스크의 flutter 저감의 관점에서 다음과 같은 시도를 하였고, 실험을 통해 디스크 flutter 의 저감을 확인하였다.

1. 디스크 두께 증가
2. 디스크 장착 위치 변경
3. 점탄성 물질 삽입
4. 디스크-베이스간 간극 조정

특히, 디스크와 베이스간의 간극 조정을 통한 flutter 저감효과를 보았는데 디스크와 베이스 사이의 공기가 진동감쇠 효과를 보인다고 판단되며 추후 이에 대한 이론적인 접근이 요구된다.

참고문헌

- [1] G. Bouchard, L. Lau and F. E. Talke, "An Investigation of Non-repeatable Spindle Runout," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 23, No. 5, 1987, pp. 3687-3689.
- [2] E. J. Klein, "The Asynchronous Runout of Spindles," *Mechanical Signature Analysis, Machinery Vibration, Flow-Induced Vibration and Acoustic Noise Analysis-De*-Vol. 7, 1987, pp. 95-99.
- [3] W. O. Richter and F. E. Talke, "Nonrepeatable Radial and Axial Runout of 5 1/4" Disk Drive Spindles," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 24, No. 6, 1988, pp. 2760-2762.
- [4] G. M. Frees, "Disk Drive Spindle Dynamics - Analysis and Measurement," *ASME Advances in Information Storage Systems*, Vol. 6, 1995, pp. 237-262.
- [5] J. Wang, "On the Dynamics of Rocking Motion of the Hard Disk Drive Spindle Motor System," *Advances in Information Storage Systems*, Vol. 7, 1995, pp. 251-267.
- [6] C. D'Angelo III, C. D. Mote, Jr., "Aerodynamically Excited Vibration and Flutter of a Thin Disk Rotating at Supercritical Speed," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 168, No. 1, 1993, pp. 15-30.
- [7] J. S. McAllister, "The Effect of Disk Platter Resonance on Track Misregistration in 3.5 Inch Disk Drives," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 32, No. 3, 1996, pp. 1762-1766.
- [8] J. S. McAllister, "Characterization of Disk Vibrations on Aluminum and Alternate Substrates," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 33, No. 1, 1997, pp. 968-973.
- [9] S. Imai, M. Tokuyama and Y. Yamaguchi, "Reduction of Disk Flutter by Decreasing Disk-to-Shroud Spacing," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 35, No. 5, 1999, pp. 2301-2303.
- [10] S. Imai and S. Saegusa, "Fluid Dynamics Mechanism of Disk Flutter by Measuring the Pressure between Disks," *Asia-Pacific Magnetic*