

# 1" HDD 의 진동특성 분석에 관한 연구

## Vibration Analysis of 1" HDD

한우섭\*·홍민표\*\*·변용규\*\*·고정석\*\*·정성원\*\*\*·장건희\*\*\*  
Woo-Sup Han, Min-Pyo Hong, Yong-Kyu Byun, Jeong-Seok Koh  
Seong-Weon Jeong and Gun-Hee Jang

**Key Words :** NRRO(런아웃), 1 " HDD(1" 하드디스크), Vibration(진동), HDD(하드디스크), PCMCIA

### ABSTRACT

In recent years, the demand of mobile device, such as digital camera, camcorder and PDA, increases remarkably. So, requirements of the mobile information data storage used in the mobile devices increase noticeably also. 1" micro data storage is a kind of mobile storage ,which has a CF type II form factor, and the similar structure of the general 3.5" HDD. In this paper, we performed the vibration analysis of the 1" micro data storage, such as measurement of the NRRO of the disk, and modal analysis.

### 1. 서론

PSC(Personal & Server Computers)를 기반으로 하는 21세기 정보화 사회는 고품질 정보통신 기술, 초고속 정보처리 기술, 대용량 정보저장 기술 등을 중심으로 하는 IT(Information Technology) 산업이 Bio 및 환경산업과 함께 핵심 산업을 이룰 것이다. 그 중에서 향후 IT 산업의 핵심은 Mobile 기술로 집약되며, 이에 따라, 휴대용 소형 정보 저장 장치는 각종 휴대용 기기에서의 내재화 추세로, MP3 Player 등의 디지털 AV 기기 뿐만아니라, PDA/Palmtop, 휴대용 컴퓨터, Digital Camera, Camcorder, GPS, Play station, HHP/Mobile Phone 등의 다양한 디지털 미디어 분야에서 사용되고 있다. 또한, 이러한 휴대용 정보저장 장치는 향후 IMT2000, Smart Phone 등의 발전에 따라 언제 어디서나 정보를 얻을 수 있고 오락을 즐길 수 있는 새로운 디지털 기기에 사용될 것으로 예상된다. 휴대용 정보저장 장치는 대표적인 기존의 일반적인 HDD와 달리 휴대성을 위해 여러 가지 특징이 요구된다. 특히, 휴대성을 위해 초소형화, 대용량화, Data 전송속도의 고속화, 저가격화, 저전력화 및 높은 내충격성이 요구된다. 이중 초소형화는 휴대용 기기의 보급 확대에 따라 주요한 이슈로 등장하게 되었으며, 기능의 복합화 및 화상 정보의 처리에 따른 정보저장의 대용량화도 크게 요구되고 있다. 현재 휴대용 저장기기로 가장 많이 이

용되고 있는 것은 CF I 규격을 따르는 Flash Memory로 기록 용량이 128MB에 이르고 있으며, 최근 자기기록 방식으로 CF II의 규격을 따르는 IBM의 Microdrive가 제품화되었다. 아직 일반 데스크톱 컴퓨터용 자기기록 저장기에 비하여 기억용량 및 자기기록/재생속도에는 뒤지지만, 기존의 Flash Memory와 같은 크기로 소형화하면서 Flash Memory에 비해 단위저장용량 대비 가격이 훨씬 저렴하면서도 큰 저장용량을 구현하여 앞으로 휴대용 기기에 선두주자가 될 가능성을 보이고 있다. 향후 휴대용 자기기록 저장장치는 2003년 3GB, 2006년 5GB 정도의 기록용량이 예상되며, 부피는 PDA와 같은 개인 휴대기에 적합하도록 초소형화 될 것으로 전망된다.

휴대용 자기기록 정보저장 장치에 있어 반도체 메모리인 Flash Memory의 성능을 증가하는 가장 중요한 요소는 역시 큰 기억 용량인데, 이 또한 Compact Flash의 42.8x36.4x5 mm<sup>3</sup>의 작은 크기인해, Disk의 크기 또한 1"로 제한되는 어려움이 있다. 이렇게 작은 디스크에 많은 용량의 데이터를 저장할 수 있도록 하기위해 기록밀도를 향상시켜야 하는데, 기록밀도는 크게 두 가지의 요인에 의해 제한되며, 각각 트랙밀도(Track Density)와 선형밀도(Linear Density)이다. 여기에서 선형밀도는 헤드 및 미디어의 특성에 의해 좌우되며, 트랙밀도는 스핀들 및 서스펜션의 진동특성에 의해 결정된다. 따라서, 초소형 1" HDD의 자기기록 용량을 증가시키기 위해서는 고밀도 트랙을 구현하여야 하며, 이를 위해 디스크-스핀들의 진동성능 평가는 매우 중요한 인자라 할 수 있다. 그림 1.에서 보이는 것 처럼, 스핀들 진동성능에 가장 큰 영향을 주는 요소는 디스크-스핀들 시스템의 런아웃으로 회전속도와 동기하여 발생하는

\* 삼성종합기술원, Storage Lab.  
E-mail : wshan@samsung.com  
Tel : (031) 280-9274, Fax : (031) 280-6955  
\*\* 삼성종합기술원, Storage Lab.  
\*\*\* 한양대학교, 기계공학부

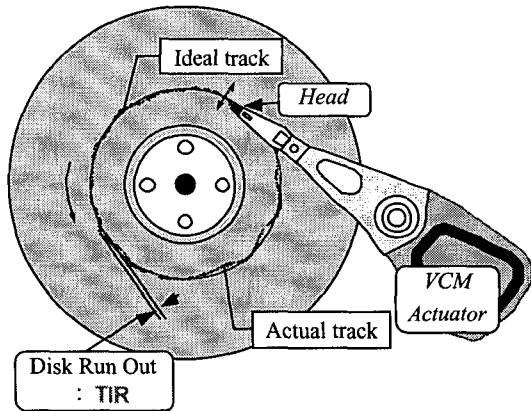


그림 1. HDD에서 발생하는 런아웃

RRO(Repeatable Runout)과 반복되지 않는 성분인 NRRO(Non-Repeatable Runout)이 있다.[1] 이때 대부분의 RRO 성분은 Actuator의 Servo Control에 의해 제거되어 실제 트랙밀도에 큰 영향을 주지 않으나, NRRO 성분은 비주기적으로 발생하여 제어하여 보상하기 매우 어렵다.[2] 특히, 1" 시스템과 같이 작은 디스크에 큰 용량을 구현하기 위한 시스템에서의 트랙밀도는 큰 의미를 가지므로, 1" 시스템의 진동해석은 매우 중요한 문제라 할 수 있을 것이다.

## 2. 1" HDD 시스템의 NRRO 해석

### 2.1 Ball Defect Frequency

일반적으로 HDD에서 발생하는 런아웃의 가진 원은 스피들 시스템 제작시의 질량 불평형, 스피들 시스템 설치시의 편심, 볼베어링의 결함, 전자기력 등이 있다. 특히 NRRO의 가장 큰 성분은 볼베어링의 결함 주파수로 나타나는데 HDD 디스크-스피들 시스템의 고유모드와 결함하면 더욱 증폭이 되어 진동과 트랙 어긋남이 더욱 커지게 된다. 따라서, 볼 베어링의 결함주파수의 해석은 NRRO 진동해석에 있어 가장 먼저 규명되어야 할 부분이라 할 수 있다. 볼 베어링의 결함주파수는 이미 많은 연구자들의 연구에 의해 표 1과 같이 규명되어 있다.[3]

표 1. Ball Defect Frequencies

Cause	Defect Frequencies
Inner Race Defect	$pZf_{ci}$ $pZf_{ci} \pm qf_i$
Outer Race Defect	$pZf_c$
Irregularity of Ball	$2pf_r \pm qf_c$ $2pf_r + f_c - qf_i$
Difference of Ball Diameter	$pf_c$

본 연구에서 사용된 1"HDD 용 볼 베어링의 규격 및 계산된 결함 주파수는 표 2, 3과 같다.

표 2. 1" HDD Bearing Specification

Rotating type	Inner race
Number of ball, $Z$	7
Ball diameter, $D$	0.8 mm
Inner race groove radius, $r_i$	0.432 mm
Outer race groove radius, $r_o$	0.448 mm
Pitch diameter, $d_m$	3.3 mm
Diametral clearance, $P_d$	0.0105 mm
Rotating speed, $\omega$	4200 rpm
Axial preload, $P$	1.96 N

표 3. 1" HDD Ball Defect Frequencies

Single ball stiffness, $K_s$		2307.97 N/mm
Contact angle, $\beta$		21.7
Fundamental frequency	Outer race defect, $f_{or}$	189.8 Hz
	Inner race defect, $f_{ir}$	300.2 Hz
	Ball element spin defect, $f_R$	137.1 Hz
	Rolling element cage defect, $f_c$	27.1 Hz

### 2.2 NRRO 측정

HDD 시스템은 일반적으로 축방향과 반경방향의 NRRO 성분을 모두 가지고 있는데, 3.5" HDD의 경우 경험적으로 반경방향 NRRO가 축방향 NRRO의 약 5% 정도 된다. 하지만, 이것은 정확한 이론적 해석보다는 경험적인 비율로 알려져 있다. 실제 디스크의 트랙밀도와 직접적인 관련을 갖는 것은 반경방향 NRRO이지만 실제로 반경방향 NRRO는 센서의 목표물이 되는 디스크의 두께가 얇아 측정하기 매우 까다롭다. 기존의 3.5" 디스크의 경우 디스크의 두께가 1.27mm여서 일반적인 LDV나 Capacitive type 센서로 측정 가능하나, 1" HDD의 경우 디스크의 두께가 0.38mm로 너무 얇아 기존의 측정 센서로는 측정이 불가능하다. 그리고, 1" HDD의 경우 아직 연구가 진행되어 있지 않아 축방향 NRRO와 반경방향 NRRO의 어떤 경험적인 비율도 알려져 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 반경방향 런아웃을 측정하기 위해 실제 시스템에 장착되는 디스크의 관성치만 같도록 약 0.055kgmm<sup>2</sup>로 맞춘 원통모양의 Dummy Disk를 설계 제작하여 측정에 사용하였다. 일반적으로 런아웃의 측정방법은 시간영역에서 측정하는 방법과 주파수영역에서 측정하는 방법으로 나눌 수 있는데, 시간영역 해석은 모터의 회전속도 변화 및 센서의 종류등에 민감하게 영향을 받는 단점이 있다 하지만, 주파수영역 해석은 센서의 종류에 관계없

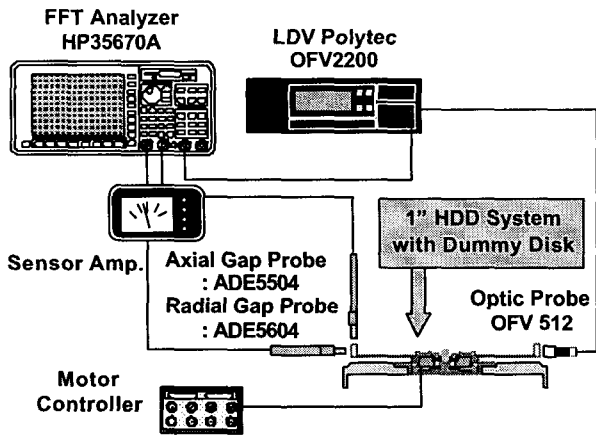


그림 2. 1" HDD 런아웃 측정 시스템

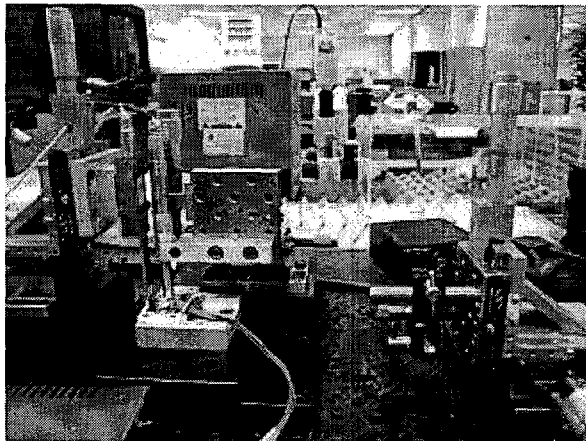


그림 3. 측정시스템 및 Dummy Disk

이 적용되며 모터의 회전을 정확하게 측정하지 않고도 원하는 결과를 얻을 수 있는 장점이 있다.[4] 따라서, 본 연구에서는 주파수영역에서 측정하는 분석 방법을 사용하였다. 그림 2는 NRRO 측정 시스템의 개념도이고, 그림 3은 측정방향과 반경방향으로 장착된 캡센서와 반경방향의 NRRO를 확인하기 위한 LDV의 실제 셋업이다. 여기에서 캡센서는 각각 ADE5504, ADE5604를 사용하였으며, 측정범위는  $\pm 50\mu\text{m}$ ,  $\pm 25\mu\text{m}$  이고, 분해능은 1nm, 0.5nm이다. 그림 4는 측정된 NRRO Spectrum과 각각의 규명된 주파수 성분이다. 그림 5는 3.2kHz까지 측정된 NRRO Spectrum인데, 그림에서 알 수 있듯이 1" HDD의 경우 시스템의 크기가 작아 대부분의 주파수 성분이 볼베어링의 결합주파수이고, 베이스 및 디스크의 모드 성분은 저주파에서 거의 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 표 4는 측정된 NRRO 및 TIR의 값이며, 본 연구에서 제작된 1" HDD의 TIR, NRRO 값은 기존의 타사 제작 모델보다 향상된 성능을 보임을 알 수 있다.

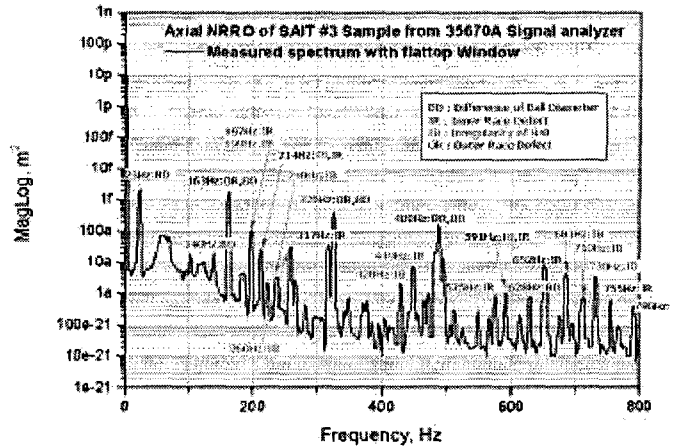


그림 4. 볼베어링 결합주파수

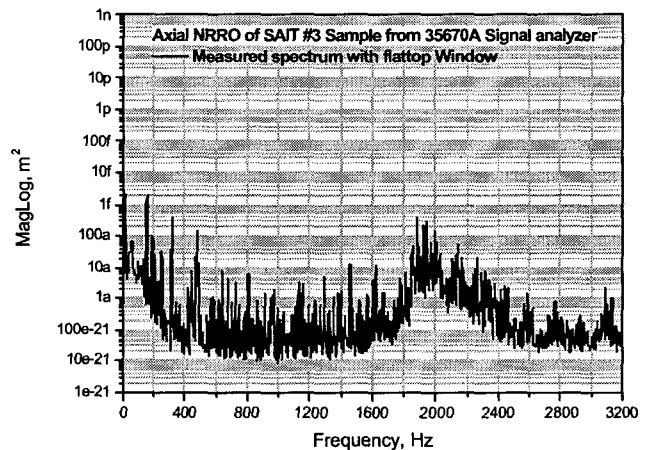


그림 5. NRRO Spectrum

표 4. 측정된 TIR 및 NRRO 수준

	Model Exp	I사 340MB	I사 512MB	I사 1GB	SAIT
Axial	TIR	13.9 $\mu\text{m}$	3.27 $\mu\text{m}$	3.93 $\mu\text{m}$	10.80 $\mu\text{m}$
	NRRO	66.5nm	47.6nm	55.1nm	15.02nm
Radial	TIR	17.7 $\mu\text{m}$	10.4 $\mu\text{m}$	7.79 $\mu\text{m}$	12.60 $\mu\text{m}$
	NRRO	27.2nm	16.9nm	24.5nm	8.29nm

### 3. 1" HDD의 동특성 해석

#### 3.1 유한요소 모델

1" HDD 스피들 시스템의 고유진동 해석을 위한 유한요소 모델은 I-DEAS의 3차원 형상설계 도면을 Mesh 모델을 사용하여 구성하였다. 일반적으로는 4절점 요소를 사용한 경우에 비하여 8절점 요소의 경우가 월등히 정확한 계산결과를 보이지만, 1" HDD 스피들 시스템과 같이 베이스 플레이

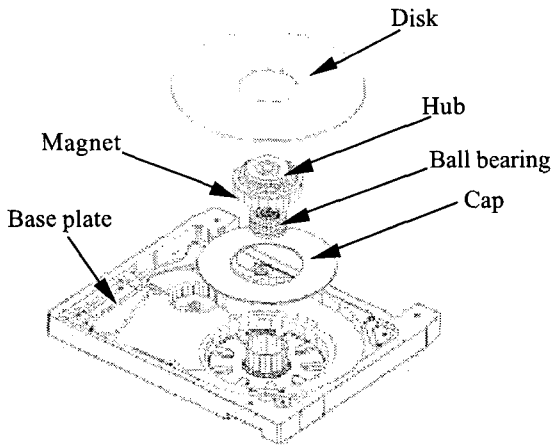


그림 6. 1" HDD의 3차원 모델

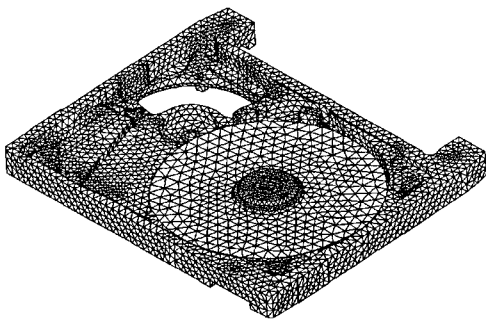


그림 7. 1" HDD의 유한요소 모델

트의 형상이 매우 복잡하고 볼 베어링의 내외륜과 캡 및 디스크의 접합부간의 축방향 단차가 매우 작은 경우, 자유격자를 생성하기 매우 어렵기 때문에, 4 면체 자유격자(free mesh)로 이루어진 격자모델로 나누었다. 이렇게 생성된 스핀들 시스템의 격자모델을 유한요소 해석프로그램인 ANSYS를 사용하여 자유경계조건에 대하여 고유진동 해석을 수행하였고, 고유진동 실험을 수행하여 구해진 고유진동모드를 통해 해석 결과와 비교하였다.

그림 6은 1" HDD 스핀들 시스템의 3차원 도면이고, 그림 7은 유한요소 해석을 위하여 수정한 모델을 나타낸 것으로서 베이스 플레이트(base plate), 모터 허브(motor hub), 영구자석(permanent magnet), 디스크(disk), 볼 베어링의 내륜 및 외륜 그리고 베이스 플레이트의 하우징(housing) 부분을 감싸는 캡(cap)으로 구성된다. 볼 베어링은 내륜과 외륜을 Solid로, 각각의 볼은 Spring 요소로 모델링 하였으며, 볼의 개수와 접촉각을 고려하여 내외륜에 절점을 위치시키고 그 절점 사이를 단일 볼 강성계수를 가지는 Spring 요소로 연결하였다. 각 요소의 물성치와 사용된 요소

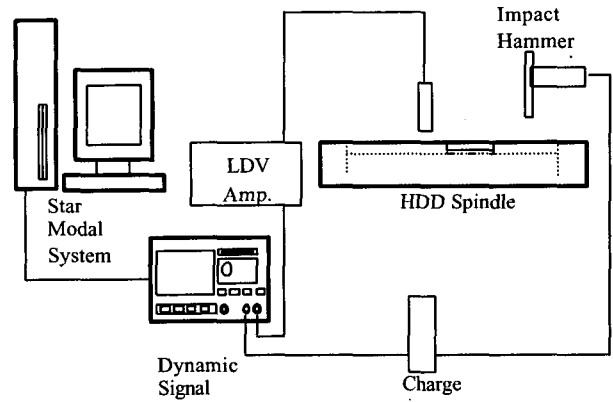


그림 8. 모드 해석을 위한 측정 시스템

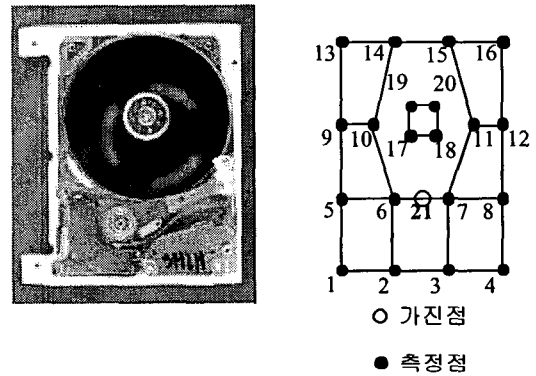


그림 9. 측정 샘플과 Star Modal 격자모델

의 Element type은 표 5에 나타내었다.

표 5. FEM 모델의 요소와 물성치

	Material	Element#	Element type
Base plate	Aluminium	26919	SOLID72
Hub	SUS	4034	SOLID72
Permanent magnet	NeFeB	2363	SOLID72
Inner race	SUJ2	700	SOLID72
Outer race	SUJ2	777	SOLID72
Ball	SUJ2	7	COMBIN14
Disk	SUS	2121	SOLID72

### 3.2 모드해석

그림 8은 모드해석을 위한 실험장치도를 나타낸 것으로서, 충격망치로 HDD Sample을 가진하여 LDV로 그 응답을 측정 후, FFT Analyzer에 의해 주파수 분석을 수행하여 주파수 응답함수를 구하였다. 그림 9는 측정에 사용된 HDD Sample과 모드형상분석을 위한 Star Modal 프로그램의 격자모델을 나타낸 것이다. 총 21개의 절점을 사용하여 격자를 나누었으며, 고정된 지점(21번)을 가진

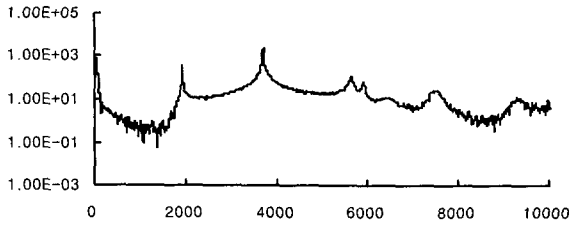


그림 10. 주파수 응답함수

하고 측정점을 변경하는 측정방식을 사용하였다. 디스크가 포함되지 않은 스피들 시스템의 Sample 을 사용하여 측정을 수행하였으며, 측정과 해석의 경계조건은 자유경계조건을 사용하였기 때문에 이와 유사한 환경에서 측정하기 위해 스폰지 위에 HDD Sample 을 위치시키고 모드 해석을 수행하였다.

### 3.3 측정 및 해석결과

그림 10 은 디스크를 장착하지 않은 경우, 모드시험 결과이며, 유한요소 해석결과와의 고유주파수를 비교하여 표 6에 나타내었다.

표 6. FEM 해석 및 실험 결과의 비교

Mode #	FEM [kHz]	Experiment [kHz]	Error [%]
1	1.98	1.92	2.60
2	3.63	3.68	-1.35
3	5.65	5.63	0.35
4	5.86	5.92	-1.01
5	6.55	6.53	0.30
6	7.38	7.50	-1.60
7	8.75	9.30	-8.60

표 6 에서 대부분의 경우 실험결과와 해석결과가 매우 잘 일치하지만, 7차 모드에서 상대적으로 큰 오차를 보이는 것은 시스템의 질량이 매우 작고 충격망치의 질량이 상대적으로 크기 때문에, 고주파 영역에서 입력신호에 대한 응답신호의 선형성이 저하되어 발생하는 것으로 생각된다.

### 3.4 디스크를 고려한 스피들 시스템의 고유진동 특성예측

그림 11 은 실제 1" HDD 스피들 시스템의 거동을 예측하고 위해 기존의 유한요소모델에 디스크를 추가하여 고유진동수와 그 진동모드를 예측하고 그 결과이고, 그림 12 는 1" HDD 스피들 시스템의 고유진동수와 불 베어링에 의한 결함주파수와 공진여부를 판단하기 위한 Campbell 선도이다. 이 결과에서, 자유경계조건에서 4500rpm 으로 회전하는 1" HDD 스피들 시스템의 고유진동수와 베어링

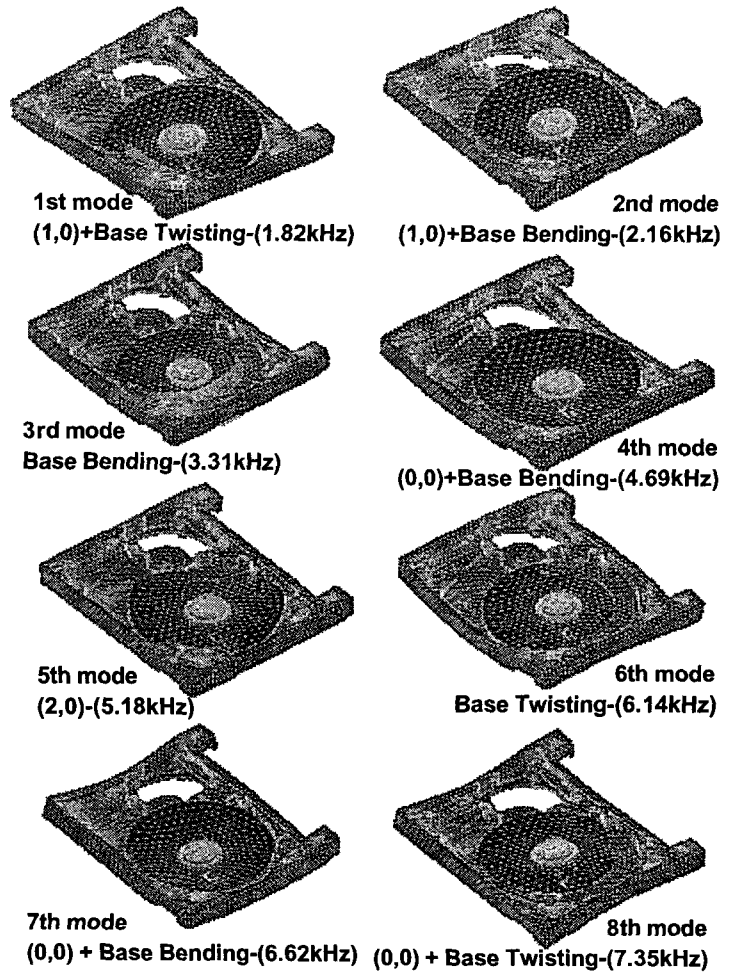


그림 11. 1" HDD 모드 및 진동수

의 기본 결함주파수 및 외륜과 불의 결함에 의한 결함주파수와는 교차하는 영역이 없으므로 이에 따른 공진현상은 발생하지 않을 것으로 판단된다. 그러나 이는 자유경계조건에 대한 예측결과이기 때문에 HDD 의 장착조건에 따른 다양한 경계조건에 따른 연구도 향후 과제로서 수행되어야 할 것으로 판단된다. 내륜에 의한 주파수도 회전수 4500rpm 에서는 모드와 교차하지 않으므로 이에따른 공진은 발생할 확률이 작다고 할 수 있다.

## 4. 결론

본 연구에서는 1" HDD 의 진동해석을 위해 실제 샘플을 제작하여 시스템 NRRO 의 성능평가를 실시하였으며, 1" HDD 스피들 시스템에 사용된 불 베어링의 강성과 결함주파수 해석을 수행하였다. 실험결과 제작된 샘플은 좋은 NRRO 성능을 보였다. 또한, 스피들 시스템의 동특성 해석을 위한 유

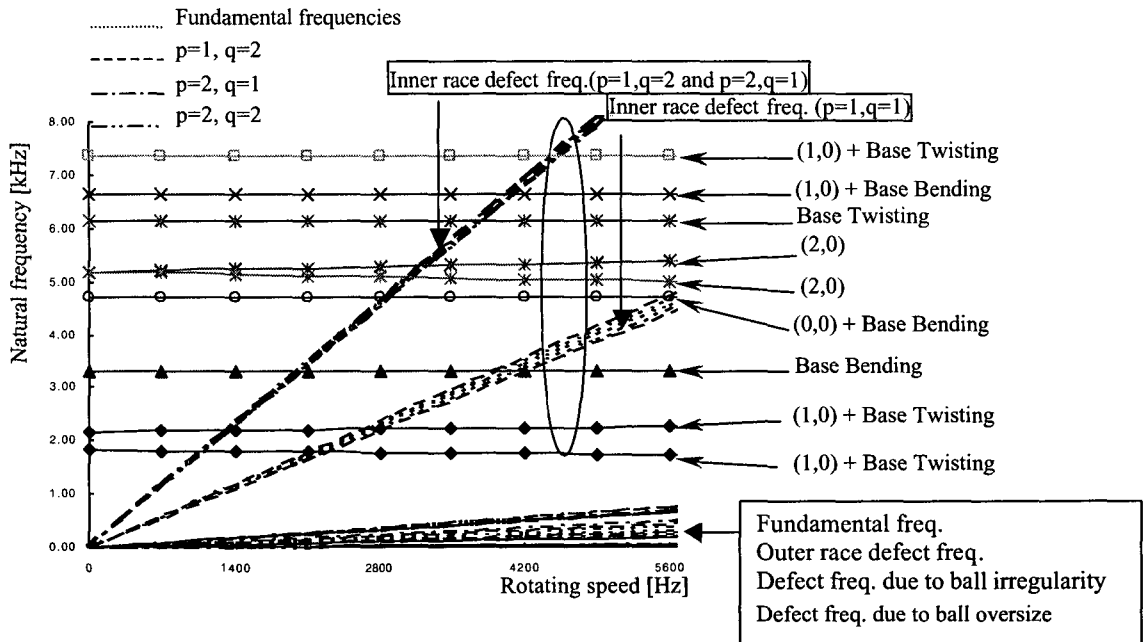


그림 12. 1" HDD의 고유진동수와 Ball Bearing 결함주파수의 Campbell 선도

한요소모델을 개발하였고, 개발된 해석모델을 1" HDD 샘플에 대해 적용하고 고유진동 해석을 수행하여, 고유진동수와 각 고유진동수에 해당하는 진동모드를 구하였다. 이러한 해석모델과 해석결과와의 타당성을 검증하기 위하여, 모드해석을 수행하여 고유진동수와 각 진동모드를 측정하였다. 실험을 통해 검증된 볼 베어링 강성 및 유한요소 해석모델을 사용하여, 디스크를 장착한 스피들 시스템에 대한 해석을 수행하여 고유진동수와 그 진동모드를 예측하였다. 이 결과에서 디스크를 제외한 해석결과에서와 같이 디스크 장착모델에서도 볼 베어링의 가진에 의한 영향을 크게 받는 회전체의 진동모드가 대부분 베이스 플레이트의 진동모드와 연성되어 발생하므로, 베이스 플레이트의 장착조건(경계조건)이 HDD 스피들 시스템의 동특성을 크게 변화시킨다고 판단된다. 따라서 다양한 경계조건에 대한 해석이 향후과제로 수행되어야 할 것이다.

Ball Bearing Excitation", IEEE Trans. on Mag., Vol.37, No.2, March, pp. 815~819.

(4) G. H. Jang, D. K. Kim, and J. E. Oh, 1999, "New Frequency Domain Method of Nonrepeatable Runout Measurement in a Hard Disk Drive Spindle Motor", IEEE Trans. on Mag., Vol.35, No.2, March, pp. 833~838

참고문헌

(1) 장건희 등, 1999, "HDD 스피들 시스템의 진동 해석 및 저감 설계 기술", 한국소음진동공학회지, 제 9 권, 제 4 호, pp. 652~659.  
 (2) 장건희 등, 1998, "컴퓨터 하드 디스크 드라이브 스피들 모터의 런아웃 측정 및 해석", 대한기계학회는 문집 A 권, 제 22 권, 제 8 호, pp. 1533~1541.  
 (3) G. H. Jang, D. K. Kim, and J. H. Han, 2001, "Characterization of NRRO in a HDD Spindle System Due to