

# 고성능 하드 디스크 드라이브 개발을 위한 유체베어링 스피들 모터의 특성분석

( 현장개발사례: SAMSUNG HDD 'SPINPOINT POLARIS SERIES' )

손 영\*\*, 황태연\*\*, 한윤식\*\*, 강성우\*, Frank Morris\*\*\*

## Experimental Characterization of Hydrodynamic Bearing Spindle Motor for High Performance Hard Disk Drive

Young Son\*\*, Tac-Yeon Hwang\*\*, Yun-Sik Han\*\*, Seong-Woo Kang\*, Frank Morris\*\*\*

### ABSTRACT

The experimental characterization of hydrodynamic bearing spindle motor is performed for the practical implementation of high-performance hard disk drive system. Firstly, the design concept of hydrodynamic bearing for the disk drive system is addressed including the herringbone grooved journal bearing, the spiral grooved thrust bearing, capillary seal design, and the viscous pumping of fluid. Secondly, the experimental evaluation is performed for the disk drive system in which the hydrodynamic bearing spindle motor is implemented and its dynamic performances are compared with conventional ball-bearing spindle motor. The key parameters include NRRO(Non Repeatable Run-Out), disk dynamics, acoustics, and resultant PES(Position Error Signal). Finally, the external gyro-exciting test results including 200k CSS(Continuous Start-Stop) on three angular attitudes(0,90,180 degree) are presented in order to verify the practical reliability of disk drive system subject to the gyro-motion of hydrodynamic bearing spindle motor.

### 1. 서론

HDD(Hard Disk Drive)는 기록밀도 향상의 가속화와 고성능 요구에 대응하는 활발한 기술개발로 21세기에도 가장 대표적인 저장기로서 기대되고 있다. 기록밀도의 증가는 이미 5만 TPI(Track Per Inch)를 넘어서는 20GB/in<sup>2</sup> 급의 제품개발이 진행되고 있고, 향후 2~3년 내에 10만 TPI 이상을 만족시키는 제품도 가능하리라 예상된다. 이에 트래크 폭 0.2 $\mu$ m 이하와 하드 디스크의 NRRO(Non Repeatable Run-Out)가 수십 노급인 초정밀 회전체 기구 시스템 개발이 필수적이다. 이에 따라 디스크의 비접촉 회전지지를 실현하고자 하는 유체베어링 개발이 일본의 스피들 모터 업체를 중심으로 지난 수년간 지속되어 왔다.

한편 정보화 사회로의 급속한 변화는 가전응용기기에 대응량의 기억장치가 필요하게 되었으며, 이에 대응하기 위한 하드 디스크 드라이브는 소음성능이 가장 우선적이라 할 수 있다. 유체베어링 스피들 모터의 적용은 종래의 볼베어링 스피들 모터에서 발생되

는 베어링 결함 주파수 가진을 제거할 수 있으므로 하드 디스크 드라이브 소음의 현저한 저감을 기대할 수 있다.

이에 본 연구에서는 고성능 하드디스크 시스템의 구현을 위해서 실제의 하드 디스크 드라이브 시스템을 사용하는 유체베어링 스피들 모터의 실험적 특성 분석을 행한다. 우선 Herringbone groove와 spiral groove로 구성되고 capillary sealing 구조를 갖는 하드 디스크 드라이브용 유체베어링의 기구 구성에 대해서 소개한다. 다음으로 유체베어링을 적용한 하드디스크 드라이브 시스템의 기구적 성능에 대해서 NRRO, 회전 디스크의 Dynamics, 시스템 소음 그리고 트래크에 대한 정밀 서보(Servo) 제어 측면에서 실험적 검증을 하고, 그 결과를 볼 베어링 지지하드디스크 드라이브의 성능과 비교 분석한다.

그리고 유체 베어링 스피들 모터의 제품 적용에 필수적인 신뢰성 성능 확인을 위해 20만회 이상의 CSS(Continuous Start-Stop) 시험을 행하여 그 결과를 평가한다. 마지막으로 gyro 운동에 대한 가진 응답 성능을 평가하기 위해서 외부 gyro 가진 시험기를 제작하여 그에 대한 신뢰성 평가를 행한다.

\* 정희원, 삼성종합기술원 Mems Lab.

\*\* 삼성종합기술원 Mems Lab.

\*\*\* Samsung Information Systems America

## 2. 유체베어링 모터의 기계적 구조

하드디스크 드라이브에서 사용되는 유체 베어링 스피ن들 모터는, 회전부(Hub, Disk)를 지지하는 베어링을 기존의 접촉식 볼 베어링에서 비접촉식 유체 동압 베어링으로 교체하였으며, 기존의 볼 베어링을 사용한 HDD와 구별되는 여러 가지 특성을 제공한다..

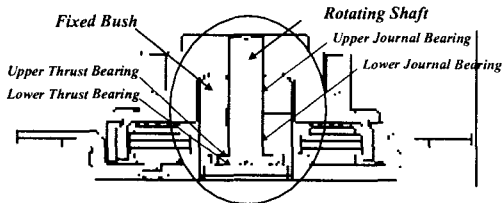


Fig. 1. Structure of Hydrodynamic Spindle Motor

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 HDD용 유체베어링 스피ن들 모터의 구조를 타낸다. 중앙의 축이 회전체(Hub)에 일체로 조립되어 있고 이를 지지하기 위해 저어널 베어링과 트러스트 베어링이 그림과 같이 설계되어 있다. 유동유체의 베어링 외부 유출을 방지하는 시일링(sealing) 구조를 갖는다.

HDD의 공간적 한계 내에서 보다 안정적인 하중 지지를 위해 반경방향 지지에는 헤링본 그루브(Herringbone Groove, Fig. 2.(a))의 점성 펌핑(Viscous Pumping) 효과를 이용하여 강성을 증가 시키고 회전 안정성을 보완한 원통형 저어널 베어링(Cylindrical Journal Bearing)을 축의 상부와 하부 2개소에 설계하였다. 또 축 방향 하중지지에는 Fig. 2.(b)에 보인 바와 같이 선형 그루브(Spiral Groove)를 사용하는 원판형 구조의 트러스트 베어링을 설계하였다

베어링 강성 등의 특성 계수에 대한 이론 해석 등은 이미 많은 검증을 통해 설계의 자료로 해석 결과를 이용하는 데 충분하다고 할 수 있다. 그러 설계된 베어링이 목표한 바의 성능을 유지하는 것은 축-베어링 시스템 내의 오일 분포와 압력 경계 조건 등에 대한 적절한 설계와 제작 그리고 실험적 검증을 통해서만 가능하다. 실제 하중을 지지하는 것은 볼 베어링의 강구와는 달리 유체 베어링에서는 유동성을 갖는 동압오일(Hydrodynamic Fluid)이므로 오일의 누설이 오일 내부의 기포 발생은 베어링의 특성을 변화 시킬 수 있고, 베어링 구성 부품 간의 건식 마모의 가능성이 발생하고 점진적으로 베어링 면의 마모를 일으켜 마모로 발생한 입자들로 인해 베어링이 고착될 수 있다. 이는 하드 디스크 드라이브용 스피ن들 모터로서는 치명적이기 때문에 유체 베어링설계에 가장 중요하게 고려해야 할 것이다.

베어링에서의 오일 누설을 방지하기 위해 경계면에 시일을 사용하는데 볼 베어링을 사용하는 모터에서는 틈새간의 압력 차이를 이용하는 라비린스 시일

(Labyrinth Seal)이 자성 유체(Ferro-Fluid)를 이용한 접촉형 시일을 사용하 유체 베어링은 축과 베어링 간에 수 마이크론의 작은 틈새를 갖으므로 유체 경계면의 표면 장력을 이용하는 모세관형 시일(Capillary Seal)을 사용할 수 있다. 또 원추형으로 가공된 시일면에 표면 장력 효과를 높이기 위한 코팅처리가 효과적이다.

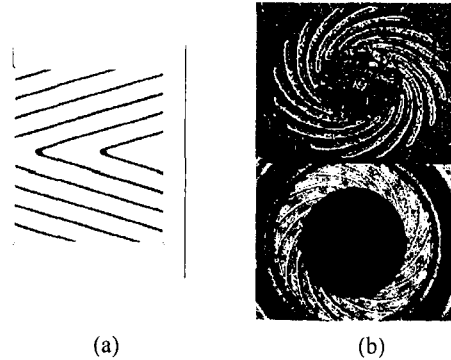


Fig. 2. Schematic Diagram of Hydrodynamic Bearing  
(a) Herringbone Groove Journal Bearing  
(b) Spiral Groove Thrust Bearing

하드 디스크 드라이브가 회전하여 정격 회전 속도에 도달하게 되면 베어링 간극에 충전되어 있는 오일은 베어링 간극 내부에서 저어널 그루브와 트러스트 그루브에 의한 펌핑 작용으로 동압 분포(Hydro Dynamic Pressure)가 형성되고 Fig. 3.과 같은 유동을 따르게 된다. 그러 회전과 정지를 통해 초기의 오일 분포와는 달리 오일 내부에 기포가 발생하고 이에 따라 오일 분포가 변화된다면 동적 유동은 변화되고 베어링면으로의 충분한 오일 공급이 안돼 동압 효과를 저하시킬 수 있다. 따라서 정지 상태와 회전 시에도 오일 분포가 변하지 않도록 오일 및 내부 기포의 유동 조건을 고려하는 것은 유체 베어링 설계에 있어서 매우 중요한 설계 인자라 할 수 있다.

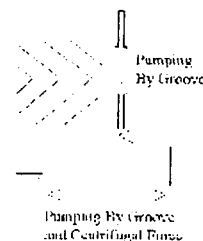


Fig. 3. Fluid Flow By Viscous Pumping And Centrifugal Force

### 3. 유체베어링 모터의 기구적 특성

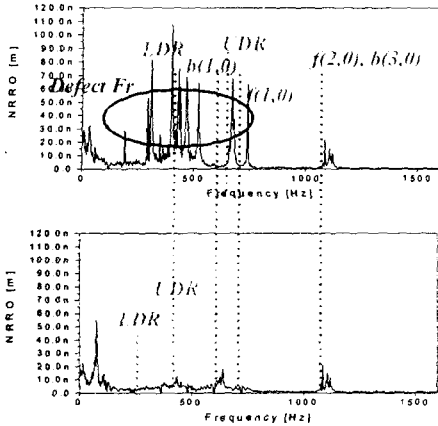


Fig. 4. Comparison Of Disk Radial NRRO  
Upper : Ball Bearing Motor  
Lower : Hydrodynamic Bearing Motor

회전 디스크에 기록/재생을 반복하는 HDD에 있어 기억 용량을 결정하는 TPI 성능은 물리적으로는 회전체의 NRRO(Non-Repeatable Runout) 특성에 의해 제한 받게 된다. Fig. 4.는 각각 볼 베어링과 유체 베어링을 사용한 디스크 회전에서의 NRRO를 비교하여 보여 주고 있다. 동일 측정 조건에서 측정한 NRRO 신호의 주파수 분석 결과, 볼 베어링을 사용한 경우에는 디스크의 회전 모드 성분뿐 아니라 디스크 Rocking 모드 주위로 증폭된 베어링 결합 주파수 성분을 발견할 수 있다. (LDR: Lower Dynamic Rocking, UDR: Upper Dynamic Rocking) 볼 베어링에서는 볼과 궤도륵에 존재하는 결합에 의한 성분은 회전 속도 또는 볼의 자전 속도에 대한 Harmonics로 전 주파수 대역에 발생되며 또한 베어링의 운전 시간이 증가함에 따라 결합 성분은 점차 증가하게 되고 NRRO를 점차 악화시키게 된다. 그러 유체 베어링을 사용한 경우에는 베어링의 비접촉 특성으로 인해 볼 베어링에서 타는 바와 같은 결합 주파수 성분들은 타지 않으며 운전 시간에 따른 베어링 특성의 변화가 볼 베어링에 비해 극히 작다고 할 수 있다. 또 유체 베어링의 감쇠 특성으로 인해 디스크의 회전 모드를 포함한 각 주파수 성분의 피크가 크게 감쇠되어 있음을 보여 주고 있다.

Fig. 5는 회전하고 있는 디스크에 임팩트 가진을 하여 얻은 디스크 회전체 시스템의 동적 응답 특성을 타낸다. 베어링 특성에 의해 크게 지배되는 디스크 회전체의 Rocking Mode에서 보여지는 피크 형상으로부터 각 베어링에서의 감쇠 성능을 계산하고 이를 수치화하여 Fig. 6과 같은 감쇠비(Damping Ratio)로 타낸다. 볼 베어링에 비해 유체 베어링은 5~6배 가량의 높은 감쇠비를 보여 주고 있다.

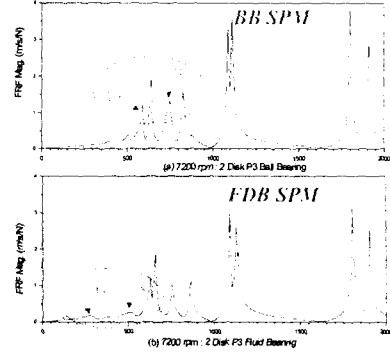


Fig. 5. Comparison Of Disk Dynamic Response  
Upper : Ball Bearing Motor  
Lower : Hydrodynamic Bearing Motor

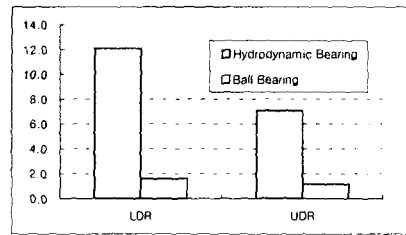


Fig. 6. Damping Ratio Comparison of Disk Lower and Upper Rocking Mode

유체 베어링의 기구적 특성을 잘 보여 주는 또 하나의 예는 하드 디스크 드라이브의 소음 특성이다. 모터의 결합부를 통한 가진은 HDD 구조를 통해 소음 패턴을 형성한다. 모터에서 전달되는 가진이 볼베어링의 결합 주파수와 같이 전 대역에 걸쳐 존재한다면 HDD의 구조 진동을 증폭시키거나 외부로 직접 전파되는 방식으로 소음 수준을 증가 시키게 된다. Fig. 7은 무향실에서 측정된 볼베어링 HDD와 유체베어링 HDD의 음압(Sound Pressure) 스펙트럼을 타낸다. 볼베어링의 경우에는 베어링 결합 등으로 인한 피크와 구조적 공진에 의한 피크가 전대역에 걸쳐 분포하고 있음을 보여주고 있다. 유체 베어링의 경우에는 공기 유동에 의한 공력 소음대역과 전자기 모터 진동의 영향을 받는 특정 주파수 대역을 제외한 전대역에서 비교적 깨끗한 음압 피크 특성을 볼 수 있다. 이는 볼베어링 결합 주파수와 같은 모터의 자체 진동 성분이 없으며 회전체와 모터의 베이스 지지부 간의 진동을 유체 베어링 내에서 감쇠 시켜 줌으로써 HDD에 전달되는 가진력을 줄일 수 있기 때문이다. 동일 사양의 HDD에서 보여준 Sound Power Level은 Table.1에 보인 바와 같으며 회전속도 7200rpm에서 유체 베어링을 사용함으로써 0.2~0.4 Bel의 개선 효과를 볼 수 있음을 보여 준다.

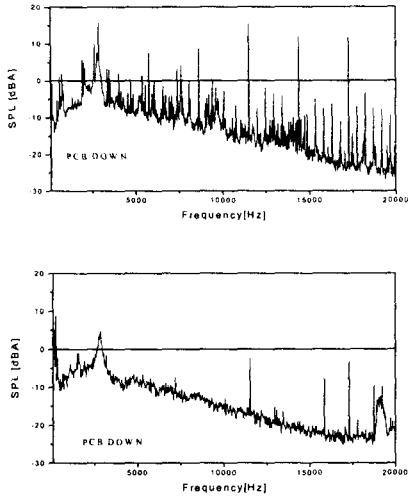


Fig. 7. Sound Pressure Spectrum of HDD  
Upper : Ball Bearing Motor  
Lower : Hydrodynamic Bearing Motor

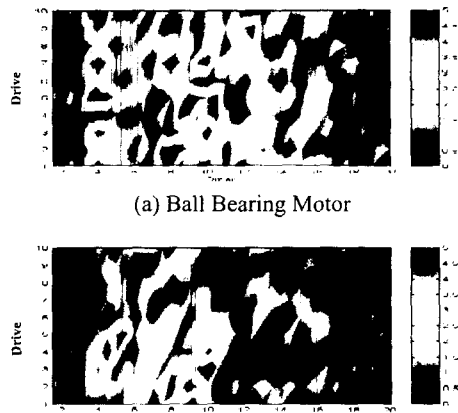
Table 1. Comparison of HDD Sound Power between Ball and Hydrodynamic Bearing

HDD Config	Ball Bearing		Hydrodynamic Brg	
	2 Disk	1 Disk	2 Disk	1 Disk
Samples	37	59	46	46
Typ	3.04	2.97	2.82	2.51
Max.	3.15	3.2	2.96	2.74

#### 4. 유체베어링 모터의 기록/재생 오차 특성

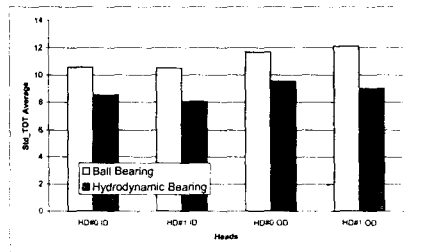
앞서 유체베어링 HDD와 볼베어링 HDD의 기계적 특성 비교에서 본 바와 같이, 유체 베어링은 볼 베어링에 비해 우수한 NRRO 성능(약 30% 향상)을 가지고 있으며, 이는 고밀도 기억용량 HDD에서 기구적으로 요구되는 고 TPI 실현을 가능하게 할 수 있다. 본 연구에서는 동일 HDD의 구조 및 제어 시스템에 볼 베어링과 유체 베어링을 각각 사용하여 그 기록/재생시의 오차 분석을 통해 비교하였다. 일반적으로 PES(Position Error Signal)라고 하는 기록 재생 오차는 HDD의 여러 요인으로 발생되고 있으며 기구적으로는 디스크를 가진 하모닉 모터특성과 디스크 회전체의 동특성에 기인한다. 볼베어링과 유체 베어링을 사용하는 HDD를 2 채널(Channel)과 4 채널의 경우로, 각각 제작하여 PES(Position Error Signal)를 측정하였다. Fig. 8.은 디스크의 외측 트랙에서 측정된 하드디스크 드라이브의 PES 스펙트럼의 분포도이다. 중축은 측정된 HDD를 보여주며 횡축은 회전 속도의 차수로 표시한 주파수이다. 그림 상의 종실선은 각각의 경우의 가진 주파수를 나타내는데, 볼베어링의 경우 베어링 결합 주파수

와 디스크의 Dynamic Mode 가 포함되며, 유체베어링의 경우에는 결합주파수가 타 지 않는다. 모터의 불평형 또는 전자기적 가진 하모닉스는 포함하지 않았다.

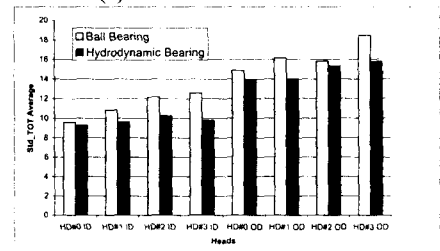


(a) Ball Bearing Motor  
(b) Hydrodynamic Bearing Motor  
Fig. 8. Spectrum Distribution of Position Error Signal for HDDs with the Same Configuration

PES 스펙트럼 분포로부터 볼 베어링의 PES는 유체 베어링에 비해 넓은 주파수 대역에 걸쳐 타 고 있음을 알 수 있다. 또 높은 수준의 PES가 발생한 주파수 영역을 관찰하면 볼 베어링의 경우는 가진 주파수 주변의 여러 주파수에서 PES 수준이 높게 타 고 있지만, 유체 베어링에서는 단일 주파수에서만 높은 수준을 보이고 있다. 이는 디스크 모우드와 같은 공진 점 근처에도 볼 베어링에는 여러 가진 성분이 분포하고 있으며 유체 베어링에서는 존재하지 않음을 알 수 있다.



(a) 1 Disk 2 Channel Drive



(a) 2 Disk 4 Channel Drive

Fig. 9. Comparison of Position Error Signal

그리고 유체 베어링의 고주파 대역의 PES가 볼 베어링에 비해 작은 것은 베어링의 감쇠 효과가 크고 베어링 결합 성분이 없기 때문이라 할 수 있다. Fig. 9의 (a)(b)에는 각 Head와 디스크 상의 Track 위치에 따른 PES의 분석 결과이다. 여기서 각 채널 및 디스크 간의 값의 차이는 있으나, 유체 베어링을 사용한 경우의 PES가 볼 베어링에 비해 전체적으로 10~20% 개선되어 있음을 알 수 있다.

### 5. 유체베어링 모터의 신뢰성 분석

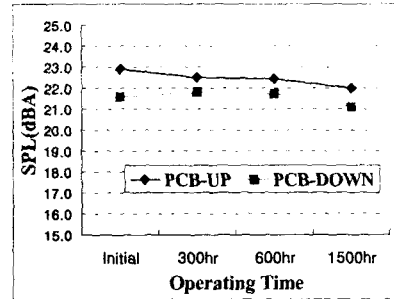
볼 베어링은 회전체와 지지 구조물 사이를 볼이 접촉 지지함에 비해 유체 베어링은 단지 오일의 발생 압력에만 의존하므로 마모, 충격 등에 대한 고려가 기본적으로 할 수 있다. 이미 앞에서 윤활유의 누설 방지와 오일 분포에 대한 설계시의 고려에 대해 언급한 바 있으며 이러한 설계의 신뢰성 검증을 위해 실험을 통한 유체 베어링의 특성 변화를 관찰하였다.

장기간 운전에 대한 신뢰성 검증을 위해 3.5인치 디스크를 장착한 HDD에 대해 임의의 시간 경과 후 NRRO, 음압 수준 그리고 소비 전류의 변화를 측정하였다. 이때 장기간의 운전 조건은 회전 정지를 반복하는 경우와 계속 회전하는 경우로 하였다. 또 각 운전 조건에 대해 HDD의 자세는 수평을 기준으로 0도 90도 180도의 3가지 자세로 실험함으로써 자세에 따른 특성 변화도 보고자 했다. 실험 시간은 1500 시간에, 정지 반복 회수는 20만회 이상으로 하였다.

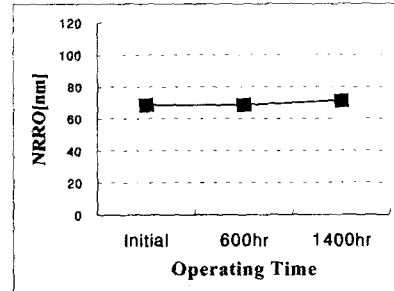
Fig. 9의 (a)는 운전 시간에 따른 음압 수준의 변화를 측정한 결과이다. HDD에서 PCB 부착 방향을 기준으로 상부와 하부로 나누어 측정하였다. 초기 측정치를 1 dBA 이하의 변화량을 보였으며 이는 1m 측정시의 측정 변화량의 내에 있다고 볼 수 있으므로 연속 운전 시간에 따른 소음 수준의 변화가 없음을 알 수 있다. Fig. 9의 (b)는 디스크 반경 방향에서 NRRO를 측정한 결과이다. 모든 경우에 대해서도 초기의 NRRO수준이 유지되고 있음을 확인하였다. 이로써 장시간의 운전에서도 베어링의 NRRO 수준은 변화하지 않는다고 할 수 있다. 전류량의 측정 결과 역시 전체 운전 시간 동안 10mA의 변화량 내에 있어 베어링의 손상 등에 따른 마찰 변화로 인한 소비 부하의 변화가 발생하지 않았다고 할 수 있다.

유체 베어링 윤활유는 온도에 따른 점성 변화를 가지고 있으며 유체 베어링에서 발생하는 베어링 강성은 윤활유 점성의 함수이기도 하므로 온도 변화에 따른 특성 역시 중요한 요소이다. 온도 변화에 따라 가장 영향을 많이 받는 것은 소비 전류이다. HDD의 일반적인 작동 온도를 -5 ~ 60 라 하면 -5의 점도는 60도에 비해 7~8배 가량 높다. 이러한 점도 변화는 25도의 상온에서의 소비 전류를 기준으로 -5도에서 22% 증가시키며 60도에서는 20% 감소시킨다. 저온에서의 소비 전류의 상승에 대해 구동 회로 설계 시 기동 전류에 여유를 주어야 한다. 온도가 증가함에 따라 베어링 강

성은 감소하며 이는 온도에 따른 디스크의 Rocking 모드의 변화를 야기한다. 이에 HDD에 대해 0도, 25도 60도의 Rocking 모드를 측정하였다. 이때 Lower Rocking 모드는 각각 평균 301Hz, 292 Hz, 287 Hz를 타냈으며 Upper Rocking 모드는 532Hz, 522Hz, 517Hz를 타내었다. 볼 베어링의 경우도 60도에서 2~3% 정도의 Rocking 모드 주파수 감소를 보이며 유체 베어링의 경우도 Rocking 모드에 3% 정도의 변화를 보였다.



(a) Sound Pressure Level Variation



(b) NRRO Variation

Fig. 9. Test Result of Characteristics Variation in the Progress of Time

HDD는 정보를 저장하는 장치이므로 기계적 신뢰성의 유지는 절대적인 요소라 할 수 있다. 누유 내부 손상에 따라 성능이 민감하게 변할 수 있는 유체 베어링으로서는 많은 기계적 장점에도 불구하고 절대적인 신뢰성 확보가 필수적이다. 이를 위한 지속된 연구와 노력에 의해 최근 유체 베어링 모터는 신뢰성을 검증 받아가며 상품화가 시작된 단계이다. 앞서 분석한 특성들 뿐 아니라 저온에서 고온까지의 온도 변화율에 따른 HDD 성능 분석이 Linear Drop Shock, Operational Vibration 등 HDD에 필요한 성능 시험을 통해 적용성 여부를 판단할 수 있다. Fig. 10은 유체 베어링의 자이로스코픽 가진(Gyroscopic Excitation)에 대한 내구성 시험기이다. 유체 베어링의 강성과 하중 지지 용량은 유한한 값을 가지며 이를 넘어선 가진이 들어 올 때는 수 um의 베어링 틈새가 유지되지 못하고 베어링 면과 축의 접촉을 발생시키고 이때 베어링의 파손이 일어 게 된다. 물론 볼 베어링 역시 마찬가지 이긴 하지만 유체 베어링의 경우 회전 축에 대한 자이

로스코픽 가진(Gyroscopic Excitation)에 약한 특성을 가지고 있으므로 이 가진에 대한 검증이 필요하다. 본 시험기를 이용하여 8 rad/sec의 각속도와 120 rad/sec<sup>2</sup>의 각가속도로 이루어진 180도 구간을 20만회의 반복 시험을 하였다. 시험에 사용된 속도 패턴은 HDD를 취급하는 중 일어날 수 있는 가진보다 훨씬 높은 수준이므로 베어링에 대한 적합한 설계와 제작이 이루어진 경우 실제 사용에 문제를 야기할 가능성은 매우 작다고 할 수 있다

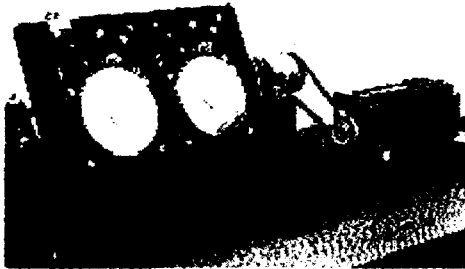


Fig. 10. Figure of Gyroscopic Exciter For One of HDD Reliability Test using Hydrodynamic Bearing Motor

## 6. 결론

이미 유체 베어링의 특성에 관하여 많은 보고가 있었으나 본 연구에서는 실제 HDD에 적용하였을 경우의 특성을 볼 베어링을 이용한 모터와의 비교를 통해 분석하였다. 최근 HDD 업계에서 가정용 PC와 AV 기기 등에서의 적용으로 요구되는 저소음 구조 및 저장 용량 증가의 요구를 맞추기 위한 저 NRRO 모터의 필요성 증가로 인해 유체 베어링 모터가 갖는 기계적 우수성에 관심이 증가하고 있다. 본 연구에서는 동일 사양의 HDD 시스템을 볼 베어링과 유체 베어링을 이용한 모터로 구성하여 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 유체 베어링의 NRRO 특성은 볼 베어링에 비해 적은 주파수 성분으로 구성되어 있으며 감쇠 특성 등으로 인해 30% 이상의 개선 효과를 예상할 수 있고 운전 시간에 대한 변화량이 작다.
2. 볼 베어링에 비해 유체 베어링을 사용하는 경우 디스크 시스템의 Rocking 모드에서의 감쇠비가 10배 가량 우수하다.
3. 유체 베어링을 이용한 HDD 시스템의 소음 특성은 모터의 전자기력 진동 성분 및 디스크 회전 가진에 의한 소음만 존재하며 베어링에서 발생하는 소음 성분은 존재하지 않아 저소음 HDD 제작이 가능하다.
4. 점성 유체의 압력 분포를 베어링으로 사용하므로 볼 베어링에 비해 소비 전류가 크며 온도에 따른 소비 전류의 변화가 존재한다.

5. 동일 서보 제어를 사용하는 HDD에서 유체 베어링의 경우 10~20% 개선된 PES(Position Error Signal) 분포를 보여 준다.

6. 윤활유의 누설 및 베어링 내의 유동 분포에 대한 고려는 유체 베어링을 사용하는 모터의 설계에 있어 필수적인 요소이며 적합한 설계가 이루어진 경우 장기간 사용의 신뢰성을 확보할 수 있음을 실험을 통해 검증하였다.

## 감사의 글

연구비를 지원해 주신 삼성전자 스토리지 사업부 관계자 여러분과 SISA의 동료 Engineer들, 그리고 샘플을 제공해 주신 Nidec사에 감사 드립니다.

## 참고문헌

- [1] Bernard J. Hamrock, "Fundamentals of Fluid Film Lubrication", McGraw-Hill Inc., 1994
- [2] 손영, 황태연, 강성우, 한윤식, "하드디스크 드라이브에 있어서 스핀들 모터의 구조적 가진에 따른 시스템의 소음특성에 관한 연구", 한국소음진동공학회 2000년도 춘계학술대회논문집, 2000.
- [3] C.P. Roger Ku, "Effects of Compliance of Hydrodynamic Thrust Bearings in Hard Disk Drives on Disk Vibration", IEEE Trans. on Magnetics, Vol 33, No 5, pp 2641-2643, 1997
- [4] C.P. Roger Ku, "Dynamic Characteristics of Hard Disk Drive Spindle Motor", ASME Journal of Tribology, Vol. 118, pp 402-406, 1996
- [5] S. Yoshida, "Non-Symmetrical Three-Lobe Bearing Spindle Technology: A Drive Technology to Increase Aerial Density", IEEE Trans. on Magnetics, Vol 27, No 3, pp 1721-1726, 1996
- [6] G. Bouchard, F.E. Talke, "An Investigation of Non-Repeatable Spindle Runout", IEEE Trans. on Magnetics, Vol 23, No 5, pp 3687-3689, 1987