

수동형 자기 베어링과 유체 동압 저널베어링을 이용한 HDD 용 스피들 모터 개발

Development of a HDD Spindle Motor Using Passive Magnet Bearing and Fluid Dynamic Journal Bearing.

이 청 일*·김 학 운**·장 건 희***

Chungill Lee, Hakwoon Kim and Gunhee Jang

Key Words : Fluid Dynamic Bearing(유체 동압 베어링), Passive Magnet Bearing(수동형 자기 베어링), HDD Spindle Motor(하드 디스크 드라이브 스피들 모터), Efficiency(효율), Non-repeatable Runout(NRRO, 비주기적 런아웃), Flying Height(부상높이)

ABSTRACT

This paper presents a highly efficient HDD (Hard Disk Drive) spindle motor with a passive magnetic thrust bearing and a fluid dynamic journal bearing and its effectiveness is verified through experiment. It eliminates the mechanical friction loss of a thrust bearing which is around 18% of total power consumption of a 3.5" HDD spindle motor, by replacing a conventional fluid dynamic thrust bearing with a passive magnetic thrust bearing. The passive magnetic thrust bearing using permanent magnets is inherently unstable in radial direction. However, the radial fluid dynamic force of the fluid dynamic journal bearing counterbalances the radial magnetic force of magnetic thrust bearing to achieve the stability as the motor spins up. It has less or equivalent runout and less flying height than the conventional spindle motor.

1. 서 론

최근의 컴퓨터 하드 디스크 드라이브용(Hard Disk Drive, HDD) 스피들 모터에 사용되는 유체 동압 베어링(Fluid Dynamic Bearing, FDB)은 윤활유체에 의해 고체간의 접촉을 방지하여 낮은 NRRO와 저소음을 달성하였다.⁽¹⁾ 그러나 FDB를 사용하는 HDD 스피들 모터는 회전속도에 비례하여 발생하는 마찰 토크에 의해 많은 전력을 소모하며, 특히 고속 HDD와 mobile HDD에 있어서 이의 개선이 요구된다.

Fig. 1은 전형적인 FDB를 사용하는 3.5" HDD 스피들 모터의 전력 소모 도표이다. 현재 사용되는 HDD 스피들 모터는 약 45%의 효율을 가지며, 유체 동압 스러스트 베어링은 총 입력 전력의 7~8%를 소모한다. Fig. 2는 FDB를 사용하는 HDD 스피들 모터의 일반적인 구조이다. 기존의 FDB는 두 개의 저널 베어링과 두 개의 스러스트 베어링으로 이루어져 있으며 모터의 구동 시 회전부의 하중이 평형을 이루는 위치로 부상한다.⁽²⁾ 외부 요인에 의해 HDD의 자세가 바뀌면 자중의 방

향 변화로 인해 회전부의 위치와 자세가 달라지고 이것은 헤드와 디스크 사이의 상대 변위에 영향을 주어 헤드와 디스크의 신호전달이 불안정해 지는 원인이 된다.

반면, 수동형 자기 베어링은 공기 중에서 부상하여 작동하므로 각 요소들 간의 직접적인 접촉을

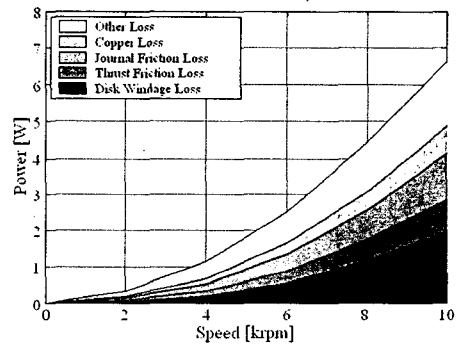


Fig. 1 Power consumption chart of a typical HDD spindle motor with efficiency of 45%

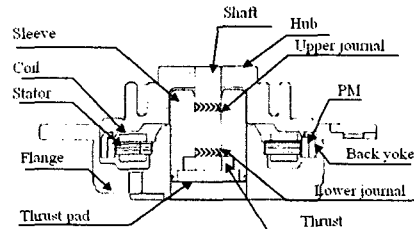


Fig. 2 Structure of 3.5" HDD spindle motor using FDB

* 정희원, 한양대학교 대학원 정밀기계공학과
E-mail : acropora@hanmail.net
Tel : (02) 2299-5685, Fax : (02) 2292-3406

** 정희원, 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

*** 정희원, 한양대학교 기계공학과

피할 수 있으며 윤활유체에 의한 마찰토크가 없으므로 마찰에 의한 손실을 줄일 수 있다. 또한, 수동형 자기 베어링은 자기력에 의한 반발력과 회전부에 가해지는 하중이 일치하는 평형점에서 작동하므로 유체 동압 베어링과 달리 스핀들 모터의 회전 속도 및 자세에 의한 회전부의 위치 변화가 적다는 장점이 있다. 하지만 Earnshaw's theorem⁽³⁾에서 밝혀진 바와 같이 수동형 자기 베어링은 기본적으로 안정적인 구조를 가질 수 없기 때문에 초 전도체 물질을 이용하거나⁽⁴⁾, 능동제어⁽⁵⁾ 등 이를 극복하기 위한 기술들이 연구 되어왔다. 하지만, 이런 기술들은 냉각기 혹은 제어기 등의 추가

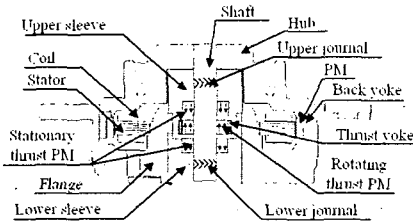


Fig. 3 Structure of 3.5" HDD spindle motor using MTB and fluid dynamic journal bearing

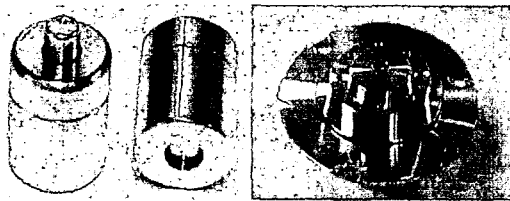


Fig. 4 Developed Bearing, and HDD spindle motor

Table 1 Electric design parameter of the developed motor

Parameters	Value
Rated speed [rpm]	15,000
Torque constant [Nm/A]	4.92
Pole/Slot [-]	8/12
Resistance/phase [Ω]	0.48

Table 2 Major design parameter of the bearings in the developed motor

Part	Parameters	Value
Journal bearing	Width of the upper journal bearing [mm]	2.2
	Width of the lower journal bearing [mm]	1.2
	Clearance [μm]	2.8
	Number of groove [-]	8
	Viscosity of the lubricant [m Pa·s]	9.57
Thrust bearing	Inner diameter [mm]	4.05
	Outer diameter [mm]	8.3
	Clearance [mm]	0.2
	Thickness of the rotating PM [mm]	2.6
	Residual flux density of rotating PM [T]	1.1

적인 장치들이 필요하기 때문에 HDD 스핀들 모터에 적합하지 않다. Jang 과 Park⁽⁶⁾은 수동형 자기 스러스트 베어링(Magnetic Thrust Bearing, MTB)과 유체 동압 저널 베어링을 적용한 베어링 시스템을 제안하였다. 그들은 해석과 실험을 통해 제안한 베어링 시스템의 동적 안정성을 확인하였다. 그러나 동특성 및 과도특성에 대한 연구는 아직 이루어지지 않았다.

본 논문에서는 유체 동압 저널 베어링과 MTB를 이용한 HDD 용 스핀들 모터의 시작품을 제작하였고, 회전 속도에 대한 전기적 실험을 통해 전기적 특성 변화를 연구하였다. 또한 과도상태와 정상상태에서 회전부의 변위와 진동을 측정하여 스핀들 모터의 진동특성 및 부상높이의 변화에 대한 연구를 수행하였다.

2. 시작품 제작 및 실험 방법

2.1 시작품 제작

Fig. 3 은 본 연구에서 개발한 MTB 와 유체 동압 저널 베어링이 적용된 HDD 스핀들 모터의 구조이다. 유체 동압 저널 베어링은 고정된 슬리브에 쉐기모양의 그루브가 새겨져 있는 고정 그루브 방식으로 제작되었고, 상부 저널 베어링과 하부 저널 베어링의 베어링 영역에만 윤활유체를 주입하였다. MTB 는 3 개의 영구자석을 이용하여 제작하였으며, 회전부와 고정부의 마주하는 영구자석에서 발생하는 반발력과 회전부에 가해지는 하중이 일치하는 평형점에서 작동하는 구조이다. 동일한 조건의 비교실험을 위해 Fig. 2 와 Fig. 3 의 저널 베어링에는 동일한 설계변수를 갖는 유체 동압 저널 베어링을 적용하였고, 유체 동압 스러스트 베어링과 MTB 의 두 가지 종류의 베어링을 동일한 전자기적 성능을 갖는 모터에 조립하였다. Table 1 과 2 는 개발된 모터의 전기적 설계변수와 기계적 설계 변수이다. 그리고 Fig. 4 는 제작된 베어링과 스핀들 모터의 사진이다.

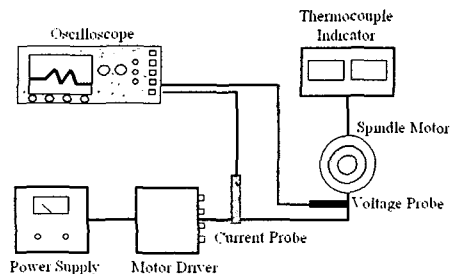


Fig. 5 Experimental setup for consumption power

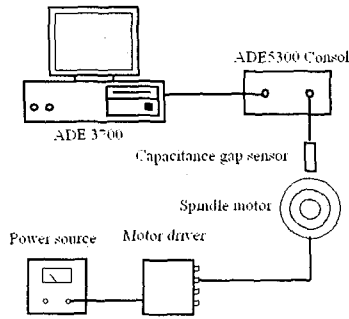


Fig. 6 Experimental setup for runout and flying height test

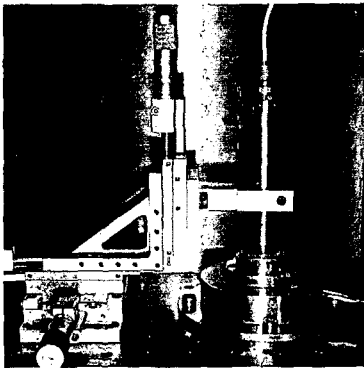


Fig. 7 Experimental setup for flying height of the spindle motor fixed by 0°

2.2 실험 방법

Fig. 5 는 HDD 스피들 모터의 소비전력을 측정하기 위한 실험 장치의 구성도이다. FDB 를 적용한 모터와 MTB 를 적용한 모터의 입력 전압과 전류를 oscilloscope 를 이용하여 정지 시부터 정격속도인 15,000rpm 까지 3,000rpm 간격으로 측정하였다. FDB 는 회전 시 마찰에 의한 온도 상승으로 인해 유체의 점성이 감소한다. 그 결과 마찰이 감소하여 입력 전류가 감소한다. 모터 구동 후 온도가 정상상태에 이르기까지는 과도한 시간이 소요되므로 플렌지 바닥의 온도가 상온인 25.2° 일 때 기동 시키고 30 초 후의 입력 전류와 전압을 측정 한 후 다시 25.2° 까지 냉각을 시킨 후 반복 실험 하였다.

Fig. 6 은 HDD 스피들 모터의 반경방향 런아웃과 부상높이를 측정하기 위한 실험장치 구성도이다. 반경방향 런아웃의 측정점은 디스크를 장착하지 않은 경우 허브의 상단이고, 디스크를 장착한 경우에는 스페이서의 상단이다. 반경방향 런아웃 측정은 스피들 모터를 15,000rpm 으로 구동하며

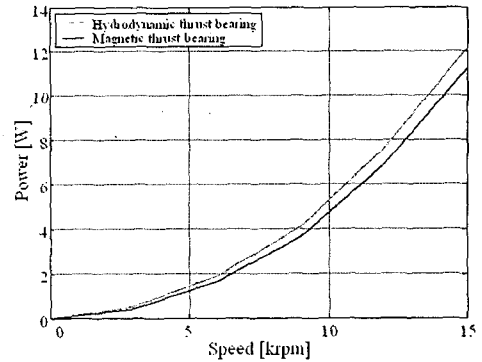


Fig. 8 Power consumption of the HDD spindle motor with one disk

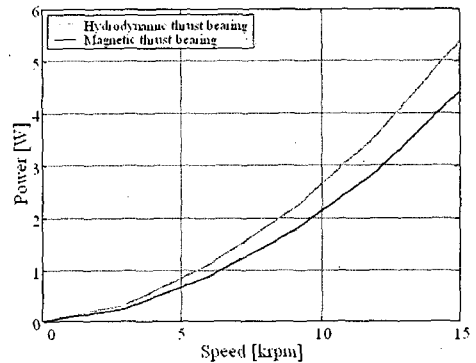


Fig. 9 Power consumption of the HDD spindle motor without disk

수행하였다. 측정에는 해상도가 $\pm 5\text{nm}$ 인 정전용량 변위센서를 사용하였고, 1 회전을 256 섹터로 분할하여 총 128 회전 동안의 변위를 평균하였다. 동일한 방법으로 총 15 회 반복 측정한 결과를 평균하였다.

Fig. 7 은 스피들 모터를 0°로 장착한 경우의 부상높이를 측정하기 위한 장치의 사진이다. 측정에는 런아웃 측정과 동일한 성능의 정전용량 변위센서를 사용하였고 Pulse3560 신호 처리기를 사용하여 신호를 분석하였다. Fig. 7 과 같이 스피들 모터를 0°로 장착한 경우와 스피들 모터의 윗면이 지면을 향하는 자세인 180°로 장착한 경우에 대하여 실험을 수행하였으며 신호처리기를 통해 회전을 시작한 후 14 초 동안의 스피들의 축 방향 위치 변화를 입력 받아 부상높이를 계산하였다. FDB 를 적용한 스피들 모터의 정지상태에서 스피들의 초기 위치를 알아내는 것은 불가능하다. 하지만 회전부의 질량이 증가하면 정지 시 스피들의 초기 위치의 일관성이 확보되므로 부상높이 측정은 디스크 한 장을 장착한 경우에만 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 회전 속도에 따른 소비전력 측정

Fig. 8 은 HDD 스피들 모터에 3.5" 디스크 한 장을 장착했을 때의 소비전력 측정 결과이고, Fig. 9 는 HDD 스피들 모터 단품의 측정 결과이다. 디스크 장착 시 정격 속도 15,000rpm 에서의 소모 전력 감소율은 7.77%이며 단품의 경우는 18.00%이다. 두 가지 경우 모두 소모 전력 감소율이 저속일수록 높다. 이것은 고속일수록 베어링 마찰로 인한 온도 상승의 폭이 크므로 점성 감소의 영향이 커져서 베어링 마찰이 감소하기 때문이다. HDD 스피들 모터의 소비전력은 같은 전자기적 성능을 가질 때 구동 조건이 동일하면 구동에 필요한 전력은 동일하다. 그러나 디스크의 풍손과 베어링의 마찰 손실, 모터의 동손 등의 손실 요인이 달라지면 모터가 소비하는 전력은 달라지게 되며, 그 결과 소비전력이 달라지게 된다. 실험에 사용된 FDB 와 MTB 는 저널베어링이 동일한 면적과 형상을 가지도록 설계되었으므로 FDB 를 적용한 모터에 비해 MTB 적용 모터의 소비전력이 작은 것은 마찰 손실이 작다는 것을 의미하며 MTB 적용 모터의 손실에 스러스트 베어링의 마찰손실이 포함되지 않음을 의미한다.

3.2 런아웃 측정

측정된 반경방향 변위를 주파수 분석하여 스피들 모터 회전 주파수의 배수 성분인 주기적 진동 특성(Repeatable Runout, RRO)과 회전주파수와 상관없는 비주기적 진동 특성(Non-Repeatable Runout, NRRO)으로 분리하였다.

Table 3 은 FDB 와 MTB 를 사용한 스피들 모터의 모터 단품과 디스크 한 장을 장착한 상태의 반경방향 런아웃 측정 결과이다. 여기서 TIR(Total Indicate Runout)은 RRO 와 NRRO 를 포함한 반경방향 변위의 전체 성분으로 TIR 과 RRO 는 pk-pk 에 대한 결과이며 NRRO 는 3 σ 의 결과이다. 디스크의 장착 여부에 따라서 FDB 를 사용한 스피들 모터의 RRO 의 차이가 큰 것은 디스크와 스페이

서의 결합에 의해 발생 할 수 있는 불평형 질량의 증가와 측정부인 스페이서와 허브의 중심이 일치하지 않았기 때문이라 사료된다. 디스크를 장착하지 않은 경우에는 FDB 의 NRRO 가 MTB 의 NRRO 보다 근소하게 작은 결과를 보여주지만 디스크 한 장을 장착한 경우에는 MTB 의 NRRO 가 FDB 의 NRRO 에 비해 50%이상 작은 결과를 보여준다. 이것은 스러스트가 FDB 의 경우 축의 밑단에 위치하고, MTB 의 경우 축의 중앙에 위치한 베어링의 구조에 기인하는 것으로서 축의 중앙에 스러스트가 있는 구조가 디스크 장착에 의하여 발생하는 틸팅에 대해 강인한 특성을 갖기 때문이라 사료된다. 측정 결과를 통해 MTB 를 사용한 스피들 모터의 반경 방향 진동의 수준은 FDB 를 사용한 스피들 모터와 근사하거나 감소하였다는 것을 알 수 있다.

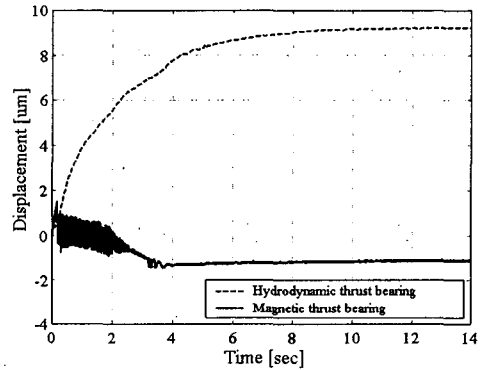


Fig. 10 Power consumption of HDD spindle motor with a disk

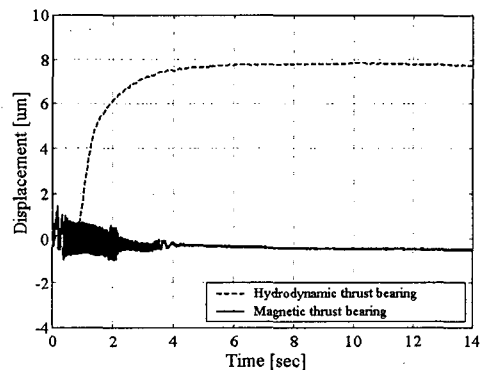


Fig. 11 Power consumption of HDD spindle motor without disk

Table 3 Result comparison of the radial runout test between FDB and MTB

Runout component	Without disk		With disk	
	FDB	MTB	FDB	MTB
TIR (pk-pk) [μm]	8.963	7.929	16.857	7.767
RRO (pk-pk) [μm]	8.950	7.917	16.778	7.740
NRRO (3 σ) [μm]	0.018	0.020	0.094	0.040

Table 4 Experimental result of flying height between FDB and MTB

Attitude [deg]	FDB [μm]	MTB [μm]
0	9.24	-1.10
180	7.74	-0.48

3.3 부상높이 측정

Fig. 10 과 11 은 디스크 한 장을 장착한 스피들 모터가 정지 상태에서부터 15,000rpm 으로 회전하여 정상상태에 도달하는 14 초 동안 FDB 와 MTB 의 축 방향 변위를 측정된 결과이고, Table 4 는 정상상태에 도달한 13 초부터 14 초까지의 변위를 평균한 결과이다. 세로축은 초기 위치로부터의 변위로 양의 방향은 지면으로부터 위쪽에서의 변위를 의미한다.

FDB 는 정지상태에서는 부하하중이 발생하지 않으므로 회전부는 자중에 의해 중력 방향으로 가라앉게 된다. 하지만 스피들 모터가 구동하면 베어링에서 부하하중이 발생하여 회전부의 하중과 스러스트 베어링의 부하하중이 평형을 이루는 지점까지 부상하게 된다. 하지만 MTB 는 정지상태에서도 자석에 의한 축 방향 지지력이 존재하여 회전부의 하중과 자석의 축 방향 하중이 평형을 이루는 지점에 스피들이 위치하게 된다. 이러한 이유 때문에 정지상태로부터 15,000rpm 으로 회전시킬 경우, FDB 는 0°와 180°의 위치에서 각각 9.24 μ m 와 7.74 μ m 의 변위가 발생하며 MTB 는 각각 -1.10 μ m 와 -0.48 μ m 의 변위가 발생한다. MTB 에서 변위가 발생하는 것은 스피들 모터 구동을 위한 자석과 고정자의 위치가 정확히 일치하지 않아 권선에 전원이 공급될 때 축 방향의 하중이 발생하기 때문이라 사료된다. 하지만 디스크 표면에서 수십 나노 미터로 부상하여 작동하는 헤드의 관점에서 보면 HDD 의 장착 위치, 즉 스피들 모터의 자세가 0°에서 180°로 바뀔 때 FDB 는 축 방향으로 최고 16.98 μ m 의 범위에서 작동하게 되고 MTB 는 축 방향으로 1.58 μ m 의 범위에서 작동하게 되므로, MTB 를 사용할 경우 축 방향 위치 변화로 야기되는 기록 밀도 저하를 줄일 수 있다.

구동 초기의 과도상태에서 MTB 가 축 방향으로 진동하는 것은 MTB 의 축 방향 부하하중이 FDB 에 비해 작으며, MTB 의 특성상 감쇄효과도 매우 작기 때문에 과도 상태에서 발생하는 축 방향 진동을 효과적으로 감소시키지 못하는 것으로 사료된다. 과도상태의 진동을 줄이기 위해 MTB 에 사용되는 자석의 잔류 자속밀도를 증가시키거나 공극을 감소시켜 축 방향 강성을 충분히 확보할 수 있으리라 사료된다.

4. 결론

본 논문에서는 수동형 자기 스러스트 베어링과 유체 동압 저널 베어링을 적용한 HDD 스피들 모터를 제작하였다. 제작한 스피들 모터의 전기적

기계적 특성을 실험적으로 규명하였다. 제작한 스피들 모터는 작동 시 유체 동압 스러스트 베어링을 적용한 스피들 모터보다 낮은 전력으로 동작이 가능함을 검증하였다. 또한 런아웃 실험을 통해 본 연구에서 제작한 MTB 를 이용한 스피들 모터의 반경 방향 진동의 수준은 디스크 장착 여부에 따라 FDB 를 사용한 스피들 모터와 근사하거나 감소하였다는 것을 확인하였다. 또한 부상높이 실험을 통해 수동형 자기 스러스트 베어링을 이용한 스피들 모터는 장착 자세에 대하여 축방향 변위가 작다는 것을 확인하였다. 따라서 MTB 를 사용할 경우 기존의 FDB 를 이용한 HDD 스피들 모터에 비해 소비전력 감소 효과가 있으며 FDB 와 동등한 수준의 동특성을 확보 할 수 있다. 또한 HDD 의 장착 자세에 대해 FDB 을 사용한 경우보다 높은 정밀도를 기대할 수 있고, 따라서 HDD 의 기록 밀도 향상에 기여할 수 있음을 확인 하였다. 그러나 실험결과 MTB 를 적용한 모터가 축 방향의 진동을 효과적으로 감소시키지 못하는 단점을 확인 하였다. 이러한 문제에 대한 해결방안으로 향후에는 MTB 의 강성과 감쇄를 증가시키는 동시에 마찰 손실을 증가시키지 않도록 하는 연구가 계속되어야 할 것이다.

참고문헌

- (1) Matsuoka, K., Obata, H., Kita, H., and Toujou, F., 2001, "Development of FDB Spindle Motors for HDD Use", IEEE Trans. Magn., 37(2), pp. 783~788.
- (2) G. H. Jang, S. H. Oh, S. H. Lee, 2005, "Experimental Study on Whirling, Flying and Tilting Motion of a 3.5" FDB Spindle System", Tribology International, Will be published.
- (3) S. Earnshaw, 1824, "On the nature of the molecular forces, which regulate the constitution of the luminiferous ether", Trans. Cambridge Phil. Soc., Vol. 7 pp. 97~112.
- (4) P. Kummeth, W. Nick, G. Ries and H.-W. Neumuller, 2002, "Development of superconducting magnetic bearings", Physica C: Superconductivity, Vol. 372-376, Part 3, Pages 1470-1473.
- (5) F. Matsumura, M. Fujita and C. Oida, 1987, "Theory and experiment of magnetic bearing combining radial control and thrust control", IEEE Transactions on Magnetics, Vol 23, Issue 5, pp. 2581-2583
- (6) G. H. Jang, J. S. Park, 2005, "Development of a Highly Efficient HDD Spindle Motor with a Passive Magnetic Thrust Bearing and a Hydrodynamic Journal Bearing", Journal of Applied Physics, Will be published