

# ODD 회전 디스크의 틸팅 각운동에 의한 소모전력 해석

## Analysis of Power Loss of an Optical Disc Drive due to the Tilting Motion of a Rotating Disc

정희용\*, 정상진\*, 장건희†  
H. Y. Chong, S. J. Sung and G. H. Jang

(2010년 9월 14일 접수; 2010년 9월 14일 심사완료; 2010년 9월 17일 게재 확정)

### Abstract

This paper measured and analyzed the source of total power loss of an ODD of a notebook computer. It shows that the biggest power loss is the windage loss due to the friction between rotating disk and surrounding air. It measured the power loss by the tilting motion of a rotating disc which is originated from the unbalanced mass of the rotating disc or the squareness between case-rotor and shaft. The power loss of rotating disc due to tilting motion was also calculated by using FLUENT, and it was correlated with the measured one. This paper shows that the one of the effective methods to reduce the power loss of an ODD is to reduce the tilting motion of a rotating disc.

**Key Words :** Axial displacement(축 방향 변위), Optical disc drive(광 디스크 드라이브), Power loss(소모 전력), Tilting motion(틸팅 각운동), Windage loss(풍손)

### 기호설명

- A : area of disc [m<sup>2</sup>]
- E<sub>v</sub> : eddy viscosity [N·s/m<sup>2</sup>]
- P : power [W]
- R : distance from disc center [m]
- T : friction-torque [N·m]
- h : gap between case and disc [m]
- p : pressure [Pa]
- r : radius of element [m]
- Δz : axial displacement [m]
- μ : viscosity [N·s/m<sup>2</sup>]
- τ : shear stress [Pa]
- φ : tilting angle [°]
- ω : angular-velocity of disc [rad/s]

### 1. 서론

CD, DVD 등과 같은 광학식 정보저장기기가 노트북, 컴퓨터 등에 사용되면서, 소모전력 저감에 관한 관심이 높아지고, 이에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. ODD와 HDD의 소모전력을 손실 원별로 측정한 연구에 따르면 풍손(windage loss)이 가장 크게 나타나고 있다. Jang과 Park<sup>(1)</sup>은 HDD의 경우 풍손에 의한 손실이 전체 손실 중 가장 큰 손실이라는 것을 보여주었고 Kim과 Yang<sup>(2)</sup>은 ODD의 전체 전력 손실 중 풍손에 의한 손실이 약 70%를 차지한다는 것을 보여주었다. 따라서 디스크에 의한 풍손을 저감하는 것이 저 소모전력 광학식 정보저장기기 개발에 가장 효과적인 방법이다. 특히 CD, DVD에서 디스크의 탈, 부착은 사용자의 손으로 이루어 지는데, 이에 따라 회전시 디스크는 단일 평면내의 회전 운동뿐 아니라 디스크 부착시 경사 또는 회전디스크의 불평형질량 등에 의한 틸팅(tilting) 각운동이 존재하게 된다. 이러한 회전 디스크의 틸팅 각운동은 광픽업장치가 디스크에 정보를 읽고 쓰는 것을 저해하며, 소모전력 증가에 중요한 역할을 한다.

† 한양대학교 기계공학부  
E-mail : ghjang@hanyang.ac.kr  
TEL : (02) 2220-0431 FAX : (02) 2292-3406

\* 한양대학교 대학원 기계공학과  
# 이 논문은 대한기계학회 2010년도 추계학술대회 (2010.11.03~05, ICC 제주) 발표논문입니다.

Yasuda 와 Torii<sup>(3)</sup>는 고속 회전시 디스크 주변에 있는 공기 유동이 디스크 진동을 발생시킨다는 것을 이론과 실험을 통해 설명하였다. Lee 와 Lim<sup>(4)</sup>은 슬림형 ODD 에서 공기의 압력차에 의해 디스크의 변형이 일어나는 것을 실험적으로 연구하였다. 하지만 디스크의 진동과 주변 공기 유동에 관한 연구를 수행했을 뿐 디스크의 진동과 공기 유동이 소모전력에 미치는 영향에 관한 연구는 진행되지 않았다.

본 논문에서는 ODD 스피들 모터 시스템에서 발생하는 손실을 실험과 해석적인 방법을 통해 손실원별로 분류하여 회전디스크에 의한 풍손을 계산하였다. 회전 디스크의 운동이 일정한 틸팅 각을 가지고 회전하는 강체운동(rigid body motion)이 지배적임을 실험적으로 확인하였으며 틸팅 각을 증가시킬 수 있는 회전 디스크의 불평형 질량과 모터 회전부의 직각도에 따른 소모전력을 실험적으로 측정함으로써 틸팅 각과 소모전력의 상관관계를 파악하였다. 또한 유체해석 프로그램인 FLUENT 를 이용하여 회전디스크 틸팅 각 운동에 따른 공기 유동을 해석하여 회전디스크의 틸팅 각운동과 풍손의 상관 관계를 검증하였다.

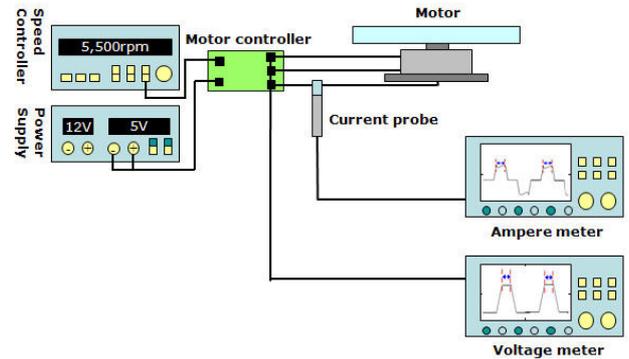


Fig. 1 Experimental setup to measure the power loss of the ODD spindle system

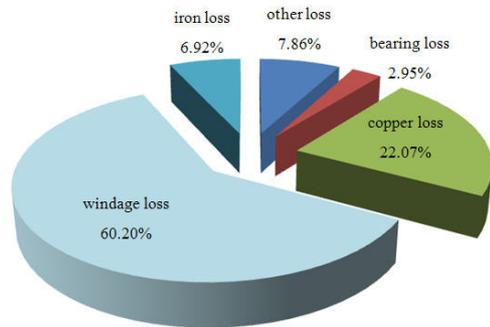


Fig. 2 Loss category of ODD spindle system

## 2. ODD 스피들 모터의 소모전력 측정 및 손실 분석

### 2.1 실험 목적 및 방법

ODD 스피들 모터의 손실은 크게 풍손, 축손, 동손, 철손으로 나눌 수 있으며 각각의 손실은 독립적이지 않으며 연성되어있다. 따라서 공기 유동에 의한 디스크 표면에서의 풍손을 계산하기 위해서는 전체 소모전력을 각 손실원별로 분류해야 한다.

Fig. 1 은 ODD 스피들 모터의 인가전류 및 전압을 측정하기 위한 실험개략도이다. 5500rpm 으로 구동 시 인가전류와 전압은 모터제어기를 지나 모터전단에서 전류계와 전압계를 이용하여 측정하였다.

### 2.2 실험 결과

ODD 모터의 손실원 중 축손은 본 연구실에서 개발된 유체동압베어링 해석 프로그램<sup>(5)</sup>을 이용

Table 1 Power consumption of ODD spindle system

	Without disc	With disc	Difference
Bearing loss	0.043W	0.043W	0
Copper loss	0.018W	0.319W	0.301W
Iron loss	0.098W	0.100W	0.002W
Windage loss	0	0.869W	0.869W
Total loss	0.271W	1.444W	1.173W

하여 5500 rpm 으로 회전 시 소모전력을 계산하였다. 동손은 모터에 인가되는 전류와 저항을 이용하여 계산하였고 철손은 전자기장 해석 프로그램인 FLUX 3D 를 이용하여 Bertotti 철손 계산 방법<sup>(6)</sup>으로 산출하였다.

풍손은 다음 식(1)과 같이 디스크 장착 유무에 따른 소모전력 변동량에서 전류 증가에 대한 동

손과 철손의 변동량을 제외함으로써 풍손을 구하였다.

$$P_{windage} = \Delta P_{disc} - \Delta P_{copper} - \Delta P_{iron} \quad (1)$$

Fig. 2는 ODD 모터가 5500 rpm으로 회전 시 각 손실원이 차지하는 비중을 나타내며 Table 1은 각 손실원별 소모전력을 나타낸다. ODD 모터의 전체 손실은 1.44W로 나타났고 그 중 풍손이 약 60%로 가장 크게 차지한다. 따라서 풍손의 변동은 ODD 모터의 전체 소모전력에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 판단되며 ODD의 저 소모전력화를 위해서는 풍손 저감이 중요할 것으로 판단된다.

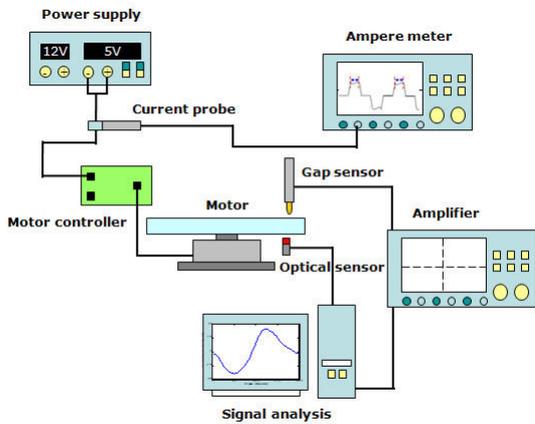


Fig. 3 Experimental setup to measure the axial displacement and power loss of the ODD spindle system

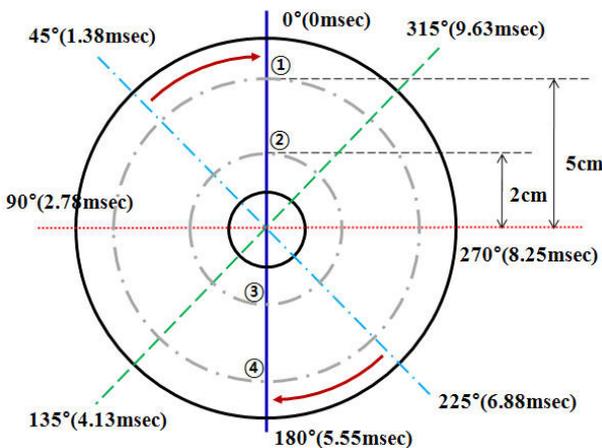


Fig. 4 Measurement positions of the disc

### 3. 디스크의 틸팅 각운동에 따른 소모전류 측정

#### 3.1 실험 목적 및 방법

CD, DVD에 사용되는 디스크의 재질은 유연하기 때문에 회전하는 디스크는 강제운동(rigid body motion)과 탄성변형(flexible motion)을 포함하고 있으며, 각각의 기여도를 결정하기 위해 회전하는 디스크의 운동을 측정하였다. 또한 회전 디스크의 틸팅 각운동과 소모전력간의 상관관계를 분석하기 위해서 회전 디스크의 틸팅 각운동에 영향을 미칠 수 있는 불평형 질량과 모터 회전부의 직각도에 따른 소모전력 변화를 측정하였다.

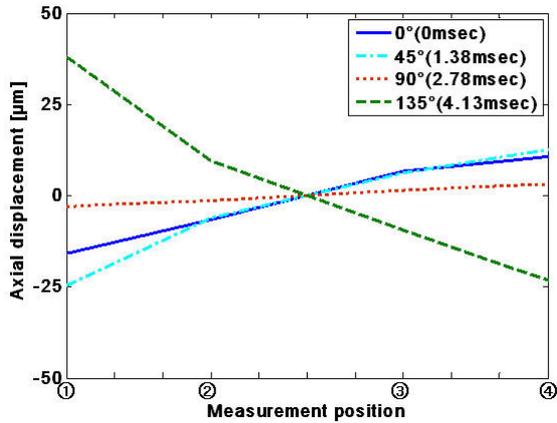
Fig. 3은 ODD 스피들 모터의 틸팅 각운동과 소모전력의 상관관계를 측정하기 위한 실험개략도이다. 축 방향 변위는 갭 센서(gap sensor)를 이용하여 측정하였고 소모 전류는 모터제어기를 지나 모터 전단에서 전류계를 사용하여 측정하였다. 광 센서(optical sensor)는 회전에 따른 인덱스 신호를 발생시켜 디스크의 회전속도를 측정하고 측정점 등에서 갭 센서로 측정된 변위의 초기 위치를 일치시키기 위하여 사용되었다.<sup>(7)</sup>

#### 3.2 실험 결과

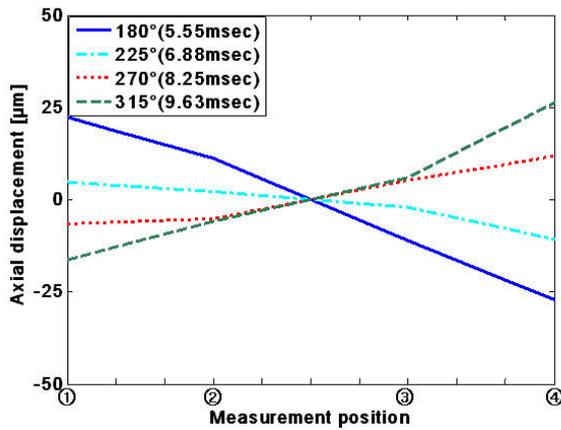
##### 3.2.1 디스크의 회전운동 측정

Fig. 4는 회전 디스크의 운동을 측정한 위치와 측정시간을 나타낸다. 디스크의 중심으로부터 2cm, 5cm 떨어진 4 점에 대해서 축 방향 변위를 각각 측정하여 초기위치를 동기화하였다. Fig. 5는 디스크가 동일한 각도를 회전한 시점에서 측정위치에서의 축 방향 변위를 나타낸다. 각 측정점에서의 변위가 동일 시간에 대해서 거의 선형적으로 나타나기 때문에 디스크의 회전운동은 강제 운동이 지배적이며 탄성변형은 상대적으로 무시할 수 있다. 따라서 Fig. 6과 같이 실험에 사용된 디스크는 일정한 틸팅 각을 가지고 회전하는 강제운동으로 나타낼 수 있으며 측정된 축 방향 변위는 다음 식(2)을 이용하여 틸팅 각을 계산할 수 있다.

$$\varphi_{tilting} \approx \frac{1}{2} R \cdot \Delta z \quad (2)$$



(a)



(b)

Fig. 5 Measured results of the rotating motion of the disc (a) 0°~135° and (b) 180°~315°

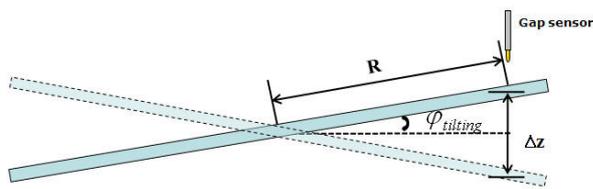


Fig. 6 Tilting angle of the ODD disc

3.2.2 불평형 질량 증가에 따른 소모전력 측정

ODD 스피들 모터의 경우 디스크는 제작공차와 디스크의 탈, 부착이 손으로 이루어지기 때문에 불평형 질량이 존재한다. Table 2 는 불평형 질량에 의한 소모전력 및 축 방향 변위를 나타낸다. 디스크의 편심이 증가할수록 소모전력이 함께 증가하였으며 축 방향 변위 또한 증가하였다. 이러한 결과는 디스크의 불평형 질량이 축 방향 변위를 증가시켰고 디스크가 일정한 틸팅각을 가지고

Table 2 Measured results due to the unbalanced mass of disc

	Normal disc	0.3g · cm Eccentric disc	0.6g · cm Eccentric disc
Power loss	1.615W	1.674W	1.718W
Axial displacement	69.03um	82.78um	96.53um
Tilting angle	0.040°	0.047°	0.055°

Table 3 Measured results due to the squareness between case-rotor and shaft

		Sample 1	Sample 2	Sample 3
Squareness		0.027°	0.055°	0.084°
Power loss	w/o disc	0.485W	0.502W	0.510W
	w/ disc	1.630W	1.663W	1.685W
Axial displacement		25.20um	36.40um	48.25um
Tilting angle		0.063°	0.091°	0.120°

회전하면서 공기유동과의 마찰이 증가되어 소모전력이 증가하는 것을 보여준다.

3.2.3 직각도 변화에 따른 소모전력 측정

ODD 스피들 모터의 디스크를 제외한 회전부에서 틸팅 각을 발생시키는 요인으로는 축과 베어링(bearing) 사이의 간극과 축과 case-rotor 사이의 직각도가 있다. Table 3 는 이러한 회전부의 직각도 변화에 따른 소모전력과 축 방향 변위를 나타낸다. 샘플(sample) 1,2,3 은 축과 case-rotor 사이의 직각도가 다른 회전부를 가지고 있는 ODD 스피들모터이다. 측정결과는 축과 case-rotor 사이의 직각도 증가에 따라 소모전력과 축 방향 변위가 증가함을 보여준다. 불평형 질량 증가에 따른 소모전력 측정결과와 같이 모터의 회전부 자체의 직각도에 의해 디스크가 틸팅 각운동을 함으로써 소모전력이 증가함을 보여준다.

### 4. 틸팅 각운동과 이에 의한 회전 디스크의 풍손 해석

#### 4.1 해석 방법

공기유동 해석 모델은 회전부인 디스크와 case-rotor 를 3 차원으로 모델링하였고, 공기유동 해석 영역은 tetrahedron 요소를 사용하였으며 공기의 물성치를 적용하여 총 70 만개의 cell 로 모델링하여, 상용 프로그램인 FLUENT 를 이용하여 계산하였다. 디스크의 회전속도는 5500rpm 으로 설정하였고 viscous model 은 standard k- $\omega$  모델을 적용하여 unsteady-state 로 해석하였다. 그리고 앞에서 수행한 회전디스크의 틸팅 각운동 실험결과를 바탕으로 디스크를 강체로 가정하고 해석하였다. 또한 다음의 식(3)을 이용하여 디스크 면에서 발생하는 마찰토크를 구하였다.

$$T_{friction} = \int_r r \times \tau_{z\theta} \Big|_{z=h} dA \quad (3)$$

풍손은 디스크의 회전 속도를 고려하여 다음의 식(4)로 구하였다.

$$P_{windage} = T_{friction} \cdot \omega_{5500rpm} \quad (4)$$

Table 4 Comparison of experiment and simulation

	Experiment	Simulation	Error
Windage loss	0.872W	0.761W	12.7%

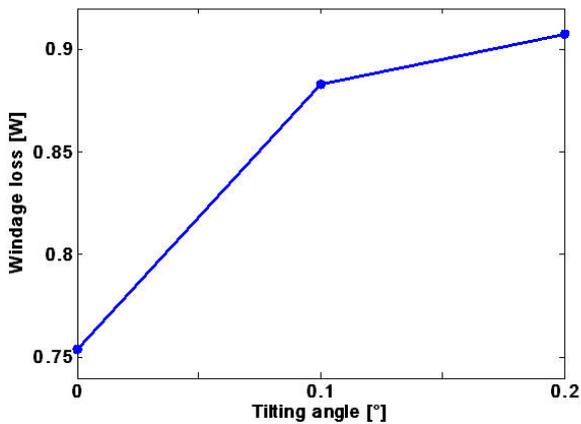


Fig. 7 Simulated results of the windage loss due to the tilting angle of the disc

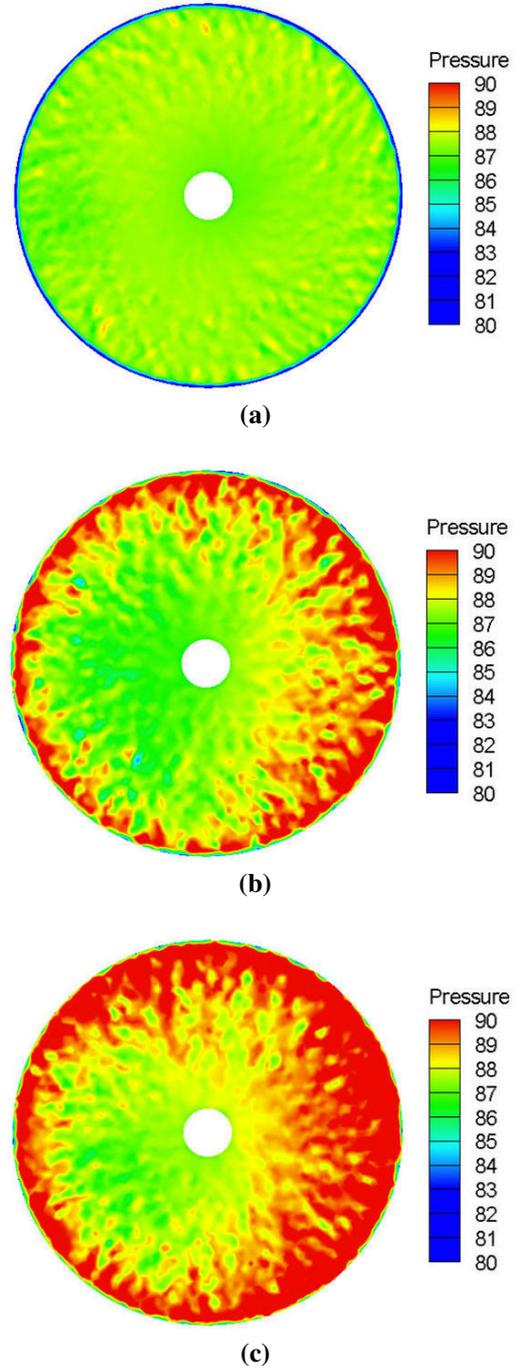


Fig. 8 Simulated pressure results of the rotating disk due to the tilting angle (a) 0, (b) 0.1 and (c) 0.2

해석 모델을 검증하기 위해 실험 결과 중 틸팅 각이 0.04°인 경우에 대하여 풍손(60.2%)을 구하였다. Table 4 는 틸팅 각이 0.04°에서의 풍손 해석 결과와 실험결과를 나타낸다. 두 결과의 오차가 12.7%로 해석모델이 합리적임을 보여준다.

4.2 해석 결과

Fig. 7 은 디스크의 틸팅 각을 0°~0.2°까지 0.1°씩 증가시킴에 따른 풍손과 마찰 토크 값을 나타낸다. 회전 디스크의 틸팅 각이 증가함에 따라 디스크 면에서의 전단응력(shear stress)이 증가하고 그로 인해 마찰토크와 풍손이 증가함을 확인하였다. 디스크의 전단응력은 다음의 식(5)과 같이 속도항과 압력구배항과 난류항(6)의 합으로 나타낸다.

$$\tau = \frac{h}{2} \frac{\partial p}{r \partial \theta} + \mu \frac{r \dot{\theta}}{h} + \tau_{turbulent} \quad (5)$$

$$\tau_{turbulent} = (\mu + E_v) \frac{dU}{dy} \quad (6)$$

Fig. 8 은 디스크의 틸팅 각에 따른 디스크 면에서의 압력을 나타내는데 디스크의 틸팅 각 운동에 의해서 디스크의 회전방향으로의 압력구배가 증가함을 보여준다. 이러한 디스크 면내에서의 압력구배가 전단응력을 증가시키고 풍손을 증가시키는 원인으로 작용함을 보여준다.

5. 결론

본 논문은 ODD 에서 사용되는 회전 디스크의 소모전력을 측정하고 손실별로 분류하여 풍손이 가장 큰 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 회전 디스크의 운동이 일정한 틸팅 각을 가지고 회전하는 강제운동이 지배적임을 실험적으로 확인하였고 틸팅 각을 증가시킬 수 있는 회전 디스크의 불평형 질량과 모터 회전부의 직각도에 따른 소모전력을 실험적으로 측정함으로써 틸팅 각의 증가가 소모전력을 증가시키는 것을 확인하였다. 또한 유체해석 프로그램인 FLUENT 를 이용하여 회전디스크 틸팅 각 운동에 따른 공기 유동을 해석하여 회전디스크의 틸팅 각운동이 디스크 면의 압력구배를 증가시킴으로써 마찰토크를 증가시키고 그로 인해 소모전력이 증가하는 것을 이론적으로 검증하였다.

참고문헌

[1] G. H. Jang and J. S. Park, 2005, “Development of a Highly Efficient Hard Disk Drive Spindle Motor with a Passive Magnetic Thrust Bearing and a

Hydrodynamic Journal Bearing”, *Journal of Applied Physics*, Vol.97, No.10, pp.10Q507-1 - 10Q507-3  
 [2] J. G. Kim, S. Y. Yang and D. H. Yoo, 2004, “Reduction of Skin Friction Aerodynamically Generated on a Rotating Disk”, *Proceedings of The Third National Congress on Fluids Engineering*, pp. 236~236  
 [3] K. Yasuda, T. Torii, T. Shimizu, 1992, “Self-excited Oscillations of a Circular Disk Rotating in Air”, *JSME International Journal, Series III*, Vol.35, No.3. pp. 347-352  
 [4] J. S. Lee and Y. C. Rhim, 2003, “An Experimental Study of Disc Warping in Slim-type Optical Disc Drive”, *Proceedings of the KSME 2003 Fall Annual Meeting*, pp.676-681  
 [5] G. H. Jang and S. H. Lee, 2006, “Determination of the Dynamic Coefficients of the Coupled Journal and Thrust Bearings by the Perturbation Method”, *Tribology Letters*, Vol. 22, No. 3, pp. 239-246  
 [6] G. Bertotti, A. Boglietti, M. Chiampi, D. Chiarabaglio, F. Fiorillo, M. Lazzari, 1991, “An Improved Estimation of Iron Losses in Rotating Electrical Machines”, *IEEE Transactions on Magnetic*, Vol.27, No.6, pp.5007-5009  
 [7] G. H. Jang, S. H. Oh, S. H. Lee, 2003, “Experimental Study on Whirling, Flying and Tilting Motions of a 3.5 in. FDB Spindle System”, *Tribology International*, Vol.38, Issue6-7, pp. 675-681