

유체동압베어링으로 지지되는 HDD의 장착각도에 따른 회전부의 특성해석

Characteristic Analysis of Rotor System due to the Positioning Angles of HDD Supported by Fluid Dynamic Bearings

황충만 † · 장건희 † · 이지훈* · 이민호*

Choongman Hwang, Gunhee Jang, Jihoon Lee, and Minho Lee

Key Words : HDD(하드디스크 드라이브), Fluid Dynamic Bearing(유체동압베어링), Equilibrium Position(평형 위치), Tilting Motion(틸팅 운동), Flying Motion(플라이 운동), Whirling Motion(휠링 운동), Eccentricity Ratio(편심율), 안정성(Stability), 마찰 토크(Friction Torque)

ABSTRACT

This research investigates experimentally and numerically the tilting angle, eccentricity ratio, flying height of axial direction, friction torque, and critical mass of the HDD disk-spindle system due to HDD positioning angle. The tilting angle and the eccentricity ratio are the maximum when the HDD positioning angle is 90° respect to horizontal position because the external force in radial direction and the torque applied to the rotating part are the maximum when the HDD positioning angle is 90°. The flying height increases with the increase of the HDD positioning angle because the direction of gravity applied to the rotating part changes. The friction torque increases with the increase of the HDD positioning angle until it becomes 60°, and decreases with the increase of the HDD positioning angle after it becomes 60°. The stability is the maximum when the HDD positioning angle is 90°.

기 호 설 명

d_{EP} : 무게 중심부터 틸팅 중심까지의 거리
 F_C : 원심력
 F_M : 자기력
 F_x : x 축 방향의 반력
 F_z : z 축 방향의 반력
 M_y^{mass} : 무게중심 기준의 반작용 모멘트
 $M_y^{tilting}$: 틸팅 중심 기준의 반작용 모멘트
 p : 압력
 W : 회전체의 무게

W_{im} : 불평형질량의 무게
 z : 축 좌표
 z_0 : 축 좌표의 원점
 α : 스러스트 부하의 방향을 나타내는 index
 ϕ : HDD 장착 자세의 각도

1. 서 론

HDD(Hard Disk Drive) 디스크 스피들 시스템을 지지하는 유체동압베어링(Fluid Dynamic Bearings, FDBs)은 회전축의 반경 방향 하중을 지지하는 저널 베어링과 축 방향 하중을 지지하는 스러스트 베어링으로 구성되어 있으며

† 교신저자; 정회원, 한양대학교 대학원 융합기계공학과
E-mail : ghjang@hanyang.ac.kr
Tel : (02) 2220-1729, Fax : (02) 2292-3406

‡ 발표자; 한양대학교 차세대전력변환시스템공학과
* 한양대학교 대학원 융합기계공학과

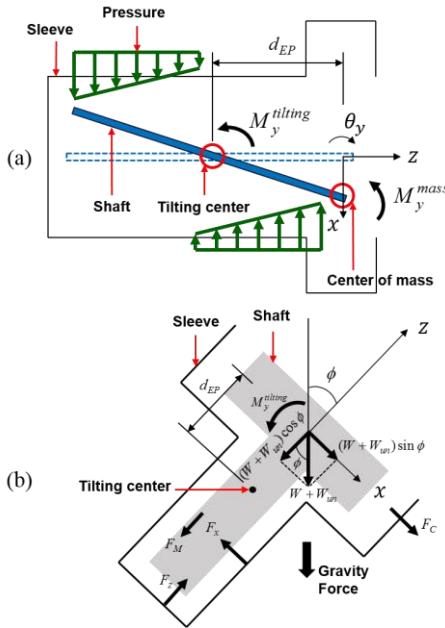


Fig.1 (a) Reaction moments respect to mass center and tilting center, (b) free body diagram of the shaft in FDBs

유체유회를 통해 회전부와 고정부의 고체 접촉을 방지한다. 유체동압베어링의 정·동특성은 HDD의 작동 조건에 의해 결정 되는데, 최근에 노트북, 외장 HDD와 도킹 스테이션 등에 사용되는 HDD는 사용자의 환경에 따라 다양한 장착 자세에서 구동하게 되므로 장착 자세에 따른 유체동압베어링의 정·동특성 해석이 요구 된다.

많은 연구자들이 HDD 디스크 스피들 시스템을 지지하는 유체동압베어링의 특성 해석을 위한 연구를 진행하였다. Jang과 Kim은⁽¹⁾ 5자유도를 고려한 HDD의 유체동압베어링의 동특성 계수 해석을 진행하였다. Kim 등은⁽²⁾ 유체동압베어링으로 지지되는 HDD 디스크 스피들 시스템의 5자유도 안정성 해석 방법을 개발하였다. 또한 Jang 등은⁽³⁾ 특정 자세에서 구동되는 HDD의 평형 위치에서의 전기기계식 변수들을 예측하고 부상높이와 편심율을 계산하였다. 하지만 평형 위치 해석을 할 때 유체동압베어링의 틸팅 운동을 고려하지 않아 반경 방향 병진 모션과 틸팅 모션을 동시에 고려한 정확한 평형 위치 해석이 필요하다. Oh 등은⁽⁴⁾ 유체동압베어링으로 지지되는 3.5" HDD spindle-system의 휠링, 플라잉, 그리고 틸팅 운동을 측정하였다. 하지만 HDD가 수평 자세로 장착되어 있는 경우에만 실험을 진행하였다.

본 논문에서는 다양한 장착 자세에서 작동되는 HDD의 유체동압베어링 평형 위치 해석을 수행하여 편심율, 틸팅 각, 축 방향 부상 높이, 그리고 마찰토크를 계산하였으며 Kim 등의⁽²⁾ 안정성 해석 방법을 사용하여 정상상태에서의 장착 자세 별 5자유도 안정성 해석을 수행하였다. 본 연구에서 제안한 장착 자세 별 해석 결과를 검증하고자 HDD 장착 자세 별로 회전부의 틸팅 각과 부상높이, 그리고 편심율 측정 실험을 수행하였다.

2. 해석 수행

2.1 해석 방법

유체동압베어링의 평형 위치 해석을 위한 반력과 반작용 모멘트의 식은 아래와 같다.

$$F_x = \int_J p \cos \theta' dA \quad (1)$$

$$M_y^{mass} = \int_J (z - z_0) p \cos \theta' dA + \int_T \alpha p r \cos \theta' dA \quad (2)$$

$$M_y^{tilting} = \int_J (z - z_0 + d_{EP}) p \cos \theta' dA + \int_T \alpha p r \cos \theta' dA \quad (3)$$

$$= M_y^{mass} + d_{EP} F_x = 0 + d_{EP} F_x$$

식(1)은 저널 베어링의 x 축 방향 반력이고, 식(2)와 (3)은 θ_y 축 방향의 무게중심 기준의 반작용 모멘트와 틸팅 중심의 반작용 모멘트이다. Figure 1(a)는 수직 자세로 장착된 HDD의 유체동압베어링이 외부하중에 의해 편심과 틸팅이 동시에 발생하였을 때 무게중심을 기준으로 한 M_y^{mass} 와 틸팅 중심을 기준으로 한 $M_y^{tilting}$ 를 나타내고 있다. 여기서 θ_y 방향의 M_y^{mass} 가 0이 되는 틸팅 중심이 평형 위치의 틸팅 중심이 되며 이때 무게중심에서의 알짜 토크는 0이 된다. 식(3)은 M_y^{mass} 가 0이 되는 평형 위치에서 F_x 와 d_{EP} 를 곱한 값은 평형 위치에서의 $M_y^{tilting}$ 값과 같음을 보여준다. 이를 통해 x 축 방향의 반력이 외부 하중만큼 작용하여 평형을 이룰 때 외부 하중에 의해 발생하는 토크와 $M_y^{tilting}$ 가 평형을 이루게 되어 틸팅 중심의 알짜 토크 값은 0이 된다.

Figure 1(b)는 HDD 장착 자세에서의 평형 위치 해석을 위한 자유물체도를 나타내며,

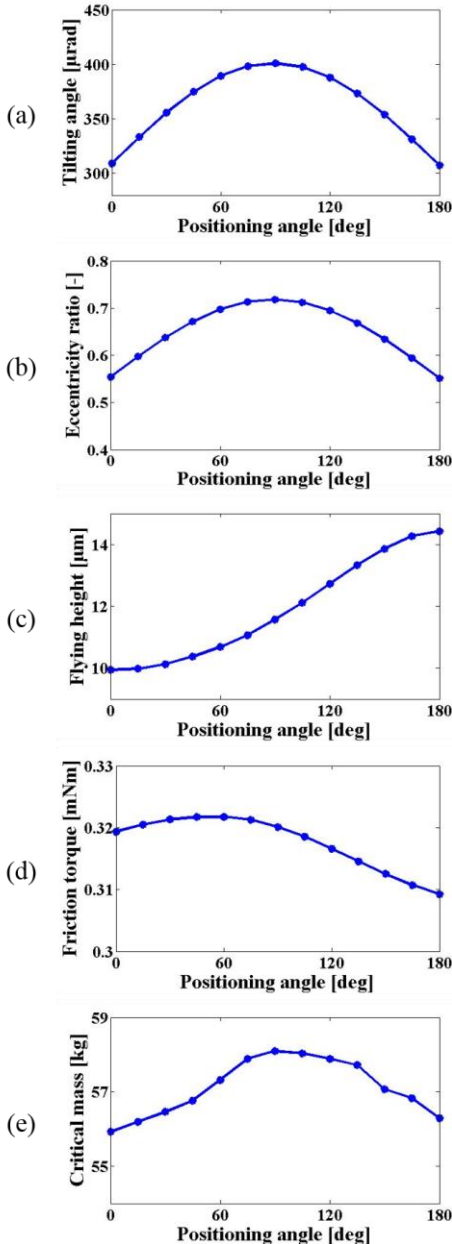


Fig.2 Effect of the position angle of HDD on (a) tilting angle, (b) eccentricity ratio, (c) flying height, (d) friction torque, and (e) critical mass

평형 위치를 만족하기 위한 조건식은 아래와 같다.

$$F_z + F_M + (W + W_{in}) \cos \phi = 0 \quad (4)$$

$$F_x + F_C + (W + W_{in}) \sin \phi = 0 \quad (5)$$

$$M_y^{tilting} + (F_C + (W + W_{in}) \sin \phi) d_{EP} = 0 \quad (6)$$

식(4)~(6)은 각각 z 축 방향, x 축 방향, 그리고 θ_y 축 방향에서의 평형 식을 보여주고 있다.

2.2 해석 모델

본 해석에 사용된 모델은 2.5-inch HDD에 사용되는 디스크 스핀들 시스템을 지지하는 유체동압베어링으로 회전속도, 점성, 그리고 회전체의 무게는 각각 5400 rpm, 0.0129 Pa·s, 0.206 N이다. 그리고 자기력과 원심력은 각각 0.794N, 1.126N이라 가정하였다. 원심력을 발생시키는 불평형 질량은 최대 발생한다는 가정 하에 최대 불평형 질량을 측정하여 계산하였다. 디스크 2장의 무게는 각각 5.863g, 6.031g이며 디스크 내경은 20.25mm, 허브 외경은 19.70mm이다. 따라서 발생 가능한 최대 편심거리는 0.275mm이고, 디스크 2장의 무게는 11.894g이므로, 최대 편심거리와 디스크 무게의 곱인 최대 불평형 질량은 3.52g·mm이다.

2.3 해석 결과

Figure 2는 HDD의 장착 자세 각을 수평 자세를 기준으로 0°부터 180°까지 15°간격으로 평형 위치에서의 자세 및 정·동특성 해석을 수행한 결과를 나타내고 있다. Figure 2(a)와 Figure 2(b)는 각각 장착 자세 각에 따른 틸팅 각과 편심율을 나타내며, 반경 방향의 외부하중과 회전체에 가해지는 토크가 장착 자세 각이 90°일 때 가장 크기 때문에 편심율과 틸팅 각은 90°에서 가장 큰 값을 갖는다. Figure 2(c)는 회전축 방향으로의 부상높이이며, 자세 각이 바뀔에 따라 회전체 무게가 z 축 방향으로 감소하고, x 축 방향으로 증가하여 회전축 방향의 하중이 감소하게 되고, 결과적으로 부상높이가 증가하게 된다. Figure 2(d)는 장착 자세 각에 따른 마찰토크이며 장착 자세 각이 60°일 때까지 증가하다가 60° 이후로는 감소되는 것을 나타낸다. 장착 자세 각 60°까지는 스러스트 베어링의 간극이 증가하고, 저널 베어링의 간극이 감소하는데 저널 베어링의 영향이 지배적이라 마찰토크가 증가하는 반면, 60° 이후로는 부상높이가 점차 증가함에 따라 스러스트 베어링의 간극은 지속적으로 증가하고, 저널 베어링의 간극은 반대로 증가하게 되어 결과적으로 마찰토크가 감소하게 된다. Figure 2(e)는

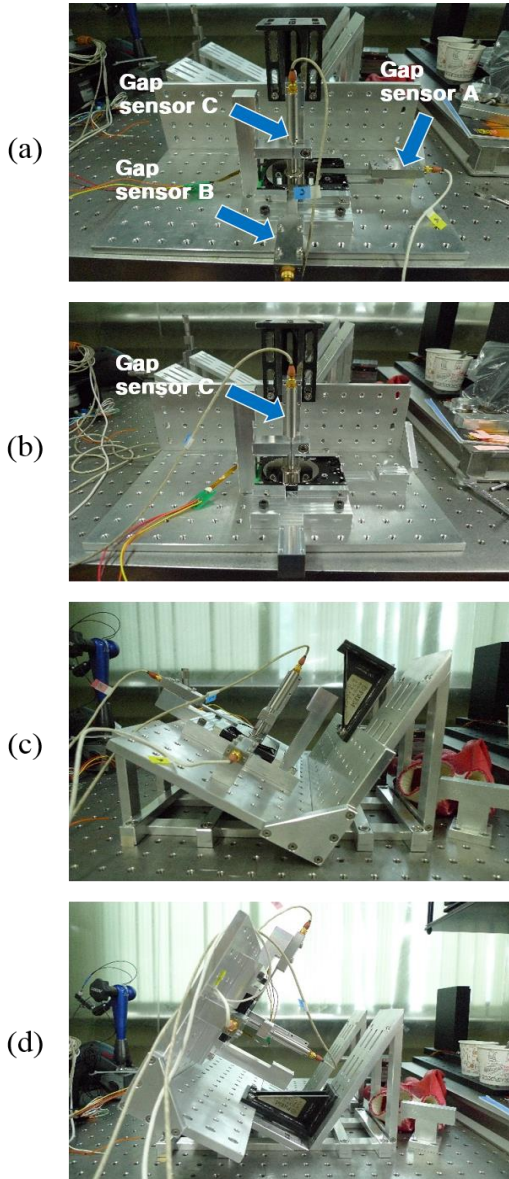


Fig.3 Experimental setup to measure; (a) tilting angle with HDD positioning angle of 0° , (b) flying height with HDD positioning angle of 0° , (c) tilting angle and flying height with HDD positioning angle of 30° , and (d) tilting angle and flying height with HDD positioning angle of 120°

HDD의 장착 자세 각에 따른 안정성 계수이며, 틸팅 각과 편심율이 최대인 장착 자세 각 90° 에서 안정성 계수는 최대이다. 정상상태에서의 해석이기 때문에 틸팅 각과 편심율이 크게 증가함에 따라 더욱 큰 유막 반력을 발생하게 되고 결과적으로 안정성이 증가된다.⁽²⁾

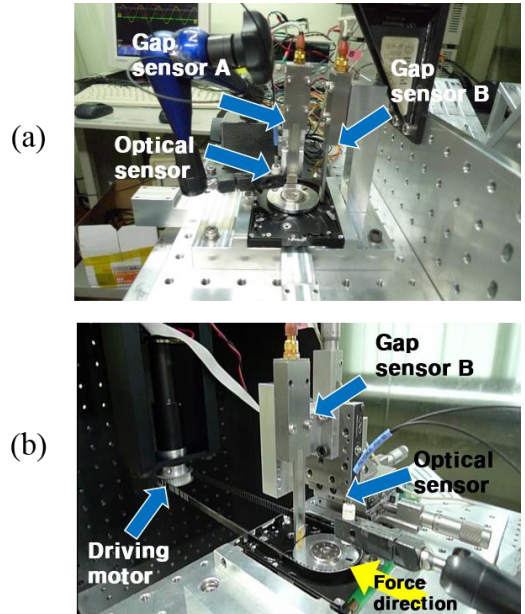


Fig.4 Experimental setup to measure; (a) eccentricity ratio, and (b) roundness of dummy disk

3. 실험 검증

3.1 실험 방법

HDD 장착 자세 별 해석 결과를 검증하기 위해 틸팅 각과 부상높이, 그리고 편심율 측정 실험을 장착 자세 각 0° 부터 180° 까지 30° 간격으로 변경하며 수행하였다. Figure 3(a)에서 나타내듯이 틸팅 각 측정을 위해 디스크 상부 정 중앙 clamp 위 부분의 축 방향 변위를 원통 형태의 gap sensor(gap sensor C)로 측정하였고 디스크 가장자리 부분의 블레이드 형태의 gap sensor(gap sensor A and B)를 90° 간격으로 장착해 축 방향 변위를 측정하였다. Figure 3(b)에서 나타내듯이 부상높이는 디스크 상부 정 중앙 clamp 위 부분의 축 방향 변위를 원통 형태의 gap sensor로 측정하였다. Figure 3(c)와 Figure 3(d)는 각각 HDD 장착자세 30° 와 120° 에서의 틸팅 각과 부상높이 측정 실험 구성을 나타낸다. Figure 4(a)는 HDD 장착 자세 별 편심율 측정을 위한 실험 구성을 나타낸다. 디스크의 반경 방향 변위를 측정하기 위해 dummy disk를 사용하였고, gap sensor A와 B는 90° 간격으로 장착해 dummy disk의 반경 방향 변위를 측정하였다. Dummy disk의 실제 휠 운동을 측정하기 위해서는 회전 시 dummy disk 반경 방향 변위를 측정할 결과값에 dummy disk의 진원도를 보정해야 한다. Dummy disk의 진

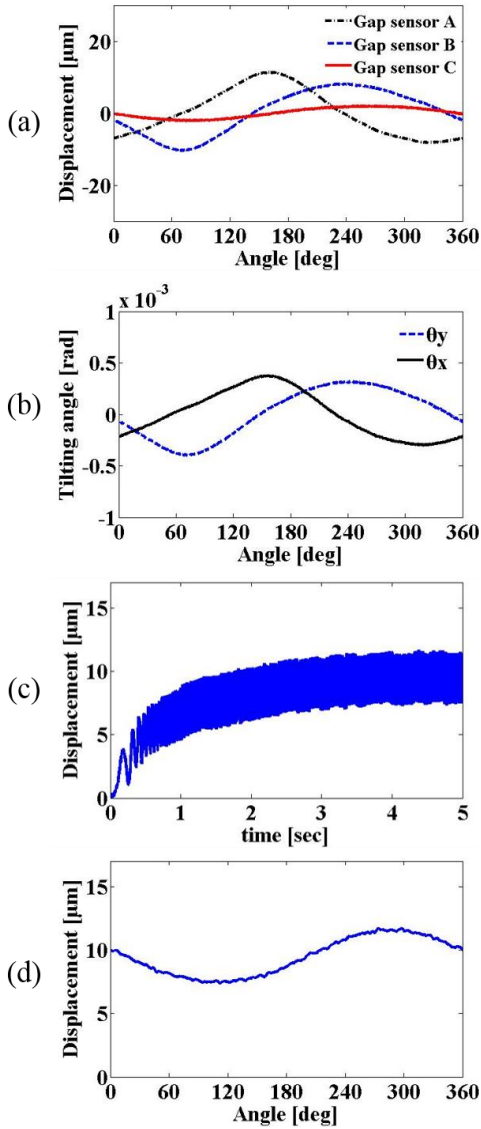


Fig.5 (a) Measured axial displacement, (b) tilting motion, (c) flying motion from the standstill, and (d) flying motion in HDD positioning angle of 0°

원도를 보정하기 위해 optical sensor를 사용해 위상을 측정하였다. 해석에서 최대 불평형 질량에 의해 발생하는 원심력을 계산하여 틸팅 각과 편심을 해석을 진행하였기 때문에 실험에서도 디스크의 편심을 최대화 하여 최대 불평형 질량이 발생하도록 하였다.

3.2 실험 결과

3.2.1 틸팅 각 측정

Table 1 Measured and simulated tilting angles due to the positioning angles of HDD

Positioning angle of HDD [°]	θ_y -direction tilting angle [rad]		Relative error (%)
	Measured	Simulated	
0	3.1973E-4	3.0924 E-4	3.28
30	3.3890 E-4	3.5569 E-4	4.95
60	3.4603 E-4	3.8935 E-4	12.52
90	3.4951 E-4	4.0097 E-4	14.72
120	3.4773 E-4	3.8790 E-4	11.55
150	3.4047 E-4	3.5390 E-4	3.94
180	3.2641 E-4	3.0743 E-4	5.81

Table 2 Measured and simulated flying heights due to the positioning angles of HDD

Positioning angle of HDD [°]	Flying height [μm]		Relative error (%)
	Measured	Simulated	
0	9.4262	9.9453	5.51
30	9.5491	10.1315	6.10
60	10.0724	10.6863	6.09
90	10.5836	11.5768	9.38
120	11.2371	12.7267	13.26
150	11.7979	13.8614	17.49
180	12.1378	14.4238	18.83

Figure 5(a)는 HDD 장착 자세 별 틸팅 각 계산을 하기 위한 디스크 상부 정 중앙과 가장자리 부분의 축 방향 변위 측정 결과이다. Figure 5(b)는 Figure 5(a)의 측정 결과를 이용해 계산한 틸팅 운동을 나타낸다. θ_x 축 방향의 틸팅 각은 gap sensor A와 gap sensor C의 축 방향 변위로 계산하고, gap sensor B와 gap sensor C의 축 방향 변위로 θ_y 축 방향의 틸팅 각을 계산하였다. 장착 자세 각이 증가할 때 회전체의 무게에 의한 토크가 발생하는 방향이 θ_y 축 방향이다. Gap sensor A와 B를 디스크 가장자리에 90° 간격으로 장착하여 측정하였기에 Figure 5(a)와 Figure 5(b)에서 gap sensor A와 B는 90°의 위상 차를 갖는 것을 나타낸다. Table 1은 HDD 장착 자세 별 θ_y 축 방향의 틸팅 각 해석 결과와 실험 결과를 비교한 것이다. 해석에서 틸팅 각이 90°에서 가장 큰 값을 가졌던 것처럼 실험 결과에서도 90°에서 틸팅 각이 최대이며, 이는 자세 각에 따른 틸팅 각의 해석과 측정 실험의 결과가 유사한 경향성을 갖는 것을 확인할 수 있다.

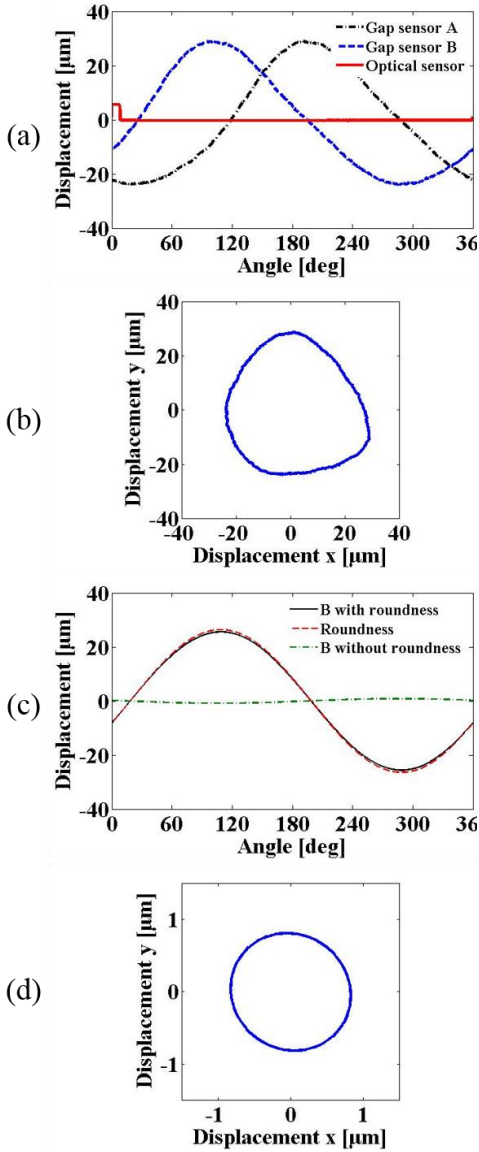


Fig.6 (a) Measured radial displacement, (b) whirling motion with roundness error, (c) compensated radial displacement without roundness error (gap sensor B), and (d) whirling motion without roundness error in HDD positioning angle of 0°

3.2.2 부상높이 측정

Figure 5(c)는 HDD 디스크 스피들 시스템 구동 전 초기위치에서부터 구동 후 정상상태에 도달할 때 까지 디스크 상부 정 중앙 축 방향 변위를 측정 한 결과이다. Figure 5(d)는 정상상태일 때의 디스크

Table 3 Measured and simulated eccentricity ratios due to the positioning angles of HDD

Positioning angle of HDD [$^\circ$]	Eccentricity ratio [μm]		Relative error(%)
	Measured	Simulated	
0	0.4055	0.4965	22.44
30	0.4969	0.5811	16.95
60	0.5757	0.6428	11.66
90	0.6492	0.6645	2.36
120	0.5619	0.6407	14.02
150	0.5413	0.5783	6.84
180	0.3341	0.4939	47.83

상부 정 중앙의 운동을 나타낸 것이다. Table 2는 HDD 장착 자세 별 부상높이 해석 결과와 실험 결과를 비교한 것이다. 해석에서 장착 자세 각이 증가할수록 부상높이가 지속적으로 증가하였던 것과 마찬가지로 실험 결과에서도 유사한 경향성을 갖는 것을 확인할 수 있다.

3.2.3 편심을 측정

편심을 측정 실험에서는 디스크의 반경 방향 변위를 측정하기 위해 dummy disk를 사용하였기 때문에 불평형질량을 별도로 측정하여 평형 위치에서의 자세 및 정·동특성 해석을 수행하였다. Dummy disk의 무게와 내경은 각각 13.450g, 20.17mm이며 hub 외경은 19.70mm이므로 최대 불평형 질량은 3.16g·mm이다. Figure 6(a)는 HDD 장착 자세 별 편심을 계산하기 위한 디스크 가장자리 부분의 반경 방향 변위 측정 결과이다. Gap sensor A는 y 축 방향의 변위를 측정하였고, gap sensor B는 x 축 방향의 변위를 측정하였다. 장착 자세 각이 증가할 때 회전체의 무게에 의한 힘이 가해지는 방향이 x 축 방향이다. Figure 6(b)는 gap sensor A와 B로 측정한 x와 y 축 방향의 변위를 이용하여 나타낸 휠 궤적이다. HDD 디스크 스피들 시스템이 회전할 때 측정된 휠 궤적은 dummy disk의 진원도를 포함하고 있기에 Figure 4(b)와 같이 실험장치를 구성하여 dummy disk의 진원도를 측정하였다. Dummy disk를 지속적으로 회전하는 driving motor에 벨트로 연결하여 한쪽 방향으로 힘을 가하며 저속 회전을 시켜 저널 베어링의 간극이 없는 상태로 dummy disk의 순수 진원도를 측정하였다. Figure 6(c)에서 나타내듯이 dummy disk가

회전 시 측정된 반경 방향 변위에 dummy disk의 진원도를 빼서 figure 6(d)와 같이 dummy disk의 진원도가 포함되지 않은 HDD 디스크 스피들 시스템의 순수 휠 궤적을 출력했다. Dummy disk가 회전 시 측정된 반경 방향 변위와 dummy disk의 진원도의 크기를 맞추기 위해 FFT 변환과 FFT 역변환을 하였고, FFT 역변환 과정에서 1 Hz 성분만 출력했기에 figure 6(b)와 같은 작은 진동 성분이나 찌그러지는 현상이 없게 된다. Table 3은 HDD 장착 자세 별 편심을 해석 결과와 실험 결과를 비교한 것이다. 해석에서 편심이 90°에서 가장 큰 값을 가졌던 것처럼 실험 결과에서도 같은 경향성을 갖는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문은 HDD 디스크 스피들 시스템의 틸팅 각, 편심율, 부상높이, 마찰토크, 그리고 안정성 계수가 HDD 장착 자세 별로 변한다는 것을 해석을 통해 확인하였고, 실험을 통해 틸팅 각, 편심율, 그리고 부상높이의 해석결과를 검증하였다. 장착 자세 각이 90°일 때 반경 방향의 외부하중과 회전체에 가해지는 토크가 가장 크기 때문에 편심율과 틸팅 각은 90°에서 가장 큰 값을 갖는다. 장착 자세 각이 증가할수록 회전체에 가해지는 중력의 방향이 바뀌게 되어 부상높이는 증가하게 된다. 마찰토크는 장착 자세 각 60° 부근까지는 저널 베어링의 간극이 줄어드는 현상 때문에 증가하다가 60° 이후로는 스톱 베어링의 간극이 크게 증가되면서 감소하게 된다. 정상상태에서의 해석을 수행하였기 때문에 틸팅 각과 편심율이 최대인 장착 자세 각에서 큰 유막 반력을 발생하게 되고 결과적으로 안정성이 증가된다.

참 고 문 헌

(1) Jang, G. H. and Kim, Y. J., 1999, Calculation of dynamic coefficients in a hydrodynamic bearing considering five degrees of freedom for a general rotor-bearing system, *Journal of Tribology*, Vol. 121, pp. 499-505

(2) Kim, M. G., Jang, G. H. and Kim, H. W., 2010, Stability analysis of a disk-spindle system supported by coupled journal and thrust bearings considering five degrees of freedom, *Tribology International*, Vol. 43, Issue 8, pp. 1479-1490

(3) Jang, G. H., Park, S. J., Kim, C. S. and Han, J. H., 2007, Investigation of the electromechanical variables of the spindle motor and the actuator of a HDD due to positioning and free fall, *Microsystem Technologies*, Vol. 13, No. 8-10, pp. 797-809

(4) Oh, S. H., Lee, S. H., Jang, G. H., 2005, Experimental study on the whirling, tilting and flying motion of the FDB spindle system of a 3.5" HDD, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 39-45