

3.5인치 FDB 스피들 시스템의 Whirling, Tilting, Flying motion에 관한 연구

A Study on Whirling, Tilting, Flying motion of 3.5 inch FDB spindle system

오 승 혁*·이 상 훈**·장 건 희***
Seung-Hyuk Oh, Sang-Hoon Lee, Gun-Hee Jang

Key Words : Fluid dynamic bearing(유체 동압 베어링, FDB), Whirling motion(반경방향 운동), Tilting motion(각운동), Flying motion(부상운동), Load capacity(유막반력), Eccentricity(편심), TIR(총 런아웃), RRO(주기적인 런아웃), NRRO(비 주기적인 런아웃), Clearance(간극), Form error(형상 오차)

ABSTRACT

This paper investigates the whirling, tilting and flying motion of a HDD spindle system supported by FDB experimentally. Experimental setup is built to measure the flying, whirling and tilting motion of the HDD spindle system, and three capacitance probes fixed on the xyz-micrometers measure the displacement of a HDD spindle system in the xyz-directions. This research shows that the tilting and whirling motion is mostly dependent on the centrifugal force and the gyroscopic moment due to the unbalanced mass of a HDD spindle. It also shows that the rotating HDD spindle starts to float to the equilibrium position in the z-direction until the weight of the rotating spindle is equal to the supporting pressure generated in the upper and lower thrust bearing.

1. 서 론

최근 컴퓨터 산업의 급속한 발전으로 인하여 각종 디지털 기기와 고 사양의 PC가 대중화 됨에 따라 더욱 빠르고 안정적인 고용량의 저장매체 개발을 요구하고 있다. 이러한 요구에 따라 산업계에서도 HDD, CD, flash memory 등 저장매체의 고속화, 고용량화, 저소음화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 대표적인 저장 매체인 HDD의 경우 기존의 볼 베어링 구조를 유체베어링으로 대체하여 고속화에 수반되는 진동문제를 해결하려는 연구가 진행되고 있다. 유체베어링은 볼 베어링과 달리 고체 간 직접적인 접촉이 없기 때문에 저소음 구동이 가능하며 점성유체가 갖는 감쇠효과에 의해 고유진동과 강제진동 특성 향상 등의 이점이 있다.

최근 FDB 스피들 모터는 일반적으로 Fig. 1과 같이 Rotating-shaft-type으로 회전체를 2개의 저널

베어링과 2개의 스러스트 베어링이 지지하고 있는 구조로 되어있다. 저널 베어링은 반경방향 하중을 지지하며 스러스트 베어링은 축 방향의 하중을 지지한다. 저널 베어링에는 빗살무늬형상의 홈이 주로 사용되며 스러스트 베어링에는 빗살무늬형상 또는 나선형의 홈이 사용된다.

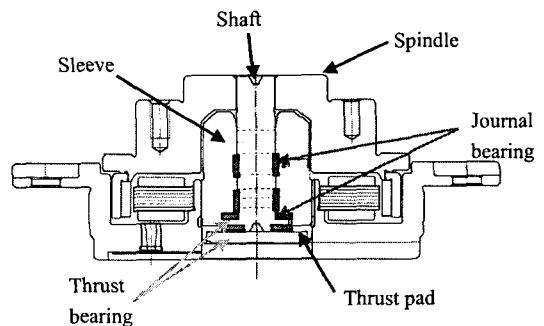


Fig. 1 Schematic of FDB spindle system

스피들의 거동은 회전 시 발생하는 저널베어링의 유막 반력과 불평형 질량에 의한 원심력의 합력에 의해 발생하는 XY 평면상의 운동과 상하 저널 베어링의 불균형 및 무게 중심의 기하학적 불균형에 의한 각 운동, 스러스트 베어링에 의해 발생하는

* 한양대학교 정밀기계공학과 대학원
E-mail : ohsoong@lycos.co.kr
Tel : (02) 2290-1729, Fax : (02) 2290-1729
** 한양대학교 정밀기계공학과 대학원
*** 한양대학교 정밀기계공학과 대학원

유막 반력과 자중에 의한 합력에 의해 나타나는 Z 방향 운동으로 나뉘 수 있다. 여기서 XY 평면상의 운동을 Whirling, 스펀들이 기울어져 회전하는 것을 Tilting, Z 방향의 운동을 Flying motion으로 정의한다.

지금까지 유체베어링에 관한 연구는 주로 해석적인 방법을 통하여 진행되었다. FEM이나 FVM 등과 같은 수치 해법을 이용하여 유체 베어링의 지배방정식인 Reynold's equation을 해석하여 유체 베어링의 부하용량, 자세각, 마찰 토크 등 정적 특성을 연구하고 Perturbation method를 통해 유체 베어링 강성 및 감쇠계수 등을 구하여 동특성을 해석하는 연구가 수행되었다. G. H. Jang과 Y. J. Kim은 이를 이용하여 5자유도 운동에 관한 유체베어링의 동특성 계수를 해석하였고,⁽¹⁾ G. H. Jang과 J. W. Yoon은 groove의 위치에 따른 FDB 스펀들 모터의 동특성을 수치적 방법으로 해석하였다.⁽²⁾ 그러나 실험적인 거동에 관한 연구는 측정면의 불균일과 변위의 미소함, 베어링 내 저널의 위치 예측의 어려움 등으로 인하여 그 연구가 미진한 상태이다.

본 연구에서는 FDB로 지지되는 HDD 회전체의 거동을 Whirling, Tilting 과 Flying으로 구분하고 변위를 측정하였으며 측정부위의 형상을 고려한 실제 Whirling과 Tilting, Flying motion을 해석하였고 속도 및 불평형 질량의 변화에 따른 회전체 거동의 변화를 실험을 통하여 규명하였다.

2. 실험

2.1 실험 개요

본 연구는 정격속도 7200RPM으로 작동되는 3.5인치 FDB 스펀들 시스템의 거동을 실험적으로 해석하였다. 실험 대상의 스펀들 모터의 저널 베어링의 간극은 $2.5\mu\text{m}$ 이며 스러스트 베어링의 간극은 $18\mu\text{m}$ 이다. 스펀들의 회전 방향은 시계 반대 방향이고 스펀들 부의 질량은 17.0g이며 무게중심은 저널 베어링 Span센터와 상부 저널 베어링 사이에 있다. Table 1은 실험에 사용된 FDB스핀들의 주요 부품의 제원을 나타내었다. Whirling motion 측정에는 측정면과 동일한 위치에서의 형상을 측정하기 위하여 스페이서 두개인 A type을 사용하며 스페이서의 무게는 제원에 나온 바와 같다. Tilting 과 Flying motion 측정의 경우는 B type을, Flying motion 측정의 디스크 두 장 실험에 대하여는 C type을 사용하였다. Whirling과 Tilting, Flying motion에 대한 변위 실험은 디스크 1장을 장착하여 불평

Table 1 Specification of main parts of FDB spindle system

Main parts	Mass(g)	Usage
Disk	23.05	1
Spacer	A type	Whirling motion test
	B type	Tilting, Flying motion Test
	C type	Flying motion test with 2 disks
Clamp	1.87	
Bolt	0.17	4
Ball	0.33	Unbalance mass

형 질량 $23 \times 0.022(\text{g} \cdot \text{mm})$ 이 주어진 경우를 측정(이하 case1)하고 이에 불평형 질량을 가하기 위한 볼 하나를 장착하여 $0.333 \times 25(\text{g} \cdot \text{mm})$ 의 불평형 질량을 준 경우(이하 case2)와 두개를 장착하여 $0.666 \times 25(\text{g} \cdot \text{mm})$ 의 불평형 질량을 준 경우(이하 case3)에 대하여 실험하였으며 각각의 경우를 속도 3600RPM과 5400RPM, 7200RPM으로 구동하여 실험을 수행하였다. Flying motion의 실험은 디스크 2장을 장착하여 하중 변화에 따른 부상 높이도 측정하였다. 각 실험은 5회 이상 반복 실험하여 그 측정값을 평균하여 신뢰성을 확보하였다.

Fig. 2는 3개의 정전용량 Gap sensor를 사용하여 XYZ 방향의 변위를 측정하는 실험장치의 사진이다. Whirling motion 변위측정은 2개의 센서를 사용하여 스펀들 측면의 동일한 높이에서 XY방향 변위를 측정하였다. Tilting motion은 스펀들 상부의 정 중앙으로부터 6mm 떨어진 원주 상의 120도의 위상차를 갖는 세 점에서 세 개의 센서를 사용하여 Z 방향 변위를 측정하고 각각의 변위와 위상차를 비교함으로써 측정하였다. Flying motion은 스펀들 상부 중앙에 평편한 캡을 씌우고 중심에서 Z 방향 변위를 측정하며 정지 시부터 속도가 정상상태에 이르는 10초간을 측정하였다.

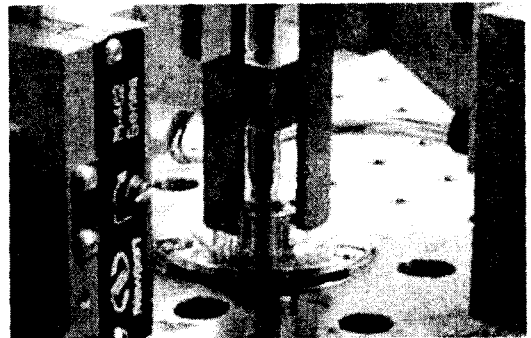
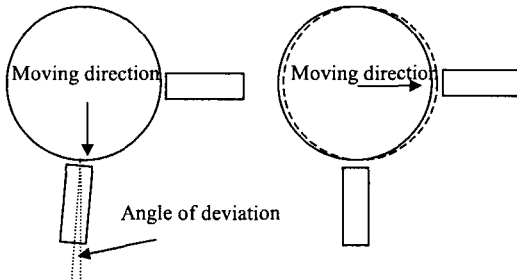


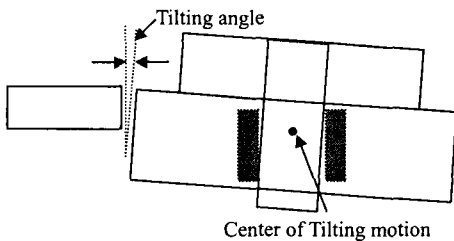
Fig. 2 Experimental setup of sensors

2.2 실험 오차

실험에 포함되는 오차는 측정상 오차와 조립 가공 오차로 구분된다. 측정 오차는 Fig. 3(a)와 같이 X 센서와 Y센서가 90도를 이루지 못하여 수반될 편각에 의한 오차와 (b)와 같이 센서와 직각 방향의 Whirling motion이 발생할 때 측정면의 곡률에 의해 움직이지 않는 방향으로 측정되는 오차, (c)와 같이 Tilting 중심과 다른 높이에 센서가 위치하여 Tilting motion에 의해 X, Y 방향으로 발생하는 오차가 있다.



(a) Error due to the wrong disposition of sensors (b) Error due to whirling motion



(c) Error due to Tilting motion

Fig. 3 Expected measurement error

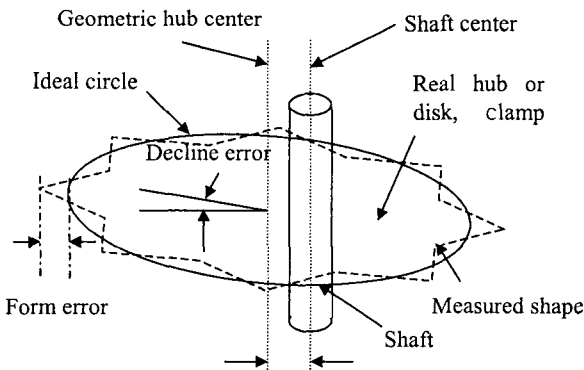


Fig. 4 Expected assembling and machining error

센서 편각에 의한 오차는 편각이 1도 일 때 측정방향의 $1\mu\text{m}$ 의 변위에 대하여 0.152nm 의 오차를 수반하며, Whirling motion에 의한 오차는 스퍼들이 X축 방향으로 $1\mu\text{m}$ 움직일 때 Y축 방향으로 0.04nm 의 오차를 수반한다. 최대로 일어날 수 있는 Tilting은 베어링 상하부의 높이차와 베어링 간극으로부터 0.047 도로 계산되며 이때 발생하는 X, Y센서의 오차는 4.34nm 이다. 따라서 측정 오차는 실험 값에 비하여 매우 작으므로 무시할 수 있다. 조립 가공상 오차는 Fig. 4와 같이 조립 시 허브와 축의 기하학적 중심이 다른 상태로 결합되어 생겨난 편심과 허브와 축이 직각으로 조립 되지 못하여 생겨난 기울어짐 각, 허브 표면 가공 시 생겨난 형상 오차를 고려할 수 있으며 표면 거칠기는 측정 시 평균값을 취하므로 무시할 수 있다. 조립 가공상 오차는 회전주기와 동일한 주기를 가지고 발생되며, 이의 크기가 변위 측정에 있어서 어느 정도의 크기를 가지는지 측정하여 이를 고려한 궤적측정이 이루어져야 한다.

2.2.1 허브 형상 측정

다음 Fig. 5는 스페이서 옆면의 형상을 측정하기 위한 장치이다. 스페이서 형상 측정은 임의의 일정한 하중을 X방향으로 가하여 저널과 축의 평균 접촉면이 일정하다고 가정하고 Precision rotation stage로 1회전을 64섹터로 분할하여 섹터 간 간격을 5.625 도로 하여 측정하였다. 측정위치는 허브 상부로부터 1mm 아래의 점으로 Whirling 변위 측정 위치와 동일하다. Precision rotation stage는 $1/60$ 도의 정밀도를 가지며 오차는 약 0.01 도이다.

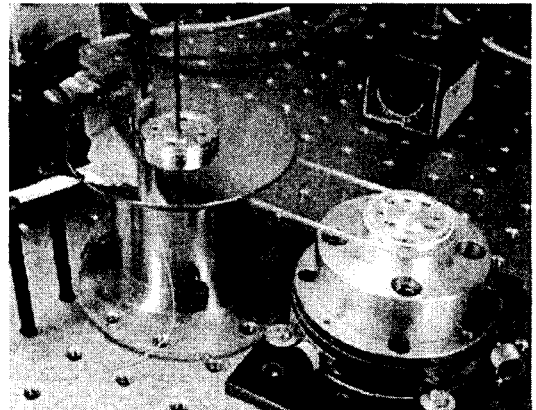


Fig. 5 Experimental setup to measure the circumferential shape of spacer

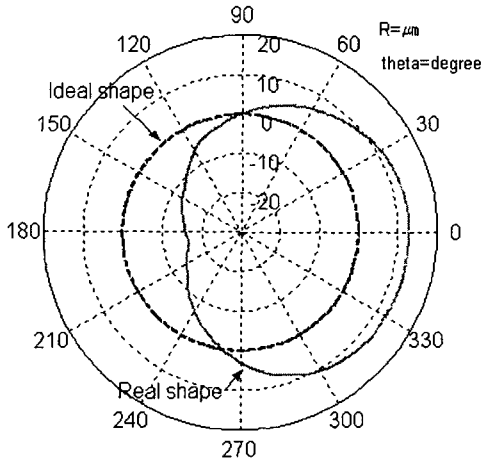


Fig. 6 Circumferential shape of a hub

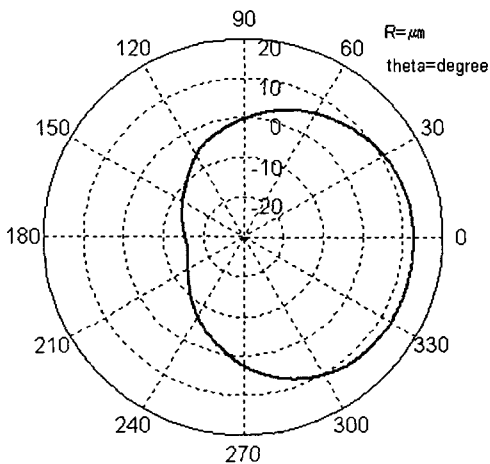


Fig. 7 Polar plot of X displacement of a hub

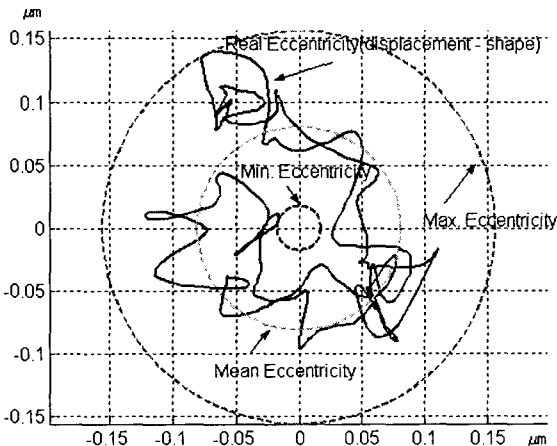


Fig. 8 Whirling motion considering the circumferential shape of hub

Fig. 6은 허브의 옆면을 측정된 것으로 $0\mu\text{m}$ 은 허브의 설계상 반지름이다. 위 그림에서 허브의 기하학적 중심이 축 중심과 일치하지 않으며 형상오차 또한 고르지 못한 것을 알 수 있고 그 오차의 크기는 $+13.54 \sim -15.819\mu\text{m}$ 이다.

2.3 실험

2.3.1 Whirling motion

Whirling motion을 속도 변화와 불평형 질량 변화에 대하여 측정하였다. Fig. 7는 7200RPM에서 불평형 질량이 없는 경우의 X축에서의 변위 측정값을 극좌표계로 나타낸 것이다. Fig. 6과 7에서 보듯이 변위 측정값에 허브의 형상이 큰 오차로 포함되어 있는 것을 확인할 수 있다. 따라서 측정 변위에서 허브 형상을 빼어야 실제 Whirling motion의 궤적이라 할 수 있다. 변위 측정값은 회전 당 512개의 좌표 값을 가지고 형상은 64개의 좌표 값을 가진다. 형상측정결과를 Spline 보간법을 사용하여 512개의 좌표 값으로 보간하고 초기 위치를 동일하게 하여 측정 값에서 빼면 실제 Whirling motion에 가까운 값을 구할 수 있으며 이를 나타내면 Fig. 8과 같은 결과를 얻는다.

위 결과에서 실제 궤적은 형상 측정 시 발생하는 오차와 Spline 보간에 있어서의 오차, 초기위치 보정 시에 발생하는 오차를 수반한다. 따라서 최소값과 최대값은 실제 Whirling motion과 차이가 크고 평균값은 실제와 유사할 것이다. 각 실험 조건에 따른 결과에서 실제 Whirling motion의 크기를 구한 값을 Table 2에 나타내었다. Table 2의 결과를 실험 조건에 따라 분류하여 나타내면 다음 그림과 같은 경향을 보인다.

Table 2 Experimental result of Whirling motion (nm)

Experimental cases		Eccentricity	
		Mean	Maximum
3600	Case1	68.7	165.7
	Case2	87.9	156.8
	Case3	117.5	245.7
5400	Case1	78.6	154.6
	Case2	97.4	169.5
	Case3	156.5	321.3
7200	Case1	80.6	155.9
	Case2	117.3	210.5
	Case3	193.6	401.1

Fig. 9는 동일한 불평형 질량이 주어진 경우의 속도 변화에 따른 평균 Whirling motion의 궤적을 도식한 것이다. 불평형 질량이 일정할 경우 속도에 따라 증가 하는 추세를 보이는 것을 확인할 수 있다. Fig. 10은 일정 속도에서 불평형 질량이 증가할 경우의 평균 궤적 크기의 변화를 나타낸 것이다. 동일한 속도의 경우 불평형 질량이 증가함에 따라 궤적이 증가함을 확인할 수 있다. 두 결과를 비교하여 보면 속도에 의한 Whirling motion의 증가 폭보다 불평형 질량에 의한 Whirling motion의 증가 폭이 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

2.3.2. Tilting motion

Tilting motion을 관찰하기 위해 허브 상부의 120도

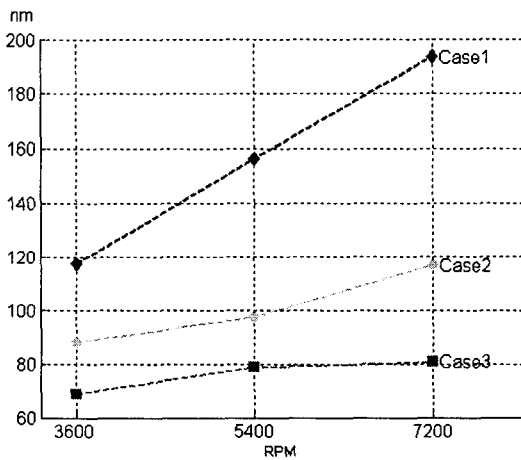


Fig. 9 Whirling motion due to the variation of speed

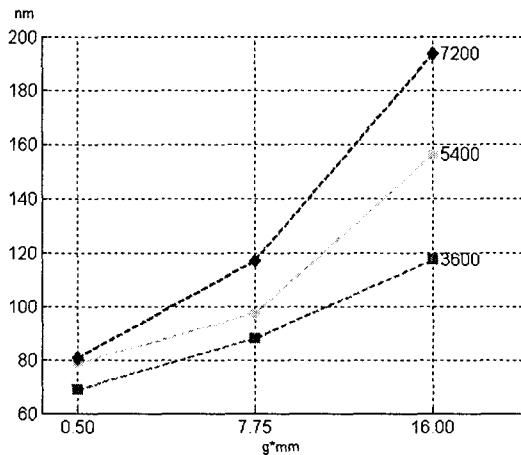


Fig. 10 Whirling motion due to the variation of mass unbalance

의 위상차를 갖는 세 점의 변위를 측정하였고 센서는 시계방향으로 A, B, C 순으로 장치하였다. Fig. 11은 7200RPM에서 불평형 질량이 없는 경우 세 센서에서 측정된 변위와 그의 평균값을 나타낸 것으로 평균값은 허브의 중심에 가까운 값을 의미한다. 측정결과 회전수와 동일한 주기를 가지는 Tilting motion이 발행하며 스핀들 회전과 반대 방향으로 회전하는 것을 알 수 있다. 그 크기는 최대값과 최소값의 차이이다. Table 3은 속도변화와 불평형 질량 변화에 따라 측정된 변위로부터 양의 방향 및 음의 방향으로 발생할 수 있는 최대의 Tilting각을 구하여 표로 나타낸 것이다. Tilting motion의 추세를 알아보기 위하여 속도별, 불평형 질량별로 나누어 나타내면 Fig. 12, Fig. 13과 같다.

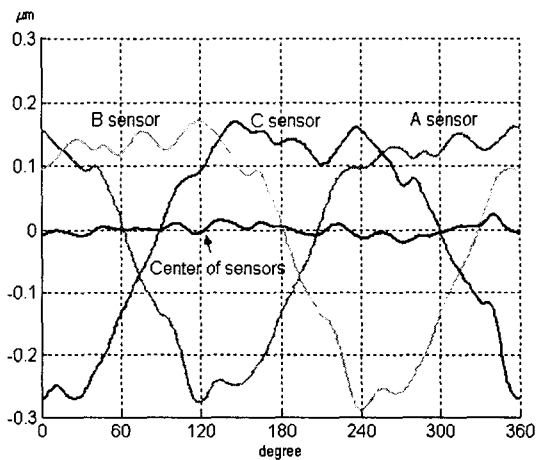


Fig. 11. Displacement of three points on the top of hub along Z axis

Table 3 Experimental Result of Tilting motion (degree)

Experimental cases	Minimum Tilting angle	Maximum Tilting angle	
3600	Case1	-2.569E-003	1.557E-003
	Case2	-3.438E-003	3.295E-003
	Case3	-7.573E-003	7.391E-003
5400	Case1	-2.359E-003	1.385E-003
	Case2	-6.303E-003	5.682E-003
	Case3	-12.010E-003	12.000E-003
7200	Case1	-2.225E-003	1.385E-003
	Case2	-8.442E-003	8.365E-003
	Case3	-17.045E-003	17.160E-003

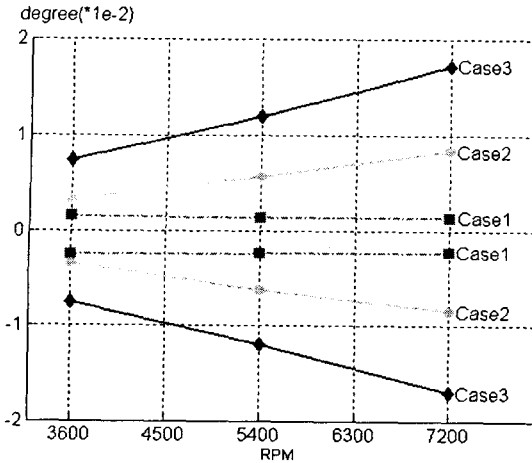


Fig. 12 Tilting motion due to the variation of speed

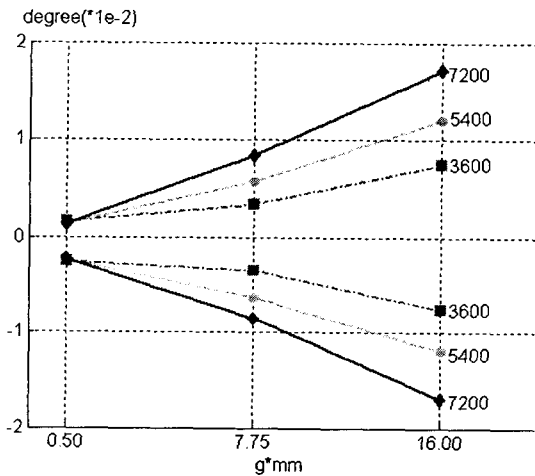


Fig. 13 Tilting motion due to the variation of mass unbalance

Fig. 12는 속도의 증가에 따른 Tilting motion의 변화를 나타낸 것이다. 한 회전에 대한 Tilting motion은 음의 최대값과 양의 최대값 범위 안에서 Z 방향으로 진동하는 것을 나타낸다. 실험 결과로 불평형 질량이 거의 없는 디스크의 경우 속도의 증가에 따라 기울기의 변화가 거의 없으며 불평형 질량이 있는 경우는 속도에 비례하여 증가하는 것을 확인 할 수 있다. Fig. 13은 불평형 질량 증가에 따른 Tilting motion의 크기 변화를 도식한 것이다. 불평형 질량이 커짐에 따라 Tilting의 기울기가 커짐을 확인 할 수 있다.

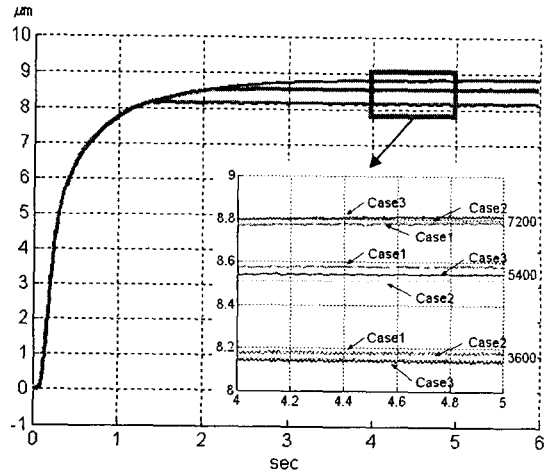


Fig. 14 Flying height due to the variation of rotating speed and mass unbalance in case of 1 disk

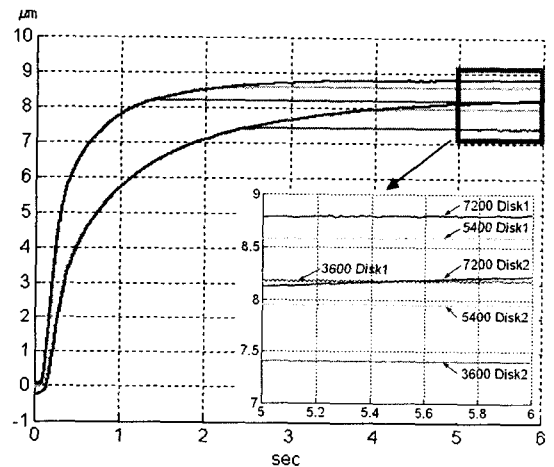


Fig. 15 Flying height due to the variation of rotating speed and axial load

2.3.3. Flying motion

Flying motion은 허브 정 중량의 Z 방향 변위를 정지 시부터 정상상태까지 5ms sampling time으로 10초간 측정하였다. Fig. 14는 속도 및 불평형 질량에 따른 부상 높이 하중 변화에 따른 과도상태의 부상높이를 0초부터 6초까지 도식한 것으로 6초에 각 실험 조건에서의 부상 높이가 모두 정상상태에 도달하는 것을 확인할 수 있다. 부상 높이는 속도에 의하여 발생하는 상 하부 스러스트 베어링의 반력과 스프링들의 하중에 의해 결정된다. 실험 결과로부터 부상높이는 속도의 증가에 따라 상승하는 것을 알 수 있다. 이는 속도에 따른 하부 스러스트 베어링 반력의 증가량이 상부 스러스트 베어링 반력의 증가량 보다 크다는 것을 나타낸다. 또한 속도 증가에 따른 부상 높이의 증가량이 작아

지는 것을 알 수 있다. 그 이유는 스�핀들이 부상함에 따라 하부 스러스트 베어링의 반력이 작아지며 이와 반대로 상부 스러스트 베어링의 반력이 커지기 때문이다. 이후 온도의 상승에 따라 그 높이가 서서히 증가하는 것은 베어링에서 발생하는 열에 의한 축의 열변형 때문으로 사료된다. 불평형 질량의 변화에 대한 부상 높이의 변화는 매우 미미하며 그 이유는 디스크-스핀들의 질량(40.05g)에 비하여 추가된 불평형 질량(0.33g, 0.66g)이 매우 작기 때문이다. 또한 불평형 질량에 의해 발생한 Tilting motion이 Flying motion에 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 보여 준다.

부상 높이를 결정하는 두 주요 요인인 속도와 하중에 대한 영향을 고찰하기 위하여 디스크 2장을 장착한 스�핀들의 부상 높이를 측정하여 디스크 1장을 장착하여 측정한 결과와 비교하였다.

Fig. 15는 속도 및 하중 변화에 따른 부상 높이를 나타낸 것이다. 동일한 하중의 경우 초기 구동 시에 각 작동속도에 도달할 때까지의 부상 높이 상승 곡선이 동일한 것은 초기 구동이 하중에 의해 결정되기 때문이다. 이후 앞 실험결과와 동일하게 작동속도에 의해 그 높이가 결정됨을 알 수 있다. Fig. 15에서 초기위치는 하중에 따라 상이하고 그 이유는 초기위치가 하중에 대한 정지 상태의 유막 반력에 의해 가라 앉은 높이가 다르기 때문이다. 이를 보정하기 위하여 정지상태의 허브에 디스크 1장과 2장을 장착한 경우에 대하여 Z방향 변위를 반복 측정하여 평균값을 구하였다. 그 값은 디스크가 1장 장착될 경우 $0.65\mu\text{m}$, 2장 장착될 경우 $0.90\mu\text{m}$ 이고 감소 폭을 초기위치 보정에 반영하였다.

3. 결 론

본 연구에서는 스�핀들의 거동이 일정 조건 정상 상태에서 동일하게 유지된다는 가정 하에 몇 가지 작동 조건에 대한 Whirling, Tilting, Flying motion을 측정하였고, 측정부의 형상을 고려한 보정을 통해 스�핀들의 실제 거동을 실험적으로 해석하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

(1) 스�핀들 회전 시 정상상태에서의 Whirling motion은 속도가 증가함에 따라, 불평형 질량이 증가함에 따라 그 궤적이 증가한다.

(2) 스�핀들 회전 시 정상상태에서의 Tilting motion은 회전 방향이 스�핀들 및 Whirling motion방

향과 같은 주기 반대방향이며 속도가 증가 함에 따라, 불평형 질량이 증가함에 따라 그 기울기가 커진다.

(3) Flying motion에 의한 부상높이는 속도가 증가함에 따라 높아지며 하중이 증가함에 따라 큰 폭으로 감소한다. 초기 구동 시 부상높이 상승곡선의 기울기는 하중에 의해 결정되며 속도에 따른 부상높이의 증가 폭은 감소한다

일레로 디스크 1장이 장착된 스�핀들 시스템의 동작 속도가 3600RPM에서 7200RPM까지 변할 때 Whirling motion의 궤적의 평균 반경은 68.7nm에서 80.6nm로 증가하며 Tilting motion은 $4.126 \times 10^{-3} \sim 4.610 \times 10^{-3}$ 도 증가하였으며 Flying motion의 증가량은 약 $0.6\mu\text{m}$ 이다.

기존의 불베어링을 장착한 HDD 스�핀들 시스템에서 불베어링의 기하학적 불균일성이 NRRO의 형태로 디스크 자기기록 밀도 향상을 저해하는 요소로 작용하였다. 그러나 FDB를 장착한 HDD 스�핀들 시스템에서는 기존의 불베어링을 장착한 HDD 스�핀들 시스템의 거동과는 다른 상당한 크기의 Whirling, Tilting, Flying motion이 존재하여 이들 운동은 RRO의 형태로 디스크의 자기 기록 밀도를 저해하는 요소로 작용한다. 따라서 이들 운동을 정확하게 측정하고 저감하는 연구가 향후 필요하리라 사료된다.

참고문헌

- (1) G.H. Jang, Y.J. Kim, 1999, "Calculation of Dynamic Coefficients in a Hydrodynamic Bearing Considering Five Degrees of Freedom for a General Rotor-Bearing System", ASME Journal of Tribology, Vol.121 No.3 pp.499~505
- (2) G.H. Jang, J.W. Yoon, 2002, "Dynamic characteristics of a coupled journal and thrust hydrodynamic bearing in a HDD spindle system due to its groove location", Microsystem Technologies, Vol.8, No.4-5 pp.261-270
- (3) Bernard J.Hamrock, 1994, Fundamentals of Fluid Film Lubrication, MacGraw-Hill Inc
- (4) Chong-Won Lee, 1993, Vibration Analysis of Rotors, Kluwer Academic Publisher