

3.5인치 HDD용 FDB스핀들 시스템의 휘링, 플라잉과 틸팅 거동에 관한 연구

Experimental Study on the Whirling, Tilting and Flying Motion of the FDB Spindle System of a 3.5" HDD

오 승 혁* · 이 상 훈* · 장 건 희**

S. H. Oh, S. H. Lee and G. H. Jang

(2004년 9월 3일 접수 : 2004년 12월 27일 심사완료)

Key Words : Fluid Dynamic Bearing(유체 동압 베어링), Whirling Motion(휘링 거동), Flying Motion(플라잉 거동), Tilting Motion(틸팅 거동), Repeatable Runout(RRO, 주기적 런아웃), Non-repeatable Runout(NRRO, 비주기적 런아웃)

ABSTRACT

This research develops an experimental method to measure the motion of a FDB spindle system with a 3.5" disk by using three capacitance probes fixed on the xyz-micrometers, and it shows that a FDB spindle system has the whirling, flying and tilting motion. It also shows that the whirling, flying and tilting motion converge very quickly to the steady state at the same time when the rotor reaches the steady-state speed. However, they are quite large even at the steady state when they are compared with the 10 nm flying height of a magnetic head. For the FDB spindle system used in this experiment, the whirl radius and the peak-to-peak variation of flying height and tilting angle at the steady-state speed of 7,200 rpm are $0.675 \mu\text{m}$, 30 nm and $5.758 \times 10^{-3}^\circ$, respectively, so that the radial motion of the FDB spindle system exceeds a track pitch of a 3.5" HDD with 90,000 TPI.

1. 서 론

최근, 컴퓨터 하드디스크 드라이브의 스핀들 시스템에서 발생하는 진동과 소음을 줄이기 위하여 볼 베어링이 유체베어링(FDB)으로 빠르게 바뀌고 있다. 2003년을 기준으로 3.5" HDD의 자기 저장밀도는 약 90,000 TPI(track per inch)이고 이 경우 트랙간 피치는 $0.28 \mu\text{m}$ 이다. 높은 트랙밀도를 만드는데 있어서 볼 베어링으로 지지되는 통상적인 스핀들 시스템은

볼과 레이스의 기하학적 불균형과 고체 간의 직접적인 접촉에 의한 높은 레벨의 진동, 특히 NRRO(non-repeatable runout)를 발생시켜 트랙밀도를 높이는 데 한계가 있다. FDB 스핀들의 주된 장점은 유체 윤활이 회전부와 정지부의 고체접촉을 방지하고 결과적으로 진동과 소음을 줄여줌으로써 자기 저장밀도를 높일 수 있다는 점이다.

Fig. 1은 두 개의 저널 베어링과 두 개의 스러스트 베어링으로 지지 되는 전형적인 FDB 스핀들 모터의 개략도이다. 저널 베어링은 회전하는 축 혹은 정지되어 있는 슬리브에 빗살무늬의 홈이 새겨 있고 스러스트 베어링은 회전하는 패드 혹은 정지되어 있는 패드에 나선형 또는 빗살무늬 홈이 음각 되어 있다. 나선형이나 빗살무늬 홈은 펌핑 효과를 만들어 내고 이는 유체의 측면 누설을 줄이는 역할을 한다. 저널과 스러

* 책임저자 : 정회원, 한양대학교 대학원 정밀기계공학과
E-mail : ohsoong@lycos.co.kr

Tel : (02) 2299-5685, Fax : (02) 2292-3406

* 정회원, 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

** 정회원, 한양대학교 기계공학부

스트 베어링의 윤활 유체가 주입되어 있는 간극 (clearance)은 각각 수 μm 과 수십 μm 이고 따라서 상대적으로 큰 RRO(repeatable runout)가 생겨날 가능성이 있어 경우에 따라 서보 제어에 의해 보상될 수 있는 한계를 넘을 수도 있다. 모터의 구동 시 회전부는 스러스트 베어링에 의해 발생하는 압력과 회전부의 하중이 일치하는 평형위치로 부상한다. 이러한 플라잉 거동과 더불어 FDB 스피들은 휘링과 틸팅 거동을 수반한다. 휘링 거동은 XY평면 상에서 회전부의 궤적을 말하며, 저널 베어링의 크기와 회전부의 원심력과 밀접한 관계가 있다. 틸팅 거동은 회전부가 회전축에 대하여 기울어져 회전하는 운동으로 정의하고 이는 저널과 스러스트 베어링의 위치와 로터의 원심력, 자이로스코픽 모멘트 등의 영향을 받는다.

HDD용 FDB 스피들 시스템의 동적 운동은 매우 작고, 정교한 실험장치를 요구하기 때문에 이를 실험적으로 연구한 것은 매우 적다. Bouchard et al⁽¹⁾은 볼 베어링과 유체베어링을 장착한 스피들의 NRRO를 비교하였고 유체베어링의 스피들이 낮은 NRRO를 발생함을 보여주었다. 그러나 이는 NRRO에 초점을 맞추었고 HDD 스피들 시스템의 동적 움직임을 해석하지 않았다. 최근 소수의 연구자는 FDB 스피들 시스템의 동특성을 수치해법을 통하여 연구하였다. Jang and Kim⁽²⁾은 일반적 유체 베어링의 강성과 감쇠 계

수를 5자유도에 대하여 수치적으로 계산하는 방법을 제시하였다. Jang and Yoon^(3,4)은 회전 혹은 정지상태의 빗살무늬 홈의 영향을 고려하여 저널베어링의 동적 거동을 수치적으로 조사하였다. 또한 FDB 스피들 시스템의 동특성을 저널과 스러스트를 연성하여 해석하였다. 그러나 FDB 스피들 시스템의 전체적인 동적 거동을 실험적으로 연구한 논문은 아직 보고되지 않았다.

이 논문에서는 FDB 스피들 시스템의 X, Y와 Z방향의 변위를 과도상태부터 정상상태까지 측정함으로써 FDB 스피들 시스템의 휘링, 플라잉과 틸팅 거동을 실험적으로 연구하였으며 또한 회전속도에 따른 FDB 스피들 시스템의 휘링, 플라잉과 틸팅 거동 변화에 대한 연구를 수행하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험 장치

Fig. 2는 디스크가 1장 장착된 FDB 스피들 시스템의 휘링, 플라잉과 틸팅 거동을 측정하기 위한 실험 장치이다. 휘링 거동은 스피들 시스템의 디스크 스페이스의 X와 Y 방향변위를 두개의 정전용량 검출 센서를 이용하여 측정함으로써 알 수 있다. 플라잉 거동은 FDB 스피들 허브 상부 중심의 축 방향 변위를 하나의 정전용량 검출 센서를 측정 함으로써 계산할 수 있다. 틸팅 각은 FDB 스피들 허브의 윗면 중심점과 디스크의 바깥 가장자리에서 90° 떨어진 두 점의 축 방향 변위를 측정 함으로써 결정할 수 있다. 광 센서

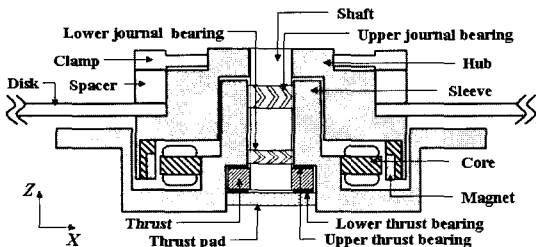


Fig. 1 Rotating-shaft type of a FDB spindle motor

Table 1 Major design specifications of a FDB spindle motor

Parts	Specification		
Journal bearing	Clearance	2.50	Herringbone groove
Thrust bearing	(μm)	9.00	Herringbone groove
Hub/shaft		17.00	1 hub / 1 shaft
Disk	Mass(g)	23.05	1 disk
Spacer		4.25	1 spacer
Clamp/bolt		2.55	1 clamp / 4 bolts

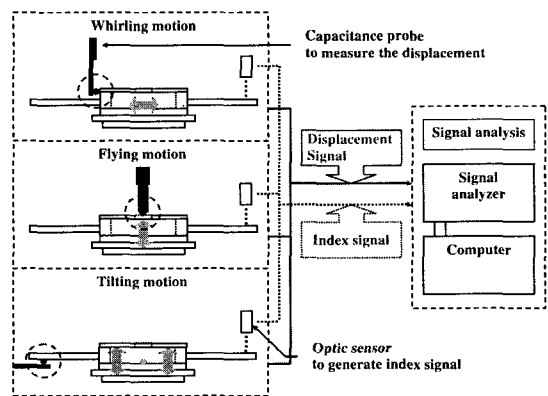


Fig. 2 Experimental setup to measure the whirling, flying and tilting motion of a FDB spindle system

는 회전에 따른 인덱스신호를 발생시키기 위해 사용되었으며 이는 회전속도를 결정하고 측정된 변위와 측정된 표면형상의 초기 위치를 일치시키기 위하여 사용되었다. Table 1에는 실험에 사용된 FDB 스핀들 시스템의 주요한 설계 특성을 나타내었다. FDB 스핀들 시스템의 휠링, 플라잉과 틸팅 거동은 디스크의 안쪽 직경과 허브의 바깥 직경사이의 공차에 의해 생기는 불평형 질량을 실험 조건으로 하여 측정하였다. 디스크의 안쪽 직경은 허브의 바깥 직경보다 다소 크며 그 차는 0.044 mm이다. 이때 생기는 불평형 질량의 최대 크기는 디스크의 안쪽면이 허브의 바깥면과 한 점에서 접촉할 때인 0.506 g·mm(23.05×0.022 g·mm)이다. FDB 스핀들 시스템의 거동측정은 정지상태부터 3,600, 5,400과 7,200 rpm의 속도에 이르는 정상상태까지 측정하였으며 스핀들의 회전 방향은 시계 반대 방향이다. Fig. 3은 각각의 속도 변화를 측정 한 것이다.

2.2 오차 해석

이 실험의 변위 측정 범위는 수 nm에서 수 μm로 실험 시 발생하는 오차의 영향을 고려하는 것은 매우 중요하다. 실험에 있어서 고려할 수 있는 오차는 측정 시 발생하는 측정오차와 측정대상의 가공 시 발생된 형상오차로 나눌 수 있다.

측정오차는 실험장치 설정 시 센서의 정밀하지 못한 위치 설정으로 발생한다. Fig. 4에 이 실험의 측정에서 발생할 수 있는 오차를 나타내었다. Fig. 4(a)는 센서의 중심이 회전부의 중심과 틸팅 각을 이룰 때 발생하는 오차이다. 이 실험에 있어서, 1°의 틸팅각은 FDB 스핀들 시스템이 측정 방향으로 1 μm 움직일 때 0.152 nm의 오차를 유발한다. Fig. 4(b)는 FDB

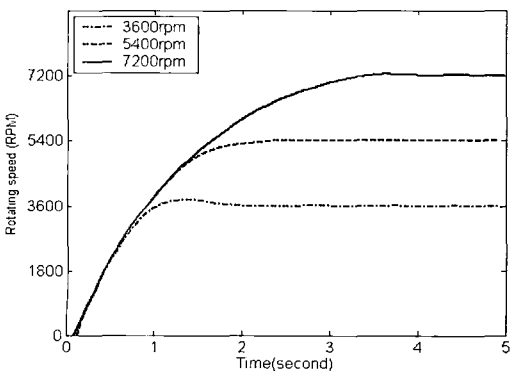
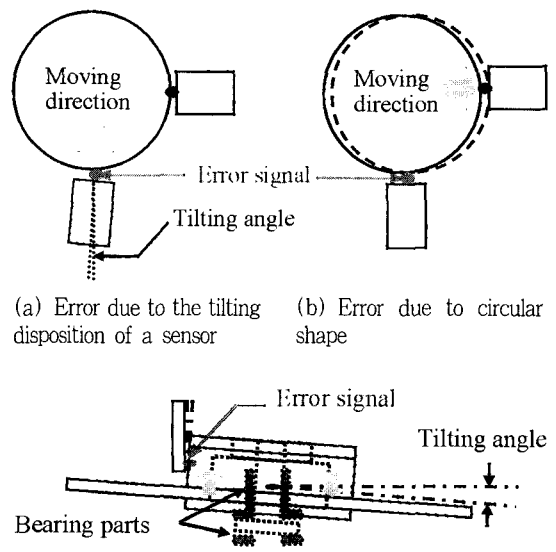


Fig. 3 Speed profile of rotor due to rotating speed

스핀들이 X방향으로 움직일 때 측정면의 곡률에 의하여 Y방향으로의 변위가 측정되는 오차를 나타낸다. 이 실험에 있어서, 측정 오차는 X방향으로 1 μm가 변할 때 Y방향으로 0.04 nm의 오차를 수반한다. Fig. 4(c)는 FDB 스핀들 시스템 회전부의 틸팅 거동에 의한 X 및 Y방향의 측정오차를 나타낸다. 이 실험에 있어서, FDB 스핀들 시스템의 회전부의 최대 틸팅 각은 축의 상부와 하부베어링이 서로 다른 방향으로 접촉할 때의 0.047°이고 이 때의 측정오차는 반경방향으로 4.34 nm이다. 이 실험 시 발생할 수 있는 측정 오차를 고찰해 본 결과, 그 값은 측정 값에 비하여 무시할 만큼 작다고 할 수 있다. 형상 오차는 가공과 조립의 생산과정에 발생한다.⁽⁵⁾ 허브 가공과정 시, 허브 표면은 이상적 진원이 아니며 또한 표면 거칠기가 존재한다. 또한 조립과정에 있어서 축이 허브와 이상적인 직각으로 결합되지 않을 것이다. 이러한 디스크와 허브의 형상 오차를 측정하는 것은 디스크 트랙의 거동 즉, 디스크 스페이서와 디스크 상에서 휠링, 플라잉과 틸팅 거동을 측정하므로 매우 중요하다.

Fig. 5는 디스크 스페이서와 디스크의 형상 오차를 측정하는 실험 장치로 상부는 디스크가 장착된 모습을 보여준다. FDB 스핀들 모터의 허브와 회전 스테이지를 연결하는 탄성 밴드는 일정 장력을 주어 연결되었다. 이는 임의의 회전 시 저널 베어링의 평균 간극을 일정하게 유지하기 위해 반경방향의 일정한 힘



(c) Error due to the tilting disposition of a FDB spindle

Fig. 4 Possible measuring errors

을 주기 위함이다. 회전 스테이지는 허브의 측정 위치를 조정하기 위하여 설치되었으며 1회전 당 128섹터로 나누어 조정 가능하게 설치되었다. 형상 측정은 디스크 스페이스의 옆면에 하나의 정전용량 갭 센서로 XY평면상에서의 허브 형상을, 다른 하나의 갭 센

서로 디스크의 바깥 가장자리의 축 방향 형상을 1회전 당 128섹터로 나누어 측정하였다. 측정된 데이터는 FDB 스피들 시스템의 측정 위치와 갭 센서 사이의 상대 위치에 따른 오프셋 값을 포함한다. 이 논문에서, 원주를 따르는 형상오차의 평균값은 0으로 가정하였고 회전 당 측정된 데이터의 평균값으로 이를 가정하여 측정된 값에서 감하였다. 이 실험은 측정 시 발생할 수 있는 오차를 줄이고자 5회 측정한 표면형상의 결과를 평균하였다. Fig. 6은 실험으로 구한 원주 방향의 표면형상을 나타내었다. 점선으로 표시된 것은

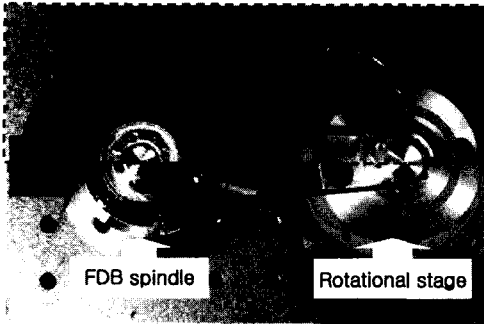


Fig. 5 Experimental setup to measure the form error of a spacer and a disk

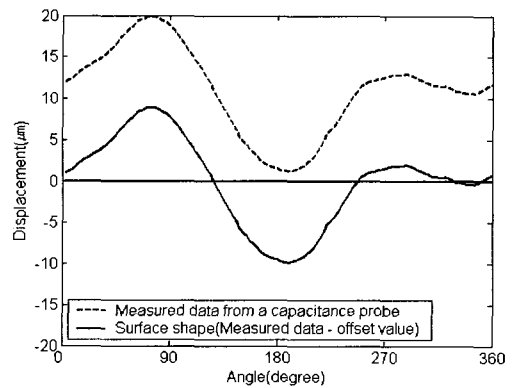


Fig. 8 Axial surface-shape of the outer rim of a disk along the circumference

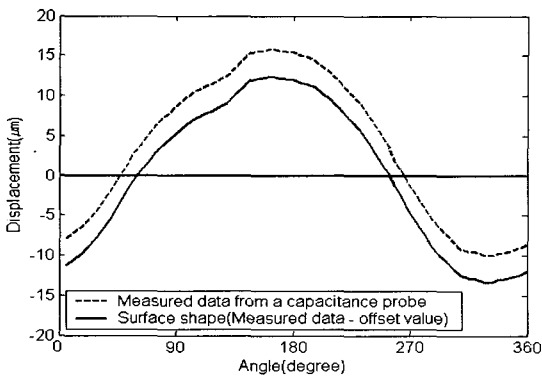
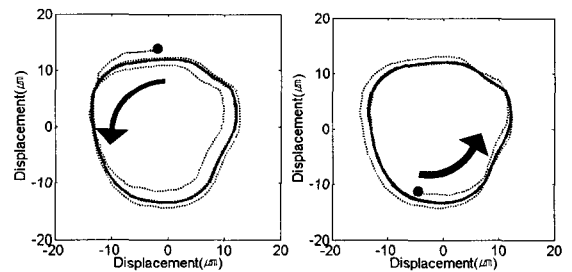


Fig. 6 Side surface-shape, i.e. roundness of a disk spacer along the circumference



(a) 3,600 rpm

(b) 5,400 rpm

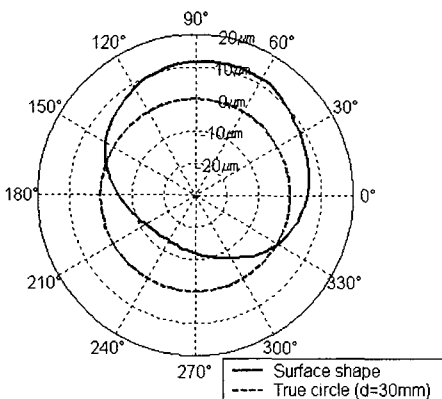
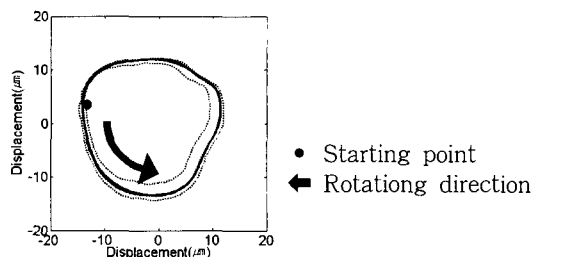


Fig. 7 Polar plot of a side surface-shape of a disk spacer along the circumference



(c) 7,200 rpm

Fig. 9 Whirling trajectory of a FDB spindle system including the side surface-shape of a disk spacer

실측 값이고 실선으로 표시된 것은 측정 데이터의 평균 오프셋 값을 뺀 실제 스페이서 옆면의 표면형상이며 Fig. 7은 이를 극좌표계로 나타낸 것이다. 실험 결과로 디스크 스페이서가 진원이 아님을 알 수 있고 형상 오차의 최대 최소 편차는 $-13.4\mu\text{m}$ 에서 $12.45\mu\text{m}$ 이다. Fig. 8은 디스크 가장자리의 원주방향을 따라 축 방향의 형상을 나타낸 것이다. 실험 결과로부터 $-9.8\mu\text{m}$ 에서 $8.5\mu\text{m}$ 사이에 형상 오차 값이 존재 함을 알 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 휘링 거동

Fig. 9는 정지 시부터 3,600, 5,400과 7,200 rpm의

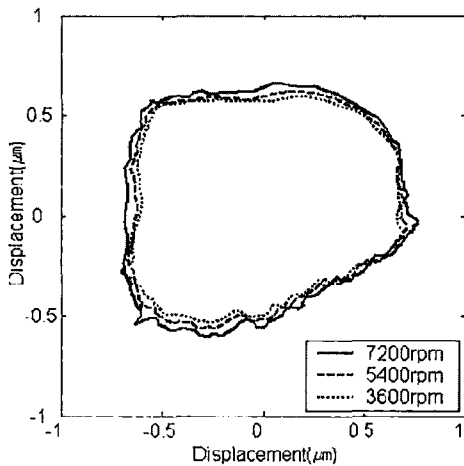


Fig. 10 Whirling trajectory of rotor excluding the side surface-shape of a disk spacer

정상상태에 이르는 과도상태의 FDB 스핀들 시스템의 휘링 거동을 나타낸 것으로 디스크 스페이서 옆면의 표면형상이 포함된 것이다. Fig. 9에서 휘링 궤적의 X와 Y 좌표는 두개의 정전용량 겹 센서로부터 측정된 값에서 오프셋 값을 뺀 것으로 형상 오차를 포함하고 있다. 센서는 스페이서 옆면에 X와 Y방향으로 장치되었고 각 센서는 5 msec 샘플링 타임의 시간 간격으로 측정하였다. 실험 결과로부터 FDB 스핀들 시스템의 휘링 거동이 매우 빠른 속도로 정상상태에 이르며 휘링진행 방향이 스핀들의 회전 방향과 같다는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 디스크 스페이서의 옆면 형상을 뺀 정상상태의 FDB 스핀들 시스템 휘링 거동을 보여준다. 휘링 궤적의 X와 Y 좌표는 디스크 스페이서 옆면의 측정 값에서 Fig. 6에 나타낸 옆면 형상을 빼서 구한 값이다. 이 때 광 센서에서 발생한 인덱스 신호를 이용하여 휘링 변위측정 데이터와 디스크 스페이서의 옆면 형상 측정 데이터의 위치를 일치시켜 형상 데이터를 제외하도록 하였다. 휘링의 평균 반경은 3,600, 5,400과 7,200 rpm에서 각각 0.60, 0.64과 $0.675\mu\text{m}$ 으로 속도증가에 따라 조금씩 증가하는 것을 보여준다. Fig. 10에서 나타낸 궤적은 실제 디스크에서 발생하는 RRO와 관련이 있다. 궤적 반경을 저널의 간극으로 나누어 구하는 평균 편심률은 0.27이고 이는 HDD의 저널 베어링이 낮은 편심 조건에서 작동하는 것을 나타낸다.

3.2 플라잉 거동

Fig. 11은 정지 시부터 3,600, 5,400과 7,200 rpm의

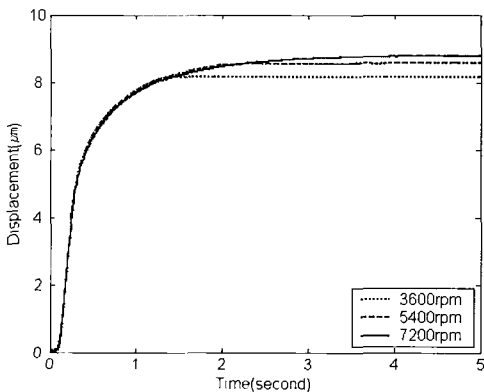


Fig. 11 Flying motion of the rotor at transient state

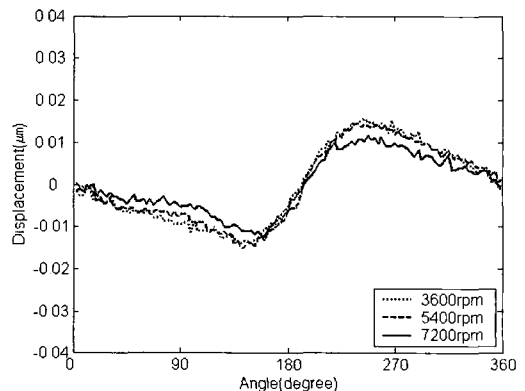


Fig. 12 Flying motion of the rotor at the steady state

정상상태에 이르는 과도상태의 FDB 스피들 시스템의 플라잉 거동을 나타낸다. 플라잉 거동은 허브 상부의 정 중앙을 정전용량 겹 센서로 측정함으로써 구하였으며 샘플링 타임은 5 msec이다. FDB 스피들 시스템이 구동하기 시작하면 회전부분은 속도에 비례하는 스러스트 베어링의 반력에 의해 부상하기 시작하여 회전부의 하중과 상하 스러스트 베어링의 반력이 평형을 이루는 점까지 상승한다.

Fig. 11은 부상 높이가 회전 속도에 따라 높아지는 것을 보여준다. 3,600, 5,400과 7,200 rpm의 정상상태에서 부상 높이는 각각 8.20, 8.59과 8.80 μm 이고 속도에 따라 부상 높이가 높아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 속도가 증가함에 따른 하부 스러스트 베어링 반력의 증가량이 상부 스러스트 베어링 반력의 증가량보다 크다는 것을 의미하며, 그 이유는 이 연구에 사용된 스피들 모터의 하부 스러스트 베어링의 크기가 상부 스러스트 베어링보다 크기 때문으로 사료

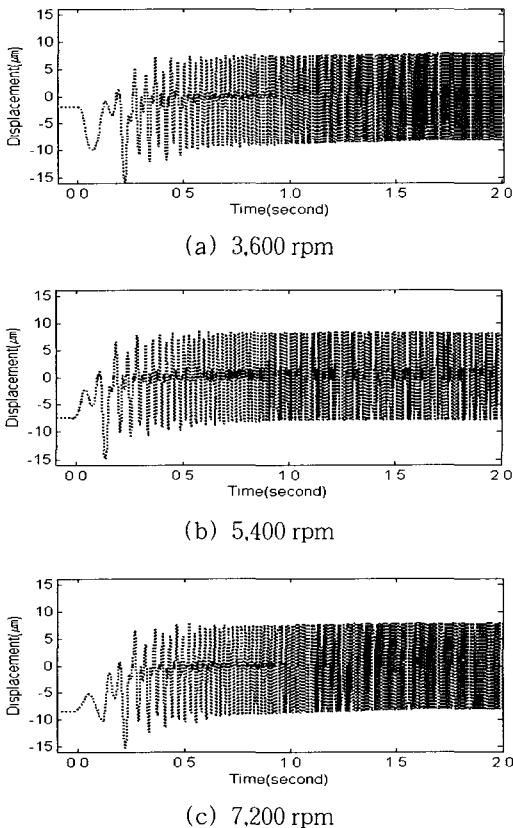


Fig. 13 Axial displacement of the outer rim of a disk including the axial surface-shape at transient state

된다. Fig. 3의 속도 변화와 비교해 볼 때, 플라잉 거동 또한 매우 짧은 시간에 정상상태에 이르는 것을 알 수 있다. Fig. 12는 스피들이 3,600, 5,400과 7,200 rpm으로 회전할 때 정상상태에서의 각 속도에 따른 부상 높이의 변화를 보여준다. Fig. 12로부터 정상상태에서 속도에 따른 부상 높이는 거의 같으며, 부상 높이의 최대-최소 변이는 약 30 nm이라는 것을 알 수 있다.

3.3 틸팅 거동

FDB 스피들 시스템이 강체 거동한다고 가정하면 회전부의 틸팅 각은 서로 다른 세 점에서 축 방향 변위를 측정하여 구할 수 있다. 세 측정 점은 FDB 스피들 허브 상부면 중심의 한 점과 중심으로부터 같은 거리에 위치하며, 서로 90°의 위상 차를 갖는 디스크 가장자리 부분의 두 점이다. Fig. 13은 FDB 스피들 시스템의 디스크 가장자리의 한 점에서 측정한 축 방향 변위이다. 이는 정지 시부터 3,600, 5,400과 7,200 rpm의 정상상태에 이르는 과도상태이며 디스크 가장자리의 축 방향 형상을 포함하고 있다. 실험 결과는 Fig. 11에서 보여준 플라잉 거동과 같이 디스크의 바깥 가장자리의 축 방향 변위를 보여준다. 정상상태에서 축 방향 변위는 3,600, 5,400과 7,200 rpm의 속도에서 거의 같다. 두개의 겹 센서로 측정한 결과는 90°만큼의 위상차를 가지고 회전 방향과 동일한 방향으로 회전하였다.

FDB 스피들 허브 중심에서 축 방향 변위는 Fig. 11에서 볼 수 있고 이는 디스크 가장자리의 변위에 비하여 매우 작다. Fig. 14는 FDB 스피들 시스템의

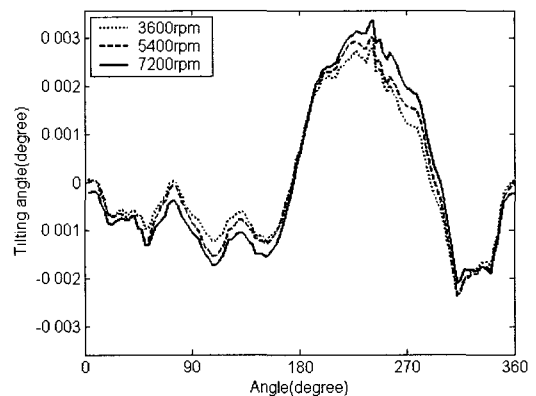


Fig. 14 Tilting angle of the rotor at the steady state

정상상태에서 Fig. 8에 나타난 가장자리 형상을 뺀 틸팅 각을 보여준다. Fig. 14에서 틸팅 각은 세 점에서 측정된 축 방향 변위에서 형상을 뺀 값으로 계산하였다. 3,600, 5,400, 7,200 rpm의 속도에서 최대-최소 틸팅 각 변위는 각각 4.913×10^{-3} 와 5.357×10^{-3} , 5.758×10^{-3} 이며 속도에 따라 틸팅 각의 변위가 커지는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

이 논문은 스핀들의 거동을 휘링, 플라잉과 틸팅 거동으로 구분하여 하나의 디스크가 장착된 FDB 스핀들의 거동을 실험적으로 연구하였다. 실험 결과로 7,200 rpm으로 회전하는 디스크 1장이 장착된 스핀들 시스템의 경우, 휘링 거동 궤적의 평균 반경은 $0.675 \mu\text{m}$ 이며 부상 높이는 $8.8 \mu\text{m}$, 틸팅 각은 약 5.758×10^{-3} 으로 측정되었다. 휘링 거동과 틸팅 거동의 진행 방향은 스핀들의 회전 방향과 같으며 동일 주기를 갖는다는 것을 알 수 있고, 따라서 RRO에 큰 영향을 미칠 것임을 알 수 있다. 또한 스핀들의 플라잉, 틸팅 거동은 정상상태에서의 자기 헤드의 플라잉 높이인 10 nm과 비교하여 상당히 큰 것을 알 수 있다.

볼 베어링으로 지지되는 스핀들 시스템의 경우 NRRO는 정보 저장 용량을 결정하는 주요한 요인이나, FDB로 지지되는 스핀들 시스템의 경우, NRRO는 작은 반면, 휘링, 플라잉과 틸팅 거동이 RRO 성

분이 한계 이상으로 클 경우 서보 제어 능력을 넘어설 수 있으므로 이를 고려한 FDB, 액추에이터, 압 및 서스펜션의 설계가 이루어져야 한다.

참 고 문 헌

- (1) Bouchard G, Lau L and Talke F. E., 1987, "An Investigation of Nonrepeatable Spindle Run-out," IEEE Trans, Magn, Vol. 23, pp. 3687~3689.
- (2) 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," ASME Journal of Tribology. Vol. 121, pp. 499~505.
- (3) Jang G. H. and Yoon J. W., 2002, "Nonlinear Dynamic Analysis of a Hydrodynamic Journal Bearing Considering the Effect of a Rotating or Stationary Herringbone Groove", ASME Journal of Tribology. Vol. 124, pp. 297~304.
- (4) Jang G. H. and Yoon J. W., 2002, "Dynamic Characteristics of a Coupled Journal and Thrust Hydrodynamic Bearing in a HDD Spindle System due to its Groove Location", Micro System Technologies: pp. 261~270.
- (5) Bernard J. H., 1994, Fundamentals of Fluid Film Lubrication, McGraw-Hill Inc., New York.