

비대칭 그루브 저널 베어링으로 지지되는 하드디스크 스핀들 시스템의 동특성 해석

Analysis of the Dynamic Characteristics of a HDD Spindle System Supported by Asymmetrically Grooved Journal Bearings

이상훈* · 김학운* · 장건희** · 김철순***

Sang-Hoon Lee, Hak-Woon Kim, Gun-Hee Jang and Chul-Soon Kim

Key Words : Fluid Dynamic Bearing(유체 동압 베어링), Asymmetric Groove(비대칭 그루브), HDD(Hard Disk Drive, 하드 디스크 드라이브), Eccentricity(편심), Rotor Dynamics(회전체 동역학)

ABSTRACT

Fluid dynamic bearings (FDBs) have been replacing ball bearings of the HDD spindle motor very rapidly. But there are several demerits of HDB, such as high friction torque, variable viscosity of the fluid lubricant depending on operating temperature, low stiffness, and etc. Eccentricity is one of the major parameters which affects the static and dynamic characteristics. As the static eccentricity is larger, the stiffness and the damping coefficients become bigger. But friction torque is relatively unaffected by the static eccentricity. This research proposes a new type of journal bearing with asymmetric journal grooves which results in better dynamic characteristics. The static and dynamic characteristics of the new journal bearing are investigated by solving the Reynolds' equation with FEM, and the transient analysis is performed to predict the dynamic behavior of rotor by solving the equations of motion of a HDD spindle system with Runge-Kutta method. The result shows that the proposed journal bearings have much bigger stiffness and damping coefficients compared with the conventional symmetric ones. And consequently, it has smaller whirl radius and tilting angle.

1. 서론

최근 컴퓨터 산업의 급속한 발전으로 인하여 각종 디지털 기기와 고사양의 PC가 대중화 됨에 따라 더욱 빠르고 안정적인 고용량의 저장매체 개발이 급속도로 진행되고 있다. 특히 대표적인 저장 매체인 HDD의 경우 기존의 볼 베어링 구조를 유체 베어링 구조로 대체하여 고속화에 수반되는 진동문제를 해결하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 유체 베어링(Fluid Dynamic Bearing, FDB)은 볼 베어링과 달리 고체 간의 직접적인 접촉이 없기 때문에 저소음 구동이 가능하며 점성유체가 갖는 감쇄효과로 인해 고유 진동과 강제 진동 특성 향상되는 이점이 있다. 그러나 유체 베어링 자체의 높은 마찰토크, 온도 상승 시의 성능 저하 및 상대적으로 작은 강성 등의 단점은 개선되어야 할 과제로 남아있다.

Fig. 1은 일반적으로 많이 사용되는 축이 회전하는 형태의 FDB 스핀들 모터를 나타낸다. 디스크 등의 회전체는 2개의 저널 베어링과 2개의 스

러스트 베어링에 의하여 지지되고 있다. 저널 베어링에는 유체의 누설을 줄이고 회전체의 안정성을 증가시키는 장점이 있는 빗살무늬 그루브가 주로 사용된다. 이 때 그루브는 원주 방향을 따라 등간격으로 배치되며 베어링 영역에서 발생하는 유막 반력은 회전체의 편심이 없는 경우 베어링 중심에서 대하여 대칭적으로 발생하게 된다.

지금까지 유체 동압 베어링의 연구는 해석적인 측면에서 활발하게 진행되었다. Hirs⁽¹⁾는 좁은 홈 이론을 이용하여 빗살무늬 저널 베어링을 해석하였고, G.H. Jang 등⁽²⁾은 빗살무늬 저널과 스톱스톱 베어링의 정특성과 동특성을 회전축계의 5 자유도에 대하여 해석하였다. 또한 G.H. Jang 등^{(3),(4)}은 회전운동을 고려한 비선형 운동방정식을 풀어 유체 동압 저널 베어링의 동특성을 다양한 하중 조건에

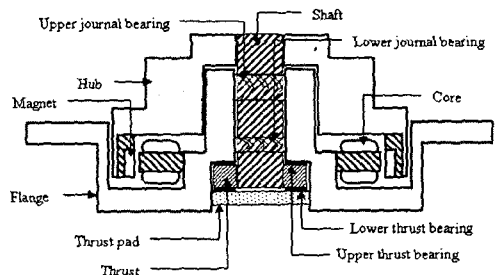


Fig. 1 Schematic of FDB spindle system

* 한양대학교 정밀기계공학과 대학원
E-mail : hoon0140@jhanyang.ac.kr
Tel : (02) 2299-5685, Fax : (02) 2292-3406

** 한양대학교 기계공학부

*** 삼성 종합 기술원, Storage Lab.

대하여 해석하였다. 기존의 연구 결과에서 알 수 있듯이 저널 베어링의 동특성 계수는 저널의 편심률이 증가할수록 증가하게 된다. 그러나 회전체에 작용하는 정적 외력이 없는 HDD 와 같은 시스템의 경우, 불평형 질량과 같은 동하중의 증가는 반복적 런아웃(Repeatable Runout, RRO)의 증가시키고, 이는 데이터 저장 용량을 저하시키는 요인이 된다. 따라서 동특성 계수들을 증가시키기 위해 동하중에 의한 편심을 증가시키는 것은 바람직한 방법이라 할 수 없다. 베어링의 동특성 계수는 또한 베어링의 크기에 영향을 받는다. 베어링의 크기가 증가하면 부하용량이나 동특성 계수가 확실히 증가하게 된다. 그러나 이 경우 마찰토크가 증가하여 구동 효율이 감소하게 된다.

본 연구에서는 마찰토크를 일정 수준으로 유지하는 동시에 베어링의 동특성 계수를 증가시키는 방법으로 비대칭 그루브 저널 베어링을 제안하고 고찰하였다. 또한 HDD 스피들 모터에 비대칭 그루브 저널 베어링을 사용하였을 경우와 기존 저널 베어링을 사용하는 경우에 대하여 회전체의 5 자유도 운동방정식을 풀어 동적 거동을 해석적으로 비교하였다.

2. 비대칭 그루브 저널 베어링 특성 해석

Fig. 2 는 기존의 저널 베어링과 본 연구에서 제안한 비대칭 그루브 저널 베어링의 그루브 배치를 도시한 것이다. 비대칭 그루브 저널 베어링은 기존의 저널 베어링과 달리 그루브의 분포를 변경하여 베어링 내에 발생하는 압력 분포를 비대칭 형태로 유발함으로써 회전체가 편심을 갖고 회전하도록 유도하였다. 제안된 비대칭 그루브 저널 베어링의 정적, 동적 특성을 기존 저널 베어링의 특

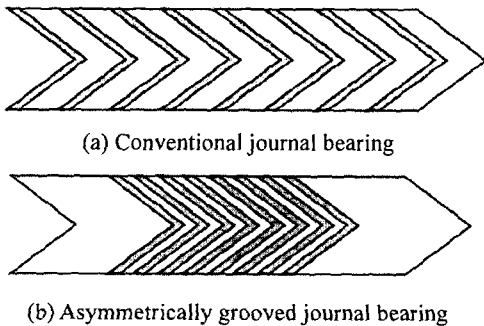


Fig. 2 Location of grooves in journal bearing
(□ : groove, □ : ridge)

성과 비교하기 위하여 Table 1 과 같은 사양을 갖는 대칭형과 비대칭 그루브 저널 베어링 단품을 각각 해석하였다. 베어링 내에서 저널이 수렴하는 위치를 찾기 위하여 회전하는 저널의 2 자유도에 대한 운동방정식을 해석하였다. 이때 운동방정식에 포함되는 베어링 반력은 유체 동압 베어링의 지배방정식인 레이놀즈 방정식을 유한요소법을 이용하여 해석함으로써 구할 수 있다.⁽²⁾ Fig. 3 은 저널이 회전함에 따라 초기에 원점에 위치하던 저널의 중심이 평형점을 향해 이동하는 궤적을 나타낸

Table 1 Major design parameters for the analysis of 1 journal bearing

Journal mass	[g]	48.0
Radius of journal	[mm]	2.0
Number of grooves	[EA]	8
Clearance	[μm]	2.5
Groove angle	[deg.]	26
Viscosity	[Pa-s]	0.016
Bearing length	[mm]	2.0

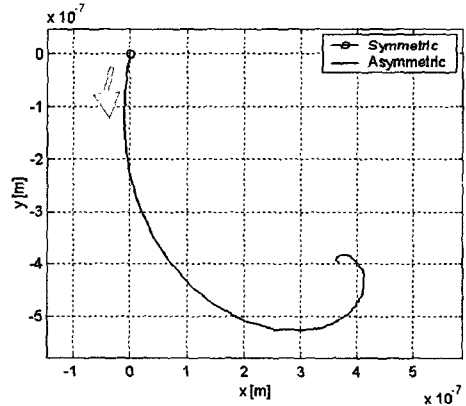


Fig. 3 Locus of journal center

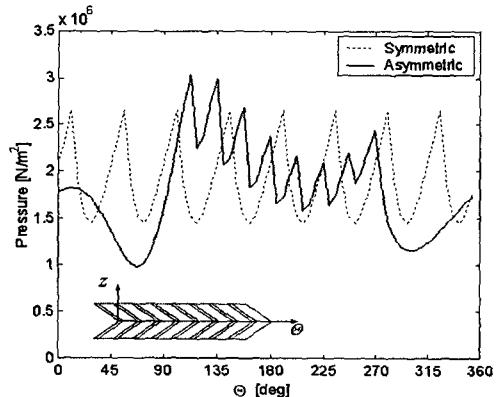


Fig. 4 Pressure distribution on the mid-line of journal bearing along the circumferential direction

다. 기존 저널 베어링의 경우 저널이 원점에서 회전하는 반면 비대칭 그루브 저널 베어링의 경우 반력과 관성력이 평형을 이루는 위치로 저널이 이동하여 편심을 가지며 회전하는 것을 알 수 있다. 이것은 베어링 내부의 압력분포가 고정축의 중심에 대하여 비대칭 형태로 발생하기 때문이다. Fig. 4는 정상 상태 평형 위치에서 기존 저널 베어링과 비대칭 그루브 저널 베어링의 압력 분포를 비교하기 위하여 베어링 중간 위치에 발생하는 압력을 원주 방향으로 나타낸 그림이다. 기존 저널 베어링은 압력이 주기적으로 발생하지만 비대칭 그

루브 베어링은 그루브가 집중된 부분의 압력이 큰 것을 알 수 있다. Fig. 5는 수렴 위치에서 회전 속도에 따라 발생하는 기존 저널 베어링과 비대칭 그루브 저널 베어링의 마찰토크를 비교한 것이다. 본 연구에서 제안한 베어링의 마찰토크는 기존 저널 베어링의 마찰토크보다 약간 크지만 그 차이는 약 1.19% 정도로 거의 같은 수준인 것을 알 수 있다. Fig. 6-9은 각각 회전 속도에 따른 저널 베어링의 강성 계수와 감쇠 계수의 변화를 나타내고 있다. 비대칭 그루브 저널 베어링의 강성은 20~70% 증가하며 감쇠는 40~100% 증가하였다. 특히 비대칭 감쇠 계수의 경우 기존 저널 베어링은 0에 가까운 값을 갖지만 비대칭 그루브 저널 베어링은 상대적으로 매우 큰 값을 갖는 것으로 해석되었다. 따라서 비대칭 그루브 저널 베어링은 기존의 대칭형 그루브 저널 베어링에 비하여 마찰토크는 일정 수준으로 유지되면서 동특성 계수가 증가하는 것을 알 수 있다.

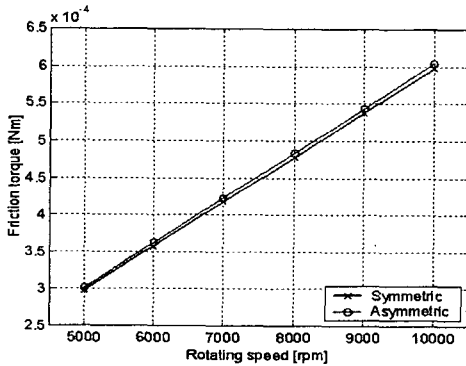


Fig. 5 Comparison of friction torque

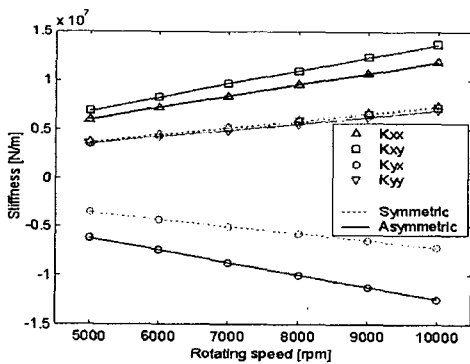


Fig. 6 Stiffness coefficients for translational motion

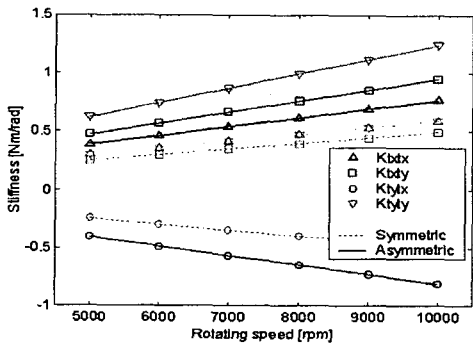


Fig. 7 Stiffness coefficients for rotational motion

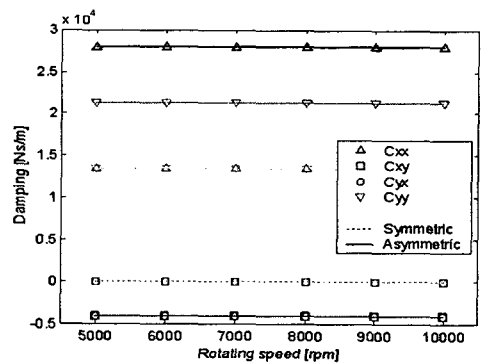


Fig. 8 Damping coefficients for translational motion

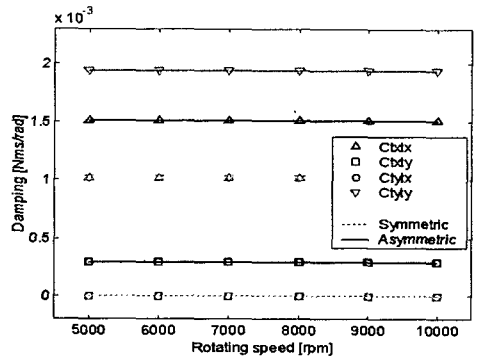


Fig. 9 Damping coefficients for rotational motion

Table 2 Major design parameters of HDD spindle system

Rotor mass	[g]	27.72
Rotating speed	[rpm]	10000
Mass unbalance (1 disk)	[gmm]	0.506
Location along z direction [mm]	Mass center	8.240
	Upper journal	9.325
	Lower journal	2.985
	Upper thrust	2.235
	Lower thrust	0.000

Table 3 Design parameters of bearings for HDD spindle system

	Journal	Thrust
# of bearings	[EA] 2	2
# of grooves	[EA] 8	12
Clearance	[μ m] 3.15	18
Groove angle	[deg.] 26	25
Viscosity	[Pa-s] 0.018	0.018
Bearing length [mm]	2.2 (upper)	2.2 to 3.6 (radius)
	1.2 (lower)	

링으로 지지되는 HDD 스피들 시스템의 동적 거동을 살펴보기 위하여 과도 해석을 수행하였다. 회전체의 운동은 병진 운동과 미소 각운동을 포함하여 5 자유도로 묘사될 수 있으므로 시스템의 운동 방정식은 관성력과 베어링에서 발생하는 반력, 자중 및 불평형 질량에 의한 동하중 등을 고려하여 5 계 연립 비선형 미분방정식으로 구성하였다. 운동방정식은 4 계 Runge-Kutta 법을 사용하여 해석하였다. Table 2 과 3 는 각각 스피들 시스템과 스피들을 지지하는 베어링의 주요 설계 사양을 나타낸다. 이때 스피들 시스템의 불평형 질량은 디스크 장착 시 디스크와 허브 사이의 유격에 의해 발생할 수 있는 최대값($23 \times 0.022 \text{ g}\cdot\text{mm}$)으로 가정하였다. 해석은 비대칭 그루브 저널 베어링으로 지지되는 스피들 시스템과 동일한 크기의 기존 저널 베어링으로 지지되는 스피들 시스템에 대하여 수행되었다. 본 연구에서 제안된 비대칭 그루브 저널 베어링이 적용된 스피들 시스템의 거동을 해석해 본 결과 회전체의 거동이 Fig. 10 과 같이 Z 축에 대하여 일정 각도 기울어진 축을 중심으로 발생하는 것을 알 수 있었다. 그 이유는 상하부 저널 베어링의 크기가 달라 상하부 각 저널 베어링에서 Fig. 2 와 같이 저널의 움직임이 수렴하는 평형 위치가 서로 다르기 때문으로 사료된다. 본 연구에서는 이와 같은 offset angle 을 최소화하기 위하여 Fig. 11 과 같이 상하부 베어링의 그루브에

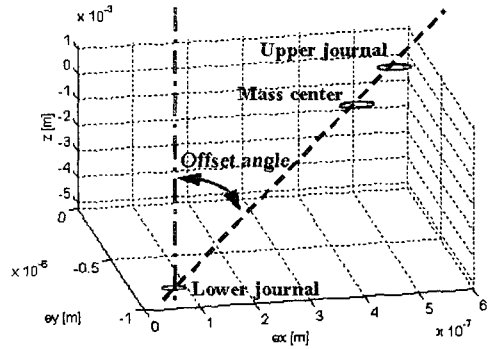


Fig. 10 Loci of journal centers and mass center

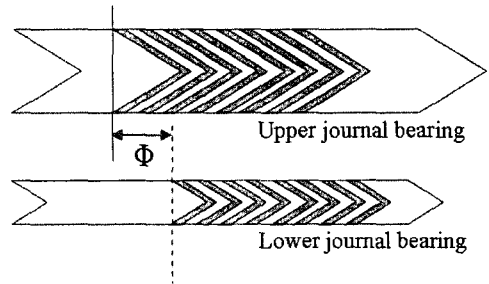


Fig. 11 Phase shift between the grooves of upper and lower journal bearings

위상차를 주는 방법을 사용하였다. 여러 위상차에 대하여 해석하여 고찰한 결과 45 도의 위상차에서 offset angle 이 최소가 됨을 알 수 있었고 해석 모델에 이를 적용하였다. Fig. 12 는 스피들 시스템이 10,000 rpm 정상상태로 회전할 때 기존의 저널 베어링을 사용한 경우와 비대칭 그루브 저널 베어링을 사용한 경우에 대한 무게 중심의 궤적을 나타낸다. 기존의 저널 베어링을 사용한 경우 스피들 시스템은 원점을 중심으로 whirling 운동을 하는 반면 비대칭 그루브 저널 베어링을 사용한 경우 원점이 아닌 점을 중심으로 whirling 운동이 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 스피들 시스템에 비대칭 그루브 저널 베어링을 적용할 경우 편심이 발생하여 강성 및 감쇠 계수가 증가하게 된다. Fig. 12 에서 비대칭 그루브 저널 베어링을 사용한 경우 편심률이 약 0.2 이상 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 13 은 시간에 따른 각변위를 나타내고 있다. 이때 비대칭 그루브 저널 베어링을 사용한 경우의 각변위는 offset angle 을 뺀 진동성분을 나타내었다. Fig. 13 에서 볼 수 있듯이 비대칭 그루브 저널 베어링을 사용한 경우 tilting 에 의한 진동이 감소되는 것을 알 수 있다. 비대칭 그루브 저널 베어링을 사용한 경우 whirling 및 tilting 의 진폭이 각각 약 24% 감소하였다.

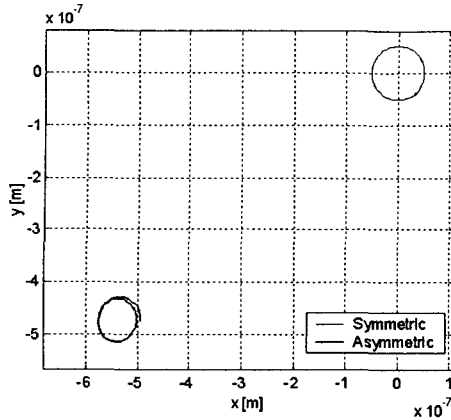


Fig. 12 Comparison of locus of mass center

4. 결론

본 연구에서는 동압 유체 저널 베어링을 사용하는 HDD 스피들 시스템의 작동 성능 향상을 위하여 그루브의 위치를 변경한 비대칭 그루브 저널 베어링을 제안하고 비대칭 그루브 저널 베어링의 정적/동적 특성과 이를 사용하는 HDD 스피들 시스템의 거동을 수치적 방법을 통하여 고찰하였다.

비대칭 그루브 저널 베어링은 같은 크기의 기존 저널 베어링과 비교하여 볼 때 마찰토크가 1.19% 증가하여 거의 일정한 수준을 유지하는 동시에 강성 및 감쇄 계수 각각 20~70, 40~100% 정도 크게 증가하였다. 따라서 비대칭 그루브 저널 베어링을 사용할 경우 효율의 저하없이 강성 및 감쇄를 증가시킬 수 있다.

비대칭 그루브 저널 베어링을 사용하는 HDD 스피들 시스템의 transient 해석을 수행한 결과를 고찰하여 볼 때, 기존 저널 베어링을 사용하는 경우에 비하여 whirling 및 tilting에 의한 진폭이 약

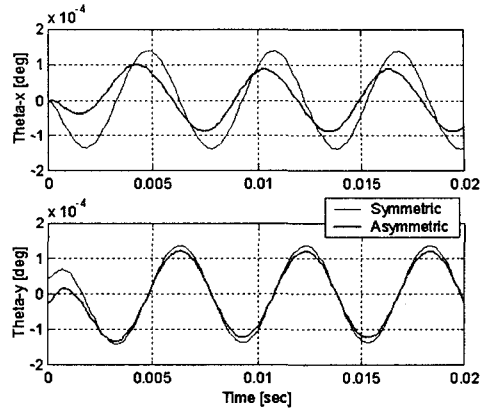


Fig. 13 Comparison of tilting angle

24% 감소하여 정상상태에서의 회전체 거동이 향상되었다.

그러나 비대칭 그루브 저널 베어링을 HDD 스피들 시스템에 적용한 경우 발생하는 offset angle을 없애기 위한 적절한 설계 변경이 향후 과제로 남아있다.

참고문헌

- (1) Hirs, G. G., 1965, "The Load Capacity and Stability Characteristics of Hydrodynamic Grooved Journal Bearings", ASLE Transactions, Vol. 8, pp.296~305.
- (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.