

유체 동압 베어링의 안정성을 이용한 HDD 스피들 시스템의 강건 설계

The Robust Design of HDD Spindle System Utilizing the Stability of Fluid Dynamic Bearings

김명규* · 장건희†

Myunggyu Kim and Gunhee Jang

1. 서론

최근 하드 디스크 드라이브(Hard disk drive, HDD)는 모바일 환경에 사용될 수 있도록 소형화와 함께 안정화가 지속적으로 요구되고 있다. HDD 스피들 시스템의 회전체를 지지하는 유체 동압 베어링의 강성·감쇠 계수는 HDD의 안정성을 결정하는 중요한 요소이다. 그러나 유체 동압 베어링의 강성·감쇠 계수는 베어링의 설계 변경에 따라 증가하는 성분과 감소하는 성분이 동시에 존재하기 때문에 설계자가 강성·감쇠 계수만으로 회전체-베어링 시스템의 성능을 평가하는 것은 어렵다. 그리고 회전체-베어링 시스템의 모드 감쇠비 등의 동특성도 시스템의 자유도의 개수만큼 다양하게 존재하기 때문에 모든 동특성들을 동시에 고려하여 회전체-베어링 시스템을 설계하는 것 또한 어려운 실정이다.

본 연구에서는 병진과 틸팅을 동시에 고려한 회전체-베어링 시스템의 안정성을 해석하기 위한 방법을 제시하여 회전체-베어링 시스템의 동특성을 평가하는 성능 지표로 활용할 수 있도록 했다. 그리고, 본 논문에서 제안한 회전체-베어링 시스템의 안정성 해석 이론을 이용하여 HDD 스피들 시스템의 안정성 개선이 시스템의 동특성과 외부 가진에 대한 회전체 거동에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 안정성 해석 방법

저널과 스테르스트가 연성된 유체 동압 베어링으로 지지되는 회전체는 병진과 틸팅에 의한 5 자유도 운동이 가능하다. 그러므로, 회전체-베어링 시스템의 정확한 성능 평가를 위해서는 회전체의 병진과 틸팅 운동을 동시에 고려한 회전체-베어링 시스템의 안정

성 해석이 필요하다. 회전체가 강체이고 회전체에 가해지는 외력이 없다고 가정하였을 경우, 유체 동압 베어링으로 지지되는 회전체의 5 자유도 운동 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$[M]\ddot{\mathbf{x}} + ([G] + [C])\dot{\mathbf{x}} + [K]\mathbf{x} = \mathbf{0} \quad (1)$$

여기서, \mathbf{x} 는 5 자유도 변위 벡터이며, $[M]$, $[G]$, $[C]$, $[K]$ 는 각각 관성과 자이로스코픽, 감쇠, 강성 행렬을 나타낸다. 회전 반경(radius of gyration)을 도입하여 질량 관성 모멘트를 회전체의 질량에 대한 함수로 표현하면 질량 m_a 을 관성 행렬의 유일한 매개 변수로 표현할 수 있다. 유체 동압 베어링의 강성·감쇠 계수는 저널과 스테르스트 베어링의 섭동 방정식과 유한요소법을 이용하여 구할 수 있다. 식 (1)에 대한 제차 해를 지수 함수의 형태로 가정하면 이 시스템은 복소 고유치 ($\Omega = -\Omega_{real} + i\Omega_{img}$)의 실수부가 0보다 크면 안정하고, 작으면 불안정하다. 그러므로 회전체-베어링 시스템이 안정 영역에서 불안정 영역으로 천이되는 임계 조건 $\Omega_{real} = 0$ 이다. 선형 5 자유도 운동 방정식에 복소 고유치를 대입하고 임계 조건을 적용하여 고유치 문제를 해석하면 질량을 매개로 한 관성 행렬에서 병진과 틸팅 운동을 동시에 고려하여 회전체-베어링 시스템의 안정성을 판단할 수 있는 지표인 임계 질량(m_a)_c을 도출할 수 있다.⁽¹⁾ 임계 질량은 그 크기에 따라 회전체-베어링 시스템의 안정성과 그에 따른 동특성을 예측할 수 있고, 이를 통하여 유체 동압 베어링의 설계가 전체 시스템의 동특성에 미치는 영향을 고찰할 수 있다.

3. 안정성 및 동특성 해석 결과

본 논문에서 사용한 HDD 스피들 시스템의 회전체를 지지하는 유체 동압 베어링은 2개의 그루브 저널 베어링과 2개의 그루브 스테르스트 베어링으로 구성되어 있다. Table 1은 그루브 저널 베어링의 주요 설계 변수이다. 그리고 그루브의 형상과 관련된 그루브 각과 그루브 폭, 상부 저널 그루브의 폭 비

† 교신저자; 한양대학교 기계공학부
E-mail : ghjang@hanyang.ac.kr
Tel : (02) 2220-0431, Fax : (02) 2292-3406
* 한양대학교 대학원 기계공학과

Table 1 Major design parameters of FDBs

	Initial model	Proposed model
	Upper journal :	
	2.4	
Bearing width (mm)	Lower journal :	same
	1.5	
Radial clearance (μm)	2.8	same
Width ratio of upper journal bearing (μm)	1.2	0.8
	/1.2	/1.6
Groove pattern	Herringbone	same
Number of grooves	8	same
Groove depth (μm)	10	8
Groove angle (deg)	26	20
Rotating speed (rpm)	7200	same

를 각각 10° 부터 34° 까지, $8\mu\text{m}$ 부터 $14\mu\text{m}$ 까지, $0.6/1.8\mu\text{m}$ 부터 $1.8/0.6\mu\text{m}$ 까지 변경하며 각 설계 변수가 전체 시스템의 안정성에 미치는 영향을 분석하고, 최적의 그루브 저널 베어링의 설계 변수를 table 1 과 같이 제안했다. 본 논문은 위의 두 유체 동압 베어링을 사용한 회전체-베어링 시스템의 안정성과 동특성 해석을 수행했다. 이 때 공통으로 사용한 회전체의 질량은 50.8g 이다.

Table 2 와 3 은 본 논문에서 제안한 바와 같이 그루브 저널 베어링의 설계를 변경했을 경우 회전체 베어링 시스템의 성능과 유체 동압 베어링의 동특성 변화이다. 베어링 설계 변경을 통하여 회전체-베어링 시스템의 안정성이 약 52.34% 증가하면, 모드 감쇠비가 가장 낮은 고유 모드 IV 는 약 17.85%까지 증가하고, 나머지 모드도 전체적으로 증가한다. 이는 유체 동압 베어링의 k_{yy} 와 $c_{\theta_x\theta_x}$ 가 최대 135% 와 42%까지 증가하고, 강성·감쇠 계수의 나머지 대 각 성분도 모두 증가하기 때문이다.

Fig. 1 은 기존 베어링과 제안한 베어링으로 각각 지지되는 회전체에 정적 질량 불평형과 동적 외부 가진이 가해질 경우 휩(whirl) 반경의 시간 응답이다.

Table 2 Performances of HDD spindle systems

Performance	Initial model	Proposed model	Difference [%]
Stability [kg]	31.087	47.358	+52.34
Modal mode II damping	0.998	0.999	+0.15
mode III damping	0.363	0.427	+17.85
mode IV damping	0.454	0.485	+6.74

Table 3 Dynamic characteristics of FDBs

Component	Stiffness		Damping	
	Initial	Proposed	Initial	Proposed
Translation	[N/m]		[Ns/m]	
xx	6.10×10^6	8.20×10^6	3.28×10^4	4.27×10^4
yy	3.83×10^6	9.02×10^6	3.09×10^4	4.26×10^4
zz	1.64×10^6	1.64×10^6	1.02×10^5	1.20×10^5
Angular	[Nm/rad]		[Nms/rad]	
$\theta_x\theta_x$	4.22×10^1	8.57×10^1	2.74×10^{-1}	3.91×10^{-1}
$\theta_y\theta_y$	4.51×10^1	8.15×10^1	2.78×10^{-1}	3.83×10^{-1}

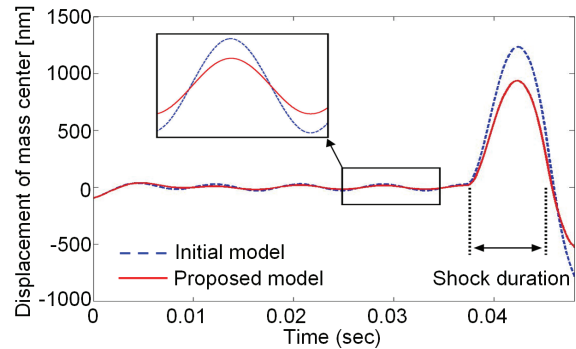
질량 불평형은 $0.507\text{g}\cdot\text{cm}$ 이고, 외부 가진은 x 방향 반경이 최대일 때 x 방향으로 질량 중심에 0.008sec 동안 최대 50G 의 half-sine 충격을 인가했다. 질량 불평형이 존재할 경우 기존과 제안 모델의 휩 반경은 각각 최대 28nm , 16nm 로 제안 모델이 42% 정도 감소하고, 외부 가진이 존재할 경우 기존과 제안 모델의 x 성분은 각각 최대 1235nm , 936nm 이고, y 성분은 각각 최대 1487nm , 1057nm 로 제안 모델이 24%와 29% 정도 감소한다.

4. 결론

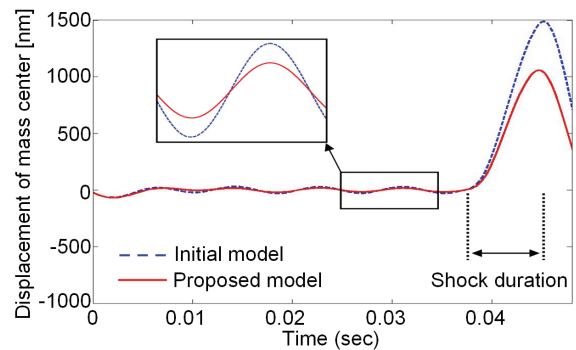
본 논문은 병진과 틸팅을 동시에 고려하여 회전체-베어링 시스템의 안정성을 해석하기 위한 방법을 제시했다. 그리고 회전체-베어링 시스템의 동특성을 평가하는 성능 지표로 안정성을 활용하여, 회전체-베어링 시스템의 안정성이 높은 모델이 동특성 또한 향상되는 것을 해석적으로 증명했다. 따라서 본 논문에서 제안한 방법은 회전체-베어링 시스템의 동특성을 향상시키기 위한 강건 설계에 적용할 수 있다.

참고 문헌

- (1) 김명규, 장건희, 2008, “ 틸팅 운동을 고려한 유체 동압 베어링의 안정성 해석 ” KSNVE, 2008 년 추계학술대회 논문집, pp. 394~300.



(a) x component



(b) y component

Fig 1 Shock response of whirl radius of HDD spindle systems