

유체베어링의 설계변화에 따른 HDD 스피들 시스템의 동특성 해석

Dynamics of a HDD spindle system due to the change of FDBs

박기용*·장건희†

Kiyong Park and Gunhee Jang

Key Words : Dynamics(동역학), HDD(Hard Disk Drive, 하드 디스크 드라이브), FEM (Finite Element Method, 유한 요소법), Stationary Supporting Structure(지지 구조), FDB(Fluid Dynamic Bearing, 유체 동압 베어링), Mode superposition method(모드 중첩법), Eigenvalue problem(고유치 문제)

ABSTRACT

This paper investigates the dynamics of a HDD spindle system due to the change of FDBs. Flying height of the HDD spindle system is determined through the static analysis of the FDBs, and the stiffness and damping coefficients are calculated through the dynamic analysis of the FDBs. Free vibration characteristics and shock response of the HDD spindle system are analyzed by using the finite element method and the mode superposition method. Experimental modal test is also performed to verify the accuracy of the proposed method. This research shows that the stiffness coefficients of journal bearing mostly affect the rocking frequencies because their magnitude are within the range of the stiffness of supporting structure. It also shows that the damping coefficients of thrust bearing mostly affect the axial frequency because the stiffness of thrust bearing is much smaller than that of supporting structure.

1. 서론

하드 디스크 드라이브(hard disk drive, HDD) 스피들 시스템의 베어링은 회전부를 지지하는 기계요소로서 베어링의 동특성 계수는 HDD 스피들 시스템의 동특성에 중요한 영향을 미친다. 최근 HDD 스피들 시스템에 사용되는 유체 동압 베어링(fluid dynamic bearings, FDBs)은 볼베어링에 비해 유체에 의한 감쇠를 제공하므로 진동특성을 개선시킬 수 있는 장점이 있으며 이에 따른 진동 저감은 HDD의 저장 밀도를 증가시킨다. 따라서 유체 동압 베어링의 설계 변화에 따른 FDB의 강성 및 감쇠 변화가 HDD 스피들 시스템의 진동 특성 및 충격 특성에 어떤 영향을 주는가에 대한 연구는 HDD 스피들 시스템의 동특성 향상을 위해 필요하다.

FDB 해석에 있어서 Jang⁽¹⁾등이 저널과 스러스트 베어링 단품을 대하여 회전축의 5 자유도에 대하여 동특성 계수를 해석하였다. 저널과 스러스트 베어링 간의 연성 효과 영향을 고려하기 위하여 Jang⁽²⁾등은 저널과 스러스트 각각의 2 차원 레이놀즈 방정식을 결합하여 저널과 스러스트가 연성된 전체 유체 베어링 시스템의 특성을 이해하고자 하는 연구가 수행하였다.

회전하는 유연 디스크와 스피들 포함한 HDD 스피들 시스템의 동특성에 관한 연구 분야에서는 Jintanawan⁽³⁾등은 부분 구조 합성법과 모드 가정법을 이용하여 유연 디스크와 지지축의 단성 변형을 고려한 고유 진동 특성을 해석하였다. Jang⁽⁴⁾ 등은 유한 요소법과 부분 구조 합성법을 이용하여 지지축의 단성 변형을 고려한 3.5 인치 HDD 시스템의 고유 진동을 해석하였다. Jang⁽⁵⁾⁽⁶⁾등은 복잡한 형상의 지지 구조를 가지는 베이스 플레이트와 하우징의 유연성을 고려한 HDD 유연 회전 디스크-스피들 시스템을 유한 요소법과 부분 구조 합성법을 이용하여 고유 및 강제 진동 해석을 하였다.

그러나 이들의 연구는 유체 동압 베어링만을 연구하거나 유체 동압 베어링을 가지는 스피들을 연구했지만 유체 동압 베어링의 특성 변화에 따른 HDD 스피들 시스템의 동특성 해석에 관한 연구가 수행되지 못하였다.

본 연구에서는 Jang⁽²⁾등이 제안한 방법을 적용하여 유체 동압 베어링의 저널 및 스러스트 베어링의 그루브 깊이 변화에 따른 강성, 감쇠를 구하였다. 또한 Jang⁽⁵⁾⁽⁶⁾등이 제안한 방법을 적용하여 Fig. 1 과 같이 복잡한 형상을 가진 베이스(플랜지), 유연 회전 디스크를 포함하고 유체 동압 베어링으로 지지되는 유연 회전 디스크-스피들 시스템에 대한 고유 및 강제 진동 해석을 수행하고 유체 동압 베어링의 그루브 깊이 변화가 HDD 스피들 시스템의 동특성에 미치는 영향을 파악하였다.

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

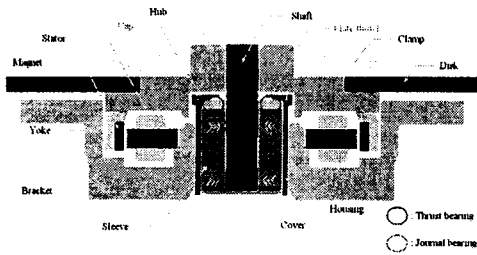


Fig. 1 Mechanical structure of a HDD spindle system with supporting structures

2. 유한 요소 해석

2.1 유체 동압 베어링 유한 요소 해석

회전체 시스템에서 유체 동압 베어링은 강성과 감쇠 항을 가진 요소로 모델링 할 수 있다. 이 연구에서는 Jang⁽²⁾ 이 제안한 방법을 3.5" 하드 디스크 드라이브에 사용되는 HDD 스피들 모터 시스템의 베어링에 적용하였다. Fig. 2 은 저널과 스러스트가 연성된 유체 동압 베어링의 유한 요소 모델을 나타낸다. 유체 동압 베어링은 하나의 스러스트 베어링과 두개의 저널 베어링으로 구성되어 있다. 저널 베어링의 슬리브에 빗살무늬 홈이 있고, 스러스트 베어링의 아래쪽 스러스트 패드에는 나선형 홈이 있고, 위쪽 스러스트 패드에는 빗살무늬 홈이 있다. 저널 베어링의 간극은 $2.5\mu\text{m}$, 스러스트 베어링의 간극은 $10\mu\text{m}$, 저널 베어링의 그루브 깊이가 $5\mu\text{m}$, 스러스트 베어링의 그루브 깊이가 $16\mu\text{m}$ 로 가정하였다. 전체

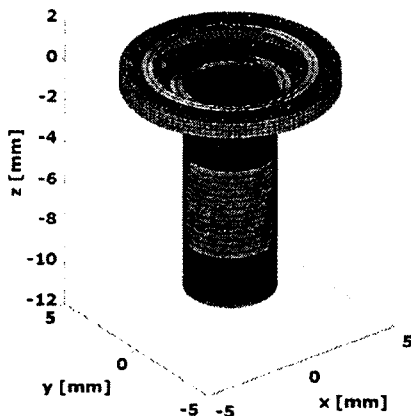


Fig. 2 Finite element model of the coupled journal and thrust bearing

유한 영역을 총 10020 개의 4 절점 사각형 요소로 나누어 모델링하였다. 그리고 기본 모델의 그루브 깊이를 100%로 하여 저널 그루브 깊이를 50% 증가 및 감소시킨 모델과 스러스트 그루브 깊이를 50% 증가 및 감소시킨 모델에 대하여 유체 동압 베어링 해석을 수행하였다.

2.2 HDD 스피들 시스템 유한 요소 해석

이 연구에서는 Jang⁽⁴⁾ 등이 제안한 방법을 적용하여 복잡한 형상의 지지 구조인 플랜지(flange)의 유연성을 고려하고 유체 동압 베어링으로 지지되는 HDD 유연 회전 디스크-스피들 시스템의 유한 요소 모델을 개발하였다. 유체 동압 베어링을 사용하는 HDD 스피들 시스템을 구성하는 주요 기계요소에는 크게 고속 회전하는 디스크, 허브(hub), 영구 자석, 요크(yoke), 스페이서(spacer)와 클램프(clamp)와 회전하지 않고 회전체 부분을 지지하는 스테이터, 플랜지, 하우징(housing) 그리고 유체 압력에 의해 회전체를 지지하는 유체 동압 베어링을 구성하는 부품인 슬리브와 스러스트 패드 등으로 구성되어 있다. Fig. 3 과 같이 플랜지, 스테이터와 유체 동압 베어링의 슬리브를 포함하는 HDD 스피들 시스템의 정지부는 4 절점 사면체 유한 요소로 분할하고, Fig. 4 와 같이 회전하는 스피들 시스템의 허브와 디스크는 6 자유도를 갖는 beam과 annular sector 요소로 분할하여, 회전부와 정지부의 기하학적 적합성(geometric compatibility)을 유지하였다. 그리고 유체 동압 베어링은 5 자유도의 강성 및 감쇠계수로 모델링 하였고 회전부와 정지부 사이에 기하학적 구속조건을 적용하였다.⁽⁷⁾

본 연구에서는 1 장의 3.5" 디스크를 장착하고 7200rpm으로 회전하는 HDD 스피들 시스템 모터이다, Table 1 은 이 시스템에 사용된 요소의 수와 형태를 나타내고 전체 요소수는 4120 개로 모델링하였

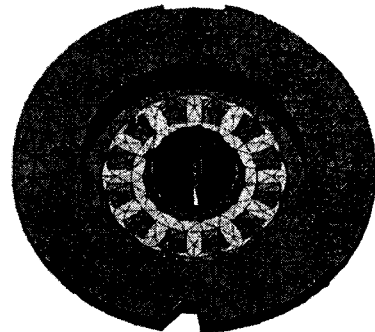


Fig. 3 Finite element model for supporting structures(flange, stator, housing, sleeve, cap and cover)

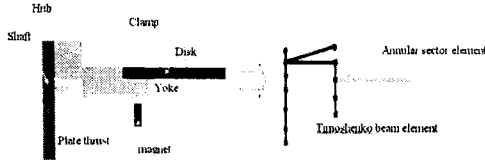


Fig. 4 Finite element model for rotating shaft, spindle and disk

Table 1 Finite element model of a HDD spindle system

Component		Element number	Element type
Supporting structure	Flange	2,216	Tetrahedron element
	Stator	490	
	Housing	724	
	Sleeve	316	
	Cap	136	
	Cover	200	
Disk - spindle	Shaft	18	Rotating Timoshenko beam element
	Plate thrust	2	
	Hub	12	
	Clamp	2	
	Yoke	2	
	Magnet	2	
	Disk	360	Annular Sector element

Table 2 Damped natural frequency and modes

Mode number	Mode shape	Damped natural frequency (Hz)	
		Experimental	Analysis
	HSW	-	67
	HSW	-	69
Mode 1b	Rocking	345	330
Mode 1f	Rocking	580	552
Mode 2	Axial	1112	1177
Mode 3b	Disk(0,2)	1080	1221
Mode 3f	Disk(0,2)	1581	1701
Mode 4b	Disk(0,3)	2113	2150
Mode 4f	Disk(0,3)	2828	2870

다. 이 연구에서 해석하고자 하는 HDD의 유연 회전 디스크-스핀들 시스템의 운동방정식은 자유도가 매우 크고 회전에 따른 자이로스코픽(gyroscopic) 항과 유체 동압 베어링의 비대칭 동특성 계수로 인해 비대칭 형태를 가지게 된다. 고유치 문제는 Arnoldi 반복법을 사용하여 풀면 고유치와 고유 벡터를 구할 수 있다.⁽⁸⁾

이 해석의 타당성을 검증하기 위하여 충격 해머(impact hammer)를 이용한 모달 실험(modal testing)을 수행하였다. Table 2 는 해석 및 실험 결과를 나타내며, 실험 결과를 해석 결과와 비교하였을 때 잘 일치함을 알 수 있다.

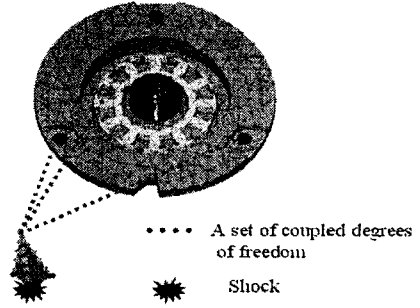


Fig. 5 Finite element model of a 2.5" HDD on the mounting table for shock simulation

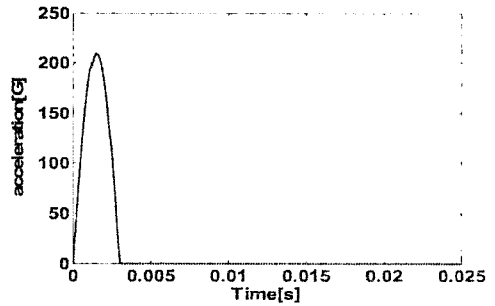


Fig. 6 Half-sinusoidal shock

2.3 HDD 스피들 시스템의 강제 진동 해석

Jang⁽⁵⁾ 등이 제안한 방법을 적용하여 유한 요소법과 모드 중첩법을 이용하여 복잡한 형상을 가진 베이스(플랜지)를 포함하고 유체 동압 베어링으로 지지되는 유연 회전 디스크-스핀들 시스템이 Fig 5 에서와 같이 플랜지가 tetrahedron으로 표현된 지그에 결합되어 가진되어 진다고 가정하였다. 해석된 고유진동수와 고유 진동 벡터 중 공역 복소적인 100 개의 고유진동수와 고유진동벡터를 모드중첩법에 적용하여 가진응답을 해석하였다. 충격 응답 해석은 2ms, 300G Half-sine으로 지그를 가진하고 디스크에서 응답을 받았다.

3. FDB 설계 변화에 따른 HDD 스피들 시스템 동특성 해석 결과 및 고찰

3.1 FDB 설계 변화에 따른 FDB 해석

기본 모델에 대해서 저널과 스러스트 베어링의 그루브 깊이를 50% 감소한 경우와, 저널과 스러스트 베어링의 그루브 깊이를 50% 증가한 경우에 대해 부상높이, 강성, 감쇠를 구하였다. Table 3 은 각각의 경우에 대한 부상높이를 나타낸다. 저널 베어링의

그루브 깊이가 증가할수록 매우 적게 부상높이가 낮

Table 3 Flying height due to the groove-depth variation

Flying height (μm)	Groove depth(%)		
	50	100	150
Journal	12.442	12.409	12.384
Thrust	11.244	12.409	13.374

Table 4 Stiffness coefficients due to the groove-depth variation of journal bearing

Stiffness (N/m)	Groove depth(%)		
	50	100	150
Kxx	2.5712E+07	2.4165E+07	1.5435E+07
Kyy	2.6287E+07	2.4008E+07	1.5401E+07
Kzz	6.9369E+05	6.9166E+05	6.8765E+05

Table 6 Stiffness coefficients due to the groove-depth variation of thrust bearing

Stiffness (N/m)	Groove depth(%)		
	50	100	150
Kxx	2.4165E+07	2.4165E+07	2.4165E+07
Kyy	2.4008E+07	2.4008E+07	2.4008E+07
Kzz	6.9928E+05	6.9166E+05	4.8478E+05

Table 8 Damped natural frequency due to the journal groove-depth variation of journal bearing

Mode Number	Mode shape	50%		100%		150%	
		Modal damping ratio(%)	Damped natural frequency (Hz)	Modal damping ratio(%)	Damped natural frequency (Hz)	Modal damping ratio(%)	Damped natural frequency (Hz)
	HSW	45.40	62.73	51.35	67.32	55.72	67.06
	HSW	68.58	63.77	78.05	69.53	85.39	68.17
Mode 1b	Rocking	10.47	337.46	10.73	336.31	13.38	334.85
Mode 1f	Rocking	12.79	559.80	12.82	558.90	15.07	557.71
Mode 2	Axial	84.73	1178.26	84.11	1178.25	84.03	1178.50
Mode 3b	Disk(0,2)	8.61E-09	1221.26	4.17E-08	1221.26	5.40E-09	1221.26
Mode 3f	Disk(0,2)	1.74E-08	1701.26	8.14E-08	1701.26	1.09E-08	1701.26
Mode 4b	Disk(0,3)	1.62E-07	2150.19	2.76E-08	2150.19	1.54E-06	2150.19
Mode 4f	Disk(0,3)	3.04E-07	2870.19	7.30E-08	2870.19	2.72E-06	2870.19

Table 9 Damped natural frequency due to the thrust groove-depth variation of thrust bearing

Mode number	Mode shape	50%		100%		150%	
		Modal damping ratio(%)	Damped natural frequency (Hz)	Modal damping ratio(%)	Damped natural frequency (Hz)	Modal damping ratio(%)	Damped natural frequency (Hz)
	HSW	51.36	67.31	51.35	67.32	51.36	67.32
	HSW	78.04	69.54	78.05	69.53	78.05	69.53
Mode 1b	Rocking	10.81	336.34	10.73	336.31	10.65	336.29
Mode 1f	Rocking	12.92	558.95	12.82	558.90	12.70	558.88
Mode 2	Axial	63.47	1177.00	84.11	1178.25	91.36	1184.02
Mode 3b	Disk(0,2)	4.73E-10	1221.26	4.17E-08	1221.26	4.62E-	1221.26
Mode 3f	Disk(0,2)	7.91E-10	1701.26	8.14E-08	1701.26	8.98E-	1701.26
Mode 4b	Disk(0,3)	5.50E-07	2150.19	2.76E-08	2150.19	5.92E-	2150.19
Mode 4f	Disk(0,3)	9.77E-05	2870.19	7.30E-08	2870.19	1.30E-	2870.19

아지만, 스러스트 베어링 그루브 깊이가 증가할수록 부상높이가 증가하는 것을 알 수 있다, 부상 높이는 반경 방향 하중을 지지하는 저널 베어링보다 축 방향 하중을 지지하는 스러스트 베어링의 변화에 더 영향을 많이 받음을 알 수 있다.

Table 4, 5, 6, 7 은 저널, 스러스트 베어링 그루브 깊이가 변화에 따른 강성, 감쇠를 나타낸다. 저널 베

Table 5 Damping coefficients due to the groove-depth variation of journal bearing

Damping (Ns/m)	Groove depth(%)		
	50	100	150
Cxx	1.1198E+05	6.3325E+04	3.7465E+04
Cyy	1.1272E+05	6.3467E+04	3.7515E+04
Czz	1.3107E+03	1.3198E+03	1.3214E+03

Table 7 Damping coefficients due to the groove-depth variation of thrust bearing

Damping (Ns/m)	Groove depth(%)		
	50	100	150
Cxx	6.3326E+04	6.3325E+04	6.3323E+04
Cyy	6.3467E+04	6.3467E+04	6.3464E+04
Czz	1.7371E+03	1.3198E+03	9.8560E+02

어령의 그루브 깊이가 증가할수록 반경 방향의 강성 및 감쇠는 감소하는 경향을 나타내고, 축 방향 강성은 매우 적게 감소하고, 감쇠는 약간 증가하는 경향을 보인다. 스러스트 베어링의 그루브 깊이가 증가하여도 반경 방향의 강성 및 감쇠는 변화가 없고, 축 방향 강성 및 감쇠는 감소하는 경향을 나타낸다. 베어링의 그루브 깊이가 감소할수록 강성 및 감쇠가 증가하는 것은 회전부와 정지부 사이의 평균 유막 두께가 감소하여 높은 압력이 발생하기 때문이다. 또한 본 연구에서 사용된 유체 동압 베어링의 저널부의 각각이 스러스트부보다 훨씬 적어, 저널의 평균 유막 두께의 변화가 스러스트에는 많은 영향을 미치지만, 스러스트의 평균 유막 두께의 변화는 저널부의 압력에 상대적으로 영향을 덜 미치는 것으로 사료된다.

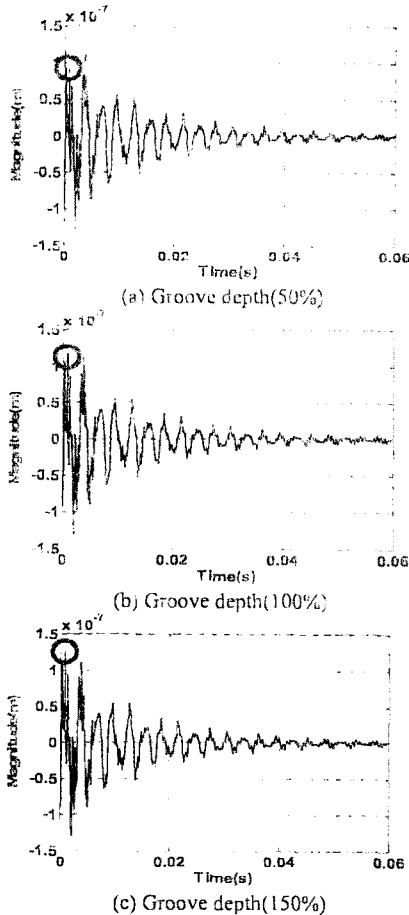


Fig. 7 Radial displacement of the disk due to radial excitation for the groove-depth variation of the journal bearing

3.2 FDB 설계 변화에 따른 고유 진동 해석

Table 8 은 저널 베어링의 그루브 깊이 변화에 따른 HDD 스핀들 시스템의 고유 진동 결과이다. Table 8 에서 저널 베어링의 그루브 깊이 변화가 Half-speed whirl 과 rocking 모드에 특히 영향을 미침을 알 수 있고, 저널 베어링 그루브의 깊이가 증가할수록 rocking 모드 주파수가 감소하는 경향을 보인다. 본 연구에서는 고유진동 해석시의 강성 행렬값을 고찰하여, 저널 베어링의 강성 수준이 저널 구조의 강성과 비슷한 것을 확인하였다. 또한 1 자유도 시스템의 damped natural frequency 는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (1)$$

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{mk}} \quad (2)$$

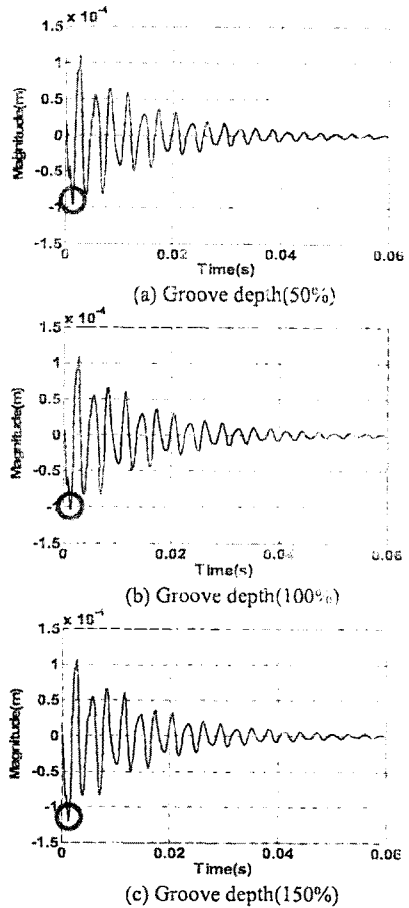


Fig. 8 Axial displacement of the disk due to axial excitation for the groove-depth variation of thrust bearing groove depth

Table 10 Displacement of the disk due to excitation for the groove-depth variation

Displacement (μm)	Groove depth(%)		
	50	100	150
Journal	0.0959	0.1161	0.1262
Thrust	94.813	103.70	119.94

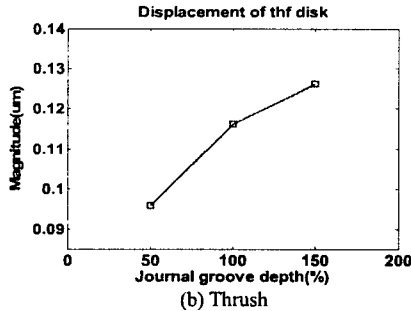
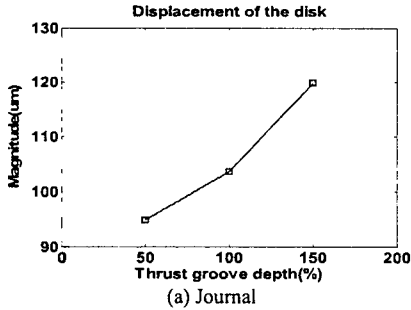


Fig. 9 Displacement of the disk due to excitation for the groove-depth variation

따라서 Table 4 에 나타난 것과 같이 저널 베어링의 그루브 깊이가 증가할수록 저널 베어링의 강성이 감소하여 모달감쇠비가 증가하여 rocking 고유 주파수가 조금씩 감소함을 알 수 있다.

Table 9 는 스러스트 베어링의 그루브 깊이가 증가할수록 axial 모드의 주파수가 증가하는 경향을 나타낸다. Table 4 와 6 에 나타난 것과 같이 스러스트 베어링의 강성은 저널에 비해 매우 작으므로, 스러스트 그루브의 깊이 증가에 따라 감쇠 감소가 axial 모드의 주파수에 영향을 미쳐 axial 모드의 주파수가 증가한다. 그리고 저널과 스러스트 베어링의 그루브 깊이가 변화가 순수 디스크 모드에는 영향이 없음을 알 수 있다.

3.3 FDB 설계 변화에 따른 강제 진동 해석

Fig. 7 은 2ms, 300G 의 가진력으로 지지부를 반경 방향으로 가진하고 디스크의 중앙에서 반경 방향의 응답을 저널 베어링 그루브 깊이가 변화에 따른 충

응답 결과를 나타낸다. Fig 7 에서 저널 베어링의 그루브 깊이가 증가할수록 첫번째로 나타나는 디스크의 최대 변위가 증가하는 경향을 보이고 있는데 유체 동압 베어링 해석 결과에서 보듯이 그루브 깊이가 증가하면 유막 두께의 증가로 강성과 감쇠가 감소하기 때문에 변위가 증가하게 된다.

Fig. 8 는 2ms, 300G 의 가진력으로 지지부를 축 방향으로 가진하고 디스크의 중앙에서 축 방향의 응답을 스러스트 베어링 그루브 깊이가 변화에 따른 충격응답 결과를 나타낸다. Fig. 8 에서도 스러스트 베어링의 그루브 깊이가 증가할수록 첫번째로 나타나는 디스크의 최대 변위가 증가하는 경향을 보이고 있는데 그루브 깊이가 증가하면 유막 두께의 증가로 강성과 감쇠가 감소하기 때문에 변위가 증가하게 된다. 첫번째 peak 의 값을 Table 10 과 Fig. 9 에 각각 표와 그림으로 나타내었다.

4. 결론

본 연구에서는 Jang⁽²⁾ 등이 제안한 방법으로 유체 동압 베어링 설계 변수 변화에 따른 베어링을 해석하였다. 또한 Jang⁽⁶⁾ 등이 제안한 방법으로 HDD 스피들 시스템의 고유 및 강제 진동 해석을 하여, 유체 동압 베어링 설계 변수 변화에 따른 베어링 동특성 변화가 HDD 스피들 시스템의 동특성에 미치는 영향을 해석하였다.

HDD 스피들 시스템의 rocking 고유 주파수는 저널베어링의 강성 계수에 영향을 받고, axial 고유 주파수는 스러스트 베어링의 감쇠 계수의 영향을 주로 받는 것을 알 수 있고, 이를 활용하여 충격에 강한 HDD 를 설계하는데 활용될 수 있으리라 사료된다.

참고 문헌

- (1) G. H. Jang and 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, pp.499-505.
- (2) G. H. Jang and S. H. Lee, 2006, " Determination of the dynamic coefficients of the coupled journal and thrust bearing by the perturbation method", Tribology letters, vol.22, pp. 239-246
- (3) Jintanawan, T., Shen, I. Y. and Ku, C.-P. R., 1999, " Free and Forced Vibrations of a Rotating Disk Pack and Spindle Motor System with Hydrodynamic Bearings", J. Info. Storage Proc. Syst., vol. 1, pp. 45-58.
- (4) G. H. Jang, M. S. Jung and S. H. Lee, 2002, " Free Vibration Analysis of a Spinning Flexible

Disk-Spindle System Supported by Ball Bearing and Flexible Shaft Using Finite Element Method and Substructure Synthesis", *J. Sound and Vibration*, vol.251(1), pp.59-78.

(5) G. H. Jang, J. H. Han and C. H. Seo, 2005, " Finite Element Modal Analysis of a Spinning Flexible Disk-Spindle System in a HDD Considering the Flexibility of Complicated Supporting Structure" , *Microsystem Technologies*, vol.11, no.7, pp. 488-498.

(6) G. H. Jang and C. H. Seo, 2007, " Finite element shock analysis of an operating hard disk drive considering the flexibility of a spinning disk-spindle, a head-suspension-actuator, and a supporting structure" , *IEEE Trans. Magn.*, vol.43

(7) Cook, R. D., Malkus, D. S., and Plesha, M. E., 1989, *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, 3rd edn. John Wiley & Sons

(8) Lehoucq, R. B. and Sorensen, D. C., 1996, " Deflation Techniques for an Implicitly Restarted Arnoldi Iteration" , *J. Matrix anal. Appl. SIAM*, pp. 789-821.