한국소음진동공학회지 제 9 권 제 6 호, pp. 1234~1239, 1999.

〈논 문〉

점탄성 댐핑 물질을 이용한 하드 디스크 드라이브의 NRRO저감

Reduction of Non-Repeatable Runout in a HDD Using Visco-elastic Damping Material

장건희* · 홍선주** · 한재혁*** · 김동균***
Gunhee Jang, Seonju Hong, Jeahyuk Han and Dongkyun Kim

(1999년 9월 7일 접수 ; 1999년 10월 30일 심사완료)

Key Words : Nonrepeatable Runout(비반복적 런아웃), Hard Disk Drive(하드 디스크 드라이브), Visco-Elastic Damping Material(점탄성 댐핑 물질), FEM(유한요소법), Modal Testing(모드 실험), Runout Analysis(런아웃 해석)

ABSTRACT

This research investigates the characteristics of NRRO in a 2.5″ HDD by using FEM, modal testing and runout analysis, and reduces NRRO using visco-elastic damping material. Most frequency components of NRRO are generated by the defects of ball and rotating race, and they can be determined by the kinematic analysis of ball bearing. It also proposes the novel design of a spindle motor that can reduce NRRO effectively by inserting the visco-elastic damping material to one of the transmission path of NRRO, i.e. where the strain energy is highly concentrated. By this technique, NRRO is reduced by 27%.

1. 서 론

하드 디스크 드라이브(hard disk drive 이하HDD)의 디스크 자기 기록 밀도(magnetic track density)를 증대 시키기 위해서는 서보 제어 기능의 향상과 헤드를 포함한 스핀들 회전축계의 진동 저감이 필요하다. 스핀들 회전축계의 진동에 의해 발생하는 디스크 런아웃은 디스크 상의 데이터가 기록되어 있는 트랙과 헤드 사이의 위치 혹은 변위의 차이를 가리키며 디스크 런아웃을 TIR(total indicated runout)이라 할 때, TIR은 회전 주기마다 반복되는 성분인 RRO(repeatable runout)와 비반복적인 성분인 NRRO (non-repeatable runout)로 구분할 수 있다. 이중 NRRO는 서보 제어 시스템에 의해 보상될 수 없기 때문에 디스크의 자기 기록 밀도를 제한하는 중요한 요소로서 NRRO를 저감하면 자기 기록 밀도를 효과적으로 증대시킬 수 있다.

NRRO에 관한 연구는 미세한 NRRO(0.1 μm정도)를 측정하는 방법과 발생 원인에 관한 연구가 주로 이루어졌다. Klein[1]은 반경 방향의 NRRO측정 시스템을 개발하여 NRRO를 측정하고 이를 스핀들 모터의 검증 시스템으로 사용하였다. Ohmi[2]는 시뮬레이션을 통해 스핀들 모터의 NRRO와 head tracking error 사이의 관계를 연구하였다. 그리고 Ono 등[3]은 캠벨 선도를 이용하여 RRO와 NRRO를 해석하였고 NRRO 주파수 성분의 통계적 특성을 연구하였다. 또한 Jang 등[4~6]은 런아웃을 주파수 영역에서 해석하여 간단하게 NRRO 측정을 할 수 있는 신주파수영역법을 제시하고 볼베어링에서 발생한 NRRO가 스핀들 모터와 디스크를 통해 전달되어 증폭되는 과정 및 특성을 실험을 통해 분석하였다.

* 정회원, 한양대학교 공과대학 정밀기계공학과
** 한라공조
*** 정회원, 한양대학교 대학원

본 연구에서는 유한 요소법과 모드 실험을 통해 2.5″ HDD의 동특성을 해석하고 런아웃을 측정,분석하였다. 그리고 볼베어링에서 발생한 NRRO진동 성분이 모터와 디스크에 전달되는 경로 중에서 변형에너지가 집중되는 곳에 점탄성 댐핑 물질을 삽입하여, NRRO를 효과적으로 저감 시킬 수 있는 방법을 제시하고 이를 실험으로 확인하였다.

2. HDD 스핀들 시스템의 동특성 해석

본 연구에서는 HDD 스핀들 시스템의 동특성을 해석하기 위해 유한 요소 해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 FEM 모델을 개발하였다. Fig. 1은 본 연구에서 개발한 2.5″ HDD의 FEM 모델이다. 2.5″ HDD의 주요 요소들은 약 29,600여개의 요소로 모델링하였으며 특히 알루미늄 재질의 베이스 플레이트는 형상이 매우 복잡하여, 약 24,300개의 solid element로 모델링하였다. 본 모델의 볼베어링은 내륜 회전 형식으로 4.4145 N의 예압을 받고 있으며, 볼은 스프링 요소로 모델링 하였다. 강성 계수, 접촉각은 본 연구실에서 개발한 볼베어링 해석 프로그램인 WinBAP에서 얻은 결과를 사용하였다.

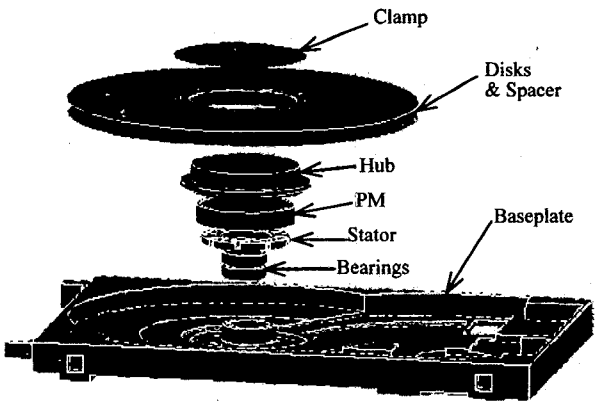

Fig. 1 FEM model of a 2.5" HDD

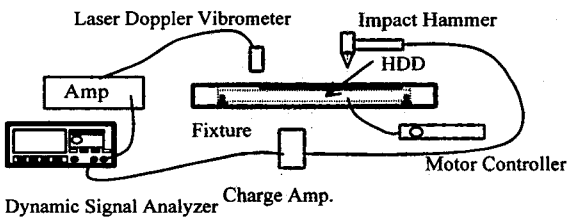

Fig. 2 Model testing setup

FEM 모델의 타당성을 검증하기 위하여 Fig. 2와 같은 실험 장치를 구성하고, 모드 실험을 통해 HDD 스핀들 시스템의 고유 진동수를 측정하였다. Table 1은 모드 실험 결과와 ANSYS 해석 결과를 비교한 것으로 두 결과가 잘 일치함을 알 수 있고 이것으로 FEM model이 타당함을 알 수 있다. Fig. 3은 HDD의 회전 속도를 5 Hz씩 증가 시켜가면서 측정한 주파수 응답 함수를 waterfall plot으로 나타낸 것이다. 1, 2번 모드는 베이스 플레이트의 모드가 지배적인 모드들로 각각 rocking 모드와 axial 모드이고 3, 4, 5번 모드는 디스크 모드에 의한 것임을 확인하였다. 여기서 3, 4번 모드는 각각 절점 직경과 절점 원이 하나인 모드이고 5번은 절점 직경이 두개인 모드이다. 이들 모드의 분석을 통해 rocking 모드(1번)와 절점 직경이 있는 디스크 모드(3, 5번)는 고유 주파

Table 1 Natural frequencies of a 2.5″ HDD

Number	Experiment(Hz)	ANSYS(Hz)	Error(%)
1	548	579.60	5.45
2	568	592.55	4.14
3	688	716.88	4.05
4	1056	1079.99	2.22
5	1056	1085.26	2.70
6	1056	1091.05	3.21
7	1394	1292.47	-7.86
8	1394	1299.87	-7.24

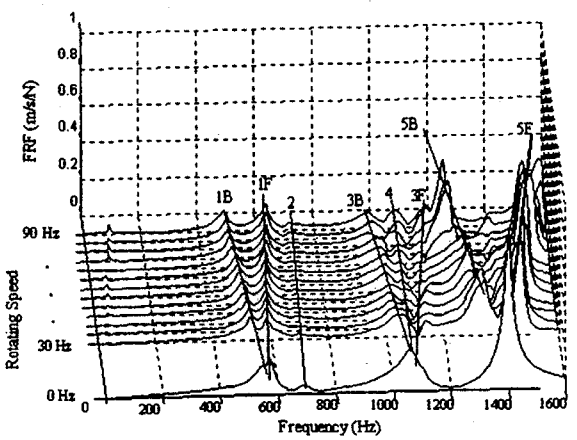

Fig. 3 Waterfall plot of a 2.5" HDD

수의 분리 현상을 보여 주지만, axial 모드(2번)와 절점 원이 있는 디스크 모드(4번)는 속도 변화에 따른 고유 주파수의 분리 현상이 나타나지 않음을 확인하였다.

3. NRRO 측정 및 해석

Fig. 4는 정격 회전 속도 70 Hz의 2.5″ HDD의 런아웃을 측정하기 위한 시스템이다. 축 방향 변위 센서는 정전 용량 센서로서 분해능(resolution)은 12.7 nm이다. 런아웃은 모터 콘트롤러에서 나오는 전기적 신호(index signal)을 이용하여 모터 1회전 주기를 128섹터로 나누면서 모터가 128회전할 때까지의 변위를 측정하여 얻어졌다. 측정된 런아웃으로부터 RRO와 NRRO를 계산하는 방법은 신주파수영역법을 사용하였다[4].

Fig. 5는 변위 센서에서 측정된 디스크 런아웃(TIR)으로부터 RRO와 NRRO를 구한 것이며 각각에 대한 peak-to-peak 값과 표준 편차는 Table 2와 같다. NRRO의 peak-to-peak값과 표준 편차는 각각 0.815 μm, 0.101 μm이다. Fig. 6은 NRRO의 히스토그램이며, 실선은 NRRO에서 구한 평균과 표준편차를 가지는 정규 분포이다. NRRO의 분포가 정규 분포에 가까우며 평균은 0임을 알 수 있다.

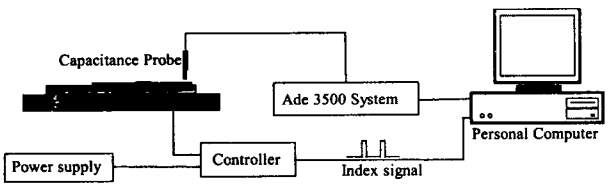

Fig. 4 Runout mesurement system

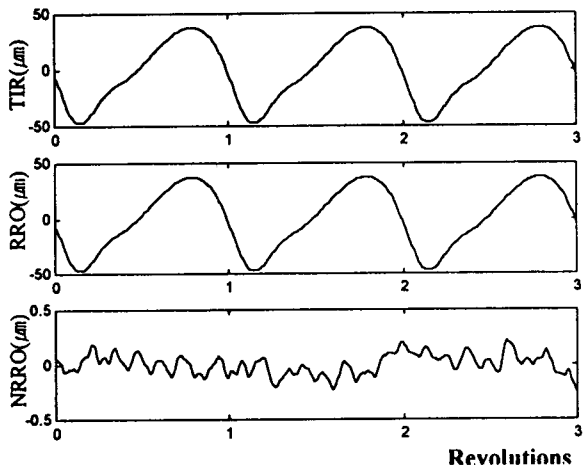

Fig. 5 Runout of a 2.5" HDD

NRRO는 모터를 지지하고 있는 베어링 요소의 결함이 모터가 회전할 때 강제 진동을 일으켜 생기는 것으로 알려져 있다. 본 연구에 사용된 내륜 회전형식의 볼베어링에서 발생할 수 있는 가진 주파수들은 Table 3과 같이 기본 결함 주파수(f_c, f_{ci}, f_R) 들의 조합으로 나타낼 수 있다[7].

Fig. 7은 NRRO의 캠벨 선도로서 모터의 회전 속도를 65 Hz에서 85 Hz까지 5 Hz씩 증가 시키면서 측정한 NRRO의 주파수 성분을 표시한 것이다. 캠벨 선도에서 원의 크기는 NRRO 주파수 성분의 크기를 의미하며, 실선은 베어링의 결함 주파수를 나타내는 것이다. 그리고 화살표 끝의 숫자는 Table 5에서 사용될 색인이다. Fig. 7에서 대부분의 NRRO 주파수는 베어링 결함 주파수에 의해 설명되고 있다. 따라서 NRRO가 주로 베어링 결함에 의한 가진에 의해 발생함을 알 수 있다. 특히 볼베어링의 내륜과 볼의 결함에 의해 발생하는 NRRO가 많음을 볼 수 있는데(Table 5 참조) 이는 회전하는 내륜과 볼이 고정되어 있는 외륜보다 결함에 의한 가진이 생길 가능성이 높고, 볼과 내륜의 접촉에 의한 가진력은 변위 측정 대상인 허브에 직접 전달되는 반면 볼과 외륜에 의한 가진력은 볼의 운동에 의해 어느 정도 흡수된 후 전달되므로 회전축계의 진동에 미치는 영향이 적기 때문이다[4]. 또한 고유 주파수 주변

Table 2 Statistical properties of a 2.5″ HDD runout

	pk-pk (μm)	σ (μm)
TIR	85.110	27.795
RRO	84.595	27.795
NRRO	0.815	0.101

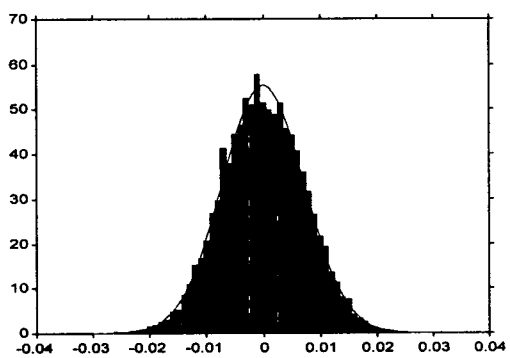

Fig. 6 Probability density function of NRRO

Table 3 Defect frequencies and their sources of ball bearing

Sources	Defect frequency
Inner race defect or waviness (IR)	pnf_{ci} $pnf_{ci} \pm qf_i$
Outer race defect or waviness (OR)	pnf_c $pnf_c \pm qf_i$
Irregularity of ball (IB)	$2pf_R \pm qf_c$ $2pf_R + f_c - qf_i$
Difference of ball diameter (BD)	pf_c

f_i : Rotational frequency of inner race
f_c : Rotational frequency of cage
f_{ci} : Rotational frequency of inner race relative to cage $(f_i - f_c)$
f_R : Spin frequency of ball
n : Number of ball
p, q : positive integer

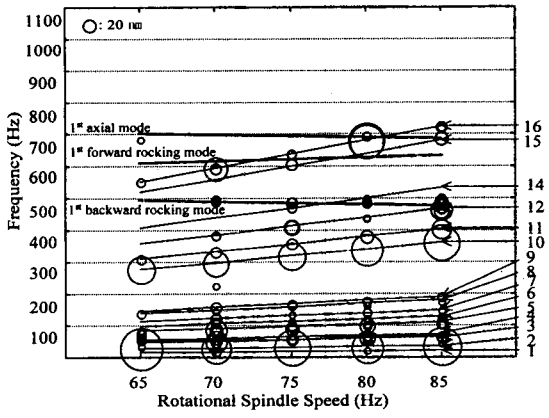

Fig. 7 Campbell diagram of a 2.5" HDD NRRO

에서 공진에 의하여 NRRO가 커짐을 알 수 있다.

4. 점탄성 댐핑 물질을 이용한 NRRO 저감

3절에서 확인된 바와 같이 NRRO는 주로 볼베어링 결함에 의한 가진에 의해 생긴다. 그러므로 볼베어링에서 발생한 NRRO 진동 성분이 모터와 디스크에 전달되는 경로에 댐핑 물질을 삽입하여 그 진동을 차단, 흡수한다면 NRRO를 줄일 수 있다. 볼베어링에서 발생한 진동은 Fig. 8과 같이 베어링 내륜과 외륜 그리고 허브를 통해 디스크에 전달된다. 또한 댐핑에 의한 진동의 차단, 흡수 효과를 극대화 시키

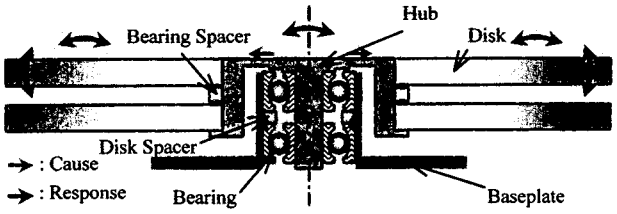

Fig. 8 Transmission of NRRO

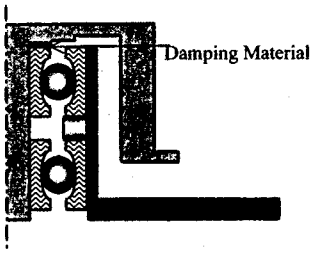

Fig. 9 Upper bearing damping (U.B.D)

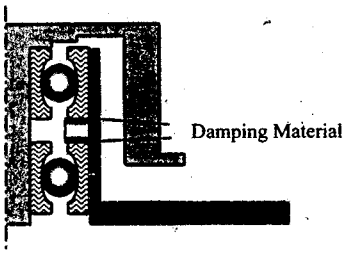

Fig. 10 Bearing spacer damping (B.S.D)

려면 변형 에너지가 집중된 곳에 댐핑 물질을 삽입하여야 한다. NRRO의 전달 경로 중에서는 허브와 상부 베어링 내륜의 접촉부, 베어링 외륜과 베어링 스페이서 사이에 변형 에너지가 집중되어 있음을 유한 요소 해석을 통해 확인하였다. 본 연구에서는 베어링에서 발생한 진동의 전달 경로와 모터내의 변형 에너지 분포를 고려하여 Fig. 9 그리고 Fig. 10과 같이 허브와 상부 베어링 내륜 사이(upper bearing damping: U.B.D.), 베어링 스페이서와 외륜사이에 (bearing spacer damping: B.S.D.) 댐핑 물질을 삽입하였다.

본 연구의 대상체는 2.5" 노트북용 하드디스크 드라이브로서 댐핑 물질을 삽입할 공간 확보가 어려우므로 소형 제작이 가능한 형태의 댐핑 물질을 사용해야 한다. 또한 댐핑 물질은 스핀들 모터의 작동 온도에서 댐핑 특성을 유지할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 이와 같은 조건들을 고려하여 두께 0.125 mm인 테이프 형태의 점탄성 댐핑 물질을 사용하였

다. Fig. 11은 사용된 점탄성 댐핑 물질의 온도와 주파수 변화에 따른 물성치를 나타낸다.

Table 4는 70 Hz로 회전할 때 발생하는 NRRO의 peak-to-peak 값과 표준 편차를 비교한 것이다. 괄호 안의 수치는 양품을 기준으로 하였을 때의 NRRO저감율을 나타낸다. U.B.D.의 경우 NRRO가 peak-to-peak 값은 12.4%, 표준편차는 4.0% 감소하였으며,

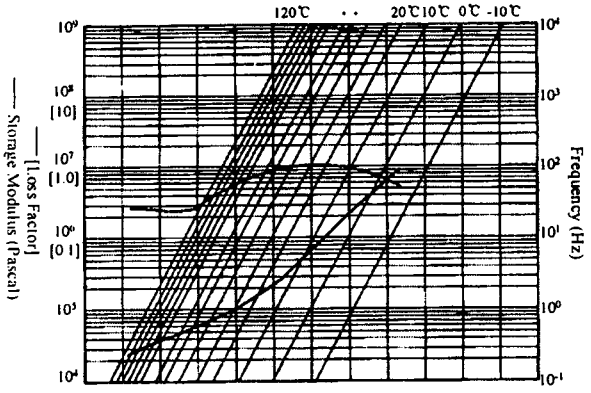

Fig. 11 Monograph of visco-elastic damping material

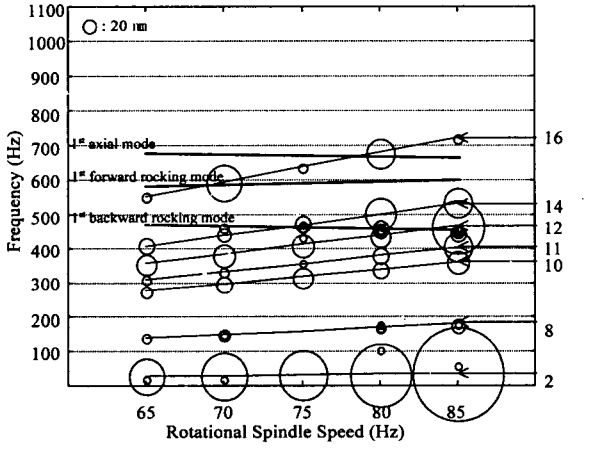

Fig. 12 Campbell diagram of NRRO in case of U.B.D.

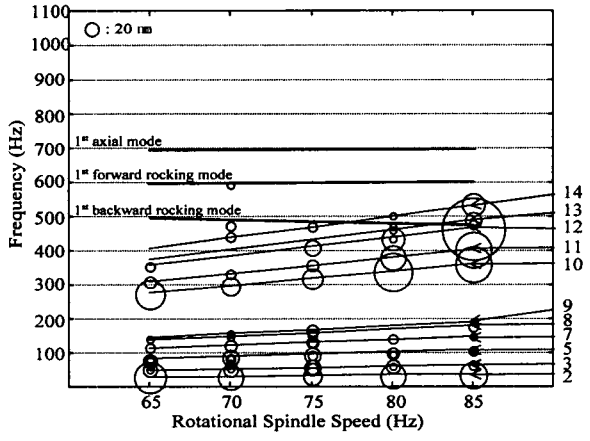

Fig. 13 Campbell diagram of NRRO in case of B.S.D.

Table 4 Comparison of the statistical properties of NRRO

	pk-pk (μm)	σ (μm)
No damp	0.815	0.101
U.B.D.	0.714 (-12.4%)	0.097 (-4.0%)
B.S.D.	0.598 (-26.6%)	0.081 (-19.8%)

Table 5 Comparison of source and magnitude of NRRO (unit:nm)

Index	Cause	Defect frequency (Hz)	No damp	U.B.D	B.S.D
1	OR	$f_c - 4f_i$ (17.45)	12.2	0	0
2	BD	f_c (29.75)	42.6	65.4	35.1
3	IR	$f_{ci} - 5f_i$ (52.52)	17.3	0	20.2
4	BD	$2f_c$ (59.50)	11.9	0	0
5	BD	$3f_c$ (89.25)	18.7	0	21.1
6	IR	$2f_{ci} - 10f_i$ (105.03)	0	0	0
7	IR	$f_{ci} - 4f_i$ (122.52)	17.1	0	16.7
8	BD	$5f_c$ (148.74)	10.5	15.7	10.1
9	OR	$f_c - 2f_i$ (157.48)	18.0	0	11.7
10	BD	$10f_c$ (297.48)	38.4	23.5	24.6
11	IR	$f_{ci} - f_i$ (332.52)	15.2	12.4	14.3
12	IR	$2f_{ci} - 6f_i$ (385.03)	14.7	32.5	0
13	IR	$2f_{ci}$ (402.52)	0	0	0
14	OR	$f_c + 2f_i$ (437.48)	0	18.7	13.9
15	IB	$2f_r + f_c$ (559.29)	0	0	0
16	IR	$2f_{ci} - 3f_i$ (595.03)	35.8	50.3	0

IR : inner race defect OR : outer race defect
IB : irregularity of ball BD : difference of ball diameter

B.S.D.는 각각 26.6%, 19.8% 감소하였다.

Fig. 12와 13은 각각 U.B.D.와 B.S.D.를 적용한 HDD의 NRRO 캠벨 선도이다. U.B.D.와 B.S.D. 모두 양품의 캠벨 선도인 Fig. 7과 비교하여 볼 때 베어링 결함에 의한 가진 주파수의 개수가 많이 줄어들었음을 알 수 있다. 이로써 댐핑 물질이 베어링에 의한 가진 주파수들을 차단, 흡수하였음을 확인할 수 있다. B.S.D.의 경우에는 결함 주파수 개수가 줄어들었을 뿐 아니라 그 크기도 크게 줄어 U.B.D.보다 NRRO 저감 효과가 큼을 알 수 있다. 이것은 U.B.D.의 경우 상부 베어링에서 발생하는 진동만을 차단, 흡수하는 반면, B.S.D.은 상부와 하부 베어링에서 발생하는 진동을 모두 차단, 흡수할 수 있기 때문이다.

Table 5는 정격 속도 70 Hz 회전로 회전할 때 발생하는 NRRO의 발생 원인과 크기를 비교한 것이다. Table 5에서 댐핑 물질을 삽입한 경우를 양품과 비교해 볼 때 NRRO가 주로 약 300 Hz 이하에서 감소하였음을 알 수 있다. 이는 주파수가 높아질수록 댐핑 물질의 loss factor가 작아져서 진동의 차단 및 흡수 효과가 떨어지기 때문이다. 또한 U.B.D.의 경우, NRRO저감의 효과가 나타나는 300 Hz 이하에서, 내륜에 의한 NRRO성분이 많이 줄었음을 볼 수 있는데 이는 U.B.D.가 내륜에서 발생하는 NRRO를 직접 감쇠 시킬 수 있는 위치에 있기 때문이다.

5. 결 론

본 연구에서는 NRRO 저감을 통해 HDD의 자기 기록 밀도를 증대 시키고자 유한 요소법과 모드 실험을 통해 2.5″ HDD의 동특성을 해석하고 런아웃을 측정,분석하였다. 이를 통해 NRRO의 원인이 주로 볼 베어링의 결함에 의한 가진에 있으며 가진이 HDD시스템의 고유 주파수 근처에서 이루어지면 공진에 의해 NRRO가 커짐을 확인하였다.

또한 NRRO의 원인인 볼베어링에서 발생하는 NRRO 진동 성분이 모터와 디스크에 전달되는 경로 중에서, 유한 요소 해석을 통해 밝혀진 변형 에너지 집중부인 허브와 상부 베어링 내륜 사이, 그리고 베어링 스페이서와 외륜 사이에 점탄성 댐핑 물질을 삽입하였다. 이를 통해 댐핑 물질이 볼베어링 가진의 전달을 차단, 흡수하게 함으로써 NRRO를 효과적으로 저감시킬 수 있었다. 특히 베어링 스페이서 사이에 댐핑물질을 삽입한 경우 상부 베어링과 하부 베어링에서 발생하는 가진을 모두 차단, 흡수할 수 있기 때문에 저감 효과가 더 우수하였다. 그리고 상부 베어링 내륜에 댐핑물질을 삽입한 경우는 내륜에서 발생하는 NRRO를 직접적으로 차단, 흡수할 수 있기 때문에 내륜에서 발생하는 NRRO에 대한 저감 효과가 컸다.

후 기

본 연구를 위해 스핀들 모터를 제작하여 주신 삼성전기 정밀사업부 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) Klein, E. J., Sept. 1987, "The Asynchronous Runout of Spindles", Mechanical Signature Analysis, Machinery Vibration, Flow-Induced Vibration and Acoustic Noise Analysis, ASME, -De-Vol .7, pp. 95~99.

(2) Ohmi, T., 1996, "Non-repeatable Runout of Ball-Bearing Spindle-Motor for 2.5″ HDD", IEEE Trans. Magn., Vol. 32, No. 3, pp. 1715~1720.

(3) Ono, K., Saiki, N., Sanada, Y. and Kumano, A., 1991, "Analysis of Nonrepeatable Radial Vibration of Magnetic Disk Spindles", Trans. ASME Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 133, pp. 292~298.

(4) Jang, G. H., Kim, D. K., and Oh, J. E., March 1999, "New Frequency Domain Method of Nonrepeatable Runout Measurement in a Hard Disk Drive Spindle Motor", IEEE Trans. Magn., Vol. 35, No. 2, pp. 833~838.

(5) 장건희, 김동균, 한재혁, 1998, "컴퓨터 하드 디스크 드라이브 스핀들 모터의 런아웃 측정 및 해석", 대한기계학회논문집 A권, 제 22 권, 제 8 호, pp. 1533~1541.

(6) 장건희, 홍선주, 한재혁, 1998, "볼베어링 가진에 의한 HDD 스핀들계의 진동 특성 해석", 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, pp. 300~306.

(7) Jang, G. H., Jung, D. K., Park, N. Y., and Park, J. S., 1996, "Analysis of the Dynamic Characteristics of Ball Bearing in 3.5″ HDD Spindle Motor", Proceedings of Incremental Motion Control Systems and Devices, pp. 167~174.