

볼 베어링에 의해 발생하는 HDD 회전축계 NRRO의 온도 상승에 따른 변화[#]

Analysis of NRRO Caused by Ball Bearing in a HDD Spindle System at Elevated Temperature

김 동 균* · 장 건 회[†]

D. K. Kim and G. H. Jang

(2004년 2월 19일 접수 : 2004년 6월 17일 심사완료)

Key Words : Temperature(온도), Ball Bearing(볼 베어링), HDD(하드 디스크 드라이브), NRRO(비반복적 런아웃)

ABSTRACT

This research investigates the non-repeatable runout (NRRO) of a HDD spindle system at elevated temperature by analyzing the characteristics of a ball bearing and the natural vibration characteristics of a HDD spindle system due to the effect of elevated temperature. It shows that the elevated temperature results in the increase of the contact angle and the decrease of the deformation of the ball bearing in a HDD spindle system. The variation of bearing frequencies, which are dependent on the cosine function of contact angle, is almost negligible at elevated temperature. However, the decrease of bearing deformation at elevated temperature reduces the stiffness of the ball bearing and the natural frequencies of a HDD spindle system consequently. The latter has a significant effect on the amplitude and the frequency distribution of NRRO at elevated temperature.

1. 서 론

하드 디스크 드라이브(hard disk drive, 이하 HDD) 회전축계에서 발생하는 진동(TIR, total indicated runout)은 HDD 회전 주기마다 반복되는 성분(RRO, repeatable runout)과 반복되지 않는 성분(NRRO, non-repeatable runout)으로 나눌 수 있다. RRO와 달리 NRRO는 제어 시스템에 의해 보상될 수 없기 때문에 HDD의 자기 기록 밀도를 제한하는 중요한 요소이다.

볼 베어링으로 지지되는 HDD 회전축계에서 NRRO에 가장 직접적인 영향을 미치는 것은 스피들 모터의 회전 운동을 지지하는 볼 베어링이다. 볼 베어링의 기하학적 결함에 의한 가진은 NRRO의 주요 원인이며, 볼 베어링의 강성은 HDD 회전축계의 강성을 결정하는 주요 요소로서 HDD 회전축계 고유 진동 특성에 영향을 주기 때문이다. HDD 제조업체에서는 NRRO를 줄이기 위해 HDD 회전축계의 고유 진동수가 베어링 가진 주파수와 일치하지 않도록 설계하고 있다. 그러나 실제 HDD 내부의 작동 온도는 상온에서 작동 시 최고 80 °C까지 상승하고 이러한 온도 상승은 볼 베어링 특성을 변화시켜 베어링 가진 주파수와 HDD 회전축계 고유 진동수에 영향을 주게 된다. 따라서 온도가 상승하면 베어링 가진 주파수와 HDD 회전축계 고유 진동수의 공진이 생길 수 있고, 공진에 의한 과도한 NRRO는 HDD 데이터 처리 오류를 발생시키게 된다.

[†] 책임저자 : 정회원, 한양대학교 기계공학부
E-mail : ghjange@hanyang.ac.kr
Tel : (02) 2290-0431, Fax : (02) 2292-3406

* 정회원, 삼성전자 스토리지사업부

[#] 이 논문은 2003 추계학술대회에서 우수발표논문으로 추천되었음.

Chaw-Wu Tseng 등⁽¹⁾은 온도 변화가 HDD rocking 모드 고유 진동수에 미치는 영향을 분석하기 위해 해석 모델을 개발하고 이에 대한 실험을 수행하여, 온도 상승에 따른 rocking 모드 고유 진동수 변화의 주요 원인은 불 베어링 강성 감소임을 확인하였다. 김동균 등⁽²⁾은 유한요소 열변형 해석과 베어링에 대한 힘 평형 방정식을 이용하여 온도 상승에 따른 HDD 회전축계 동특성 해석 모델을 개발하고, 이를 고유 진동 실험을 통해 검증하였다. 그리고 G. H. Jang 등⁽³⁾은 온도 상승에 따른 HDD 회전축계 고유 진동수 감소를 억제할 수 있는 방안으로 정압 예압을 가지는 불 베어링으로 지지되는 HDD 스피들 모터 설계를 제안하고 시작품에 대한 고유 진동 실험을 통해 제안된 설계의 효과를 입증하였다. 이와 같이 온도 상승에 따른 HDD 회전축계 동특성 변화에 대한 연구는 주로 고유 진동 특성에 관한 것이었다. 하지만 온도 상승에 의한 HDD 동특성 변화가 HDD 성능에 미치는 영향을 정확히 분석하기 위해서는 HDD 자기 기록 밀도를 제한하는 주요 요소인 NRRO의 HDD 온도 상승에 따른 변화에 관한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 김동균 등⁽²⁾이 개발한 온도 상승에 따른 불 베어링 특성 해석 모델을 이용하여 온도 상승에 의해 발생하는 HDD 회전축계 불 베어링 강성과 베어링 가진 주파수 변화를 해석하였다. 그리고 실험을 통해 온도 상승에 따른 HDD 회전축계 NRRO의 변화를 측정하고, 이를 불 베어링 특성 해석 결과 및 온도 상승에 따른 HDD 회전축계 고유 진동수 측정 실험 결과와 비교함으로써, 온도 상승에 의한 불 베어링 특성 변화가 NRRO에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 온도 상승에 따른 불 베어링 특성 변화

Fig. 1과 같은 HDD 회전축계는 열팽창계수가 서로 다른 부품으로 구성되어 있다. 일반적으로 회전하는 허브와 디스크의 재질은 알루미늄 합금이고 고정된 축의 재질은 스테인리스 강이다. 알루미늄 합금의 열팽창계수는 스테인리스 강의 약 2배이기 때문에, 회전부에 속하는 불 베어링 외륜의 열팽창률은 고정부에 속하는 불 베어링 내륜보다 크다. 이러한 내륜과 외륜의 열팽창률 차이는 HDD 작동 온도가 상승할 때 불 베어링의 특성을 변화시키는 원인이 된다.

2.1 해석방법

온도 상승에 따른 불 베어링 특성 해석 과정은 온도 상승에 의한 베어링 변위 계산과 이에 따른 베어링 특성 변화 해석의 두 부분으로 이루어져 있다.

첫 번째 단계로, HDD 회전축계 열변형에 대한 유한요소해석과 상하 베어링 힘 평형 방정식을 이용하여 온도 상승에 의해 발생하는 베어링의 변위를 계산한다. HDD 회전축계에서 불 베어링 외륜의 열팽창률은 내륜의 열팽창률보다 크기 때문에 온도가 상승함에 따라 베어링 불과 내외륜 사이의 접촉은 느슨해지게 된다. 따라서 온도 상승 시 불 베어링의 강성은 HDD 회전축계 열변형에 영향을 주지 않는다. 이에 따라 본 연구에서는 HDD 회전축계의 고정부와 회전부를 분리하여 열변형을 해석하였다.⁽⁴⁾ Fig. 2는 온도 상승에 의해 발생하는 HDD 회전축계 열변형량을 구하기 위해 유한요소해석 상용 프로그램 ANSYS를 이용하여 개발한 해석모델이다. Fig. 3은 유한요소해

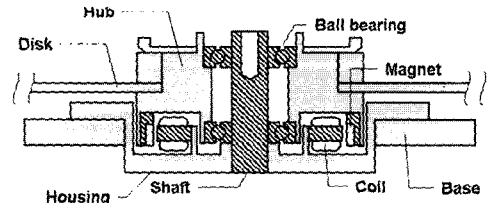
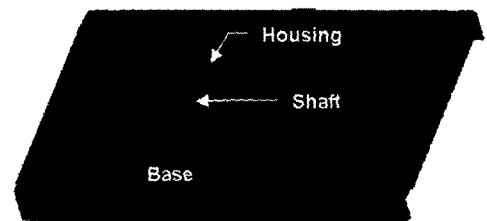


Fig. 1. HDD spindle system



(a)



(b)

Fig. 2 Finite element models of a HDD spindle system for thermal analysis: (a) stationary part (b) rotating part

석에 의해 계산된 HDD 회전축계 열변형량을 나타낸 것이다. Fig. 1과 같이 HDD 회전축계에서 상부 베어링과 하부 베어링의 배열은 축 방향으로 비대칭이기 때문에 온도 상승에 의한 상하 베어링의 열변형량은 서로 다르게 된다. 이로 인해 두 베어링에 작용하는 축 방향 힘의 불평형이 발생하게 되어 허브가 휨 평형을 이루는 방향으로 움직이게 된다. 그러므로 온도 상승에 의해 발생하는 베어링 변위는 온도 상승에 의한 열변형량과 허브의 축 방향 이동량의 합이다. 본 연구에서는 상하 베어링의 축 방향 힘에 관한 평형 방정식인 식 (1)을 사용하여 온도 상승에 의한 허브의 축 방향 이동량을 계산하였다.⁽²⁾

$$n \cdot F'^L \sin \alpha'^L + n \cdot F'^U \sin \alpha'^U = 0 \quad (1)$$

식 (1)에서 n 은 베어링 볼 개수를 나타내고, F' 와 α' 는 각각 온도 상승 후 볼과 케드륀 사이의 접촉력과 접촉각을 나타내며, 위첨자 L 과 U 는 각각 하부 베어링과 상부 베어링을 나타낸다.

두 번째 단계로, 첫 번째 단계에서 계산된 베어링 변위를 가지고 베어링 요소의 기하학적 관계와 베어링 해석 이론을 이용하여 온도 상승에 따른 베어링 특성 변화를 해석한다. HDD 회전축계를 지지하는 볼 베어링은 상부 베어링 내륜에 축 방향으로 예압을 가하여 베어링 볼과 내외륜이 일정한 각도를 가지고 접

촉하게 하는 각접촉 볼베어링(angular contact ball bearing)이다. 볼 베어링의 접촉각은 볼과 내외륜의 접촉점을 잇는 선과 베어링 회전축에 수직인 평면이 이루는 각으로 정의된다.⁽⁵⁾ Fig. 4는 온도 상승에 따른 베어링 변위를 나타낸 것이다. Fig. 4에서 Δr_i , Δh_i , Δr_o , Δh_o 는 각각 베어링 내륜과 외륜의 반경 방향 및 축 방향 위치 변화이고, A, B, A', B' 는 각각 온도 변화 전후의 내륜 곡률반경 중심과 외륜 곡률반경 중심이다. 내륜과 외륜의 곡률반경 중심의 위치 변화는 볼 베어링의 내륜과 외륜의 위치 변화와 같으므로 내륜 곡률반경 중심에 대한 외륜 곡률반경 중심의 상대 위치 변화는 Fig. 5와 같이 나타낼 수 있다. 내외륜과 베어링 볼의 접촉은 내외륜 곡률반경 중심을 잇는 선 상에서 이루어지므로 Fig. 5에서 온도 상승 후 베어링 접촉각(α')을 온도 상승 전 베어링 접촉각(α)에 대해 나타내면 식 (2)와 같다.

$$\alpha' = \tan^{-1} \left(\frac{\overline{AB} \sin \alpha + (\Delta h_o - \Delta h_i)}{\overline{AB} \cos \alpha - (\Delta r_o - \Delta r_i)} \right) \quad (2)$$

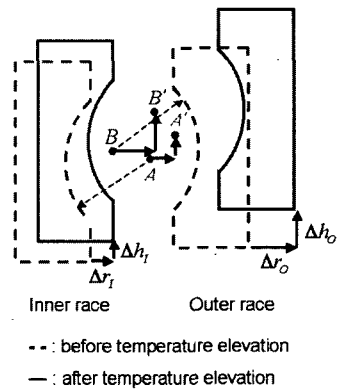


Fig. 4 Displacement of bearing races due to temperature elevation

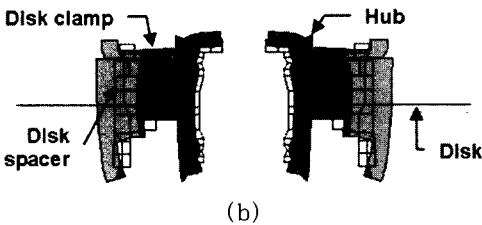
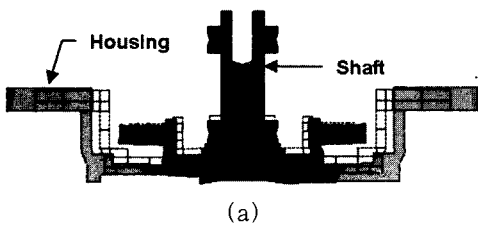


Fig. 3 Finite element thermal analysis of a HDD spindle system: (a) stationary part (b) rotating part part(latticed line: original shape, colored area: deformed shape by thermal expansion)

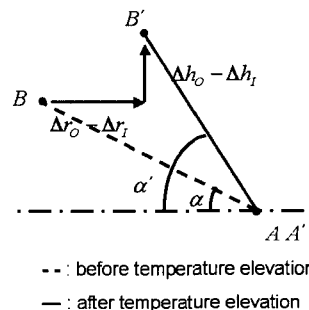


Fig. 5 Relative displacement of curvature center of outer race with respect to that of inner race

식 (2)에서 \overline{AB} 는 온도 상승 전의 내외륜 곡률반경 중심간의 거리이다. 온도 상승 후 베어링 변형량(δ')은 온도 상승 전 변형량(δ)과 온도 상승에 따른 내외륜 곡률반경 중심간의 거리 변화($\overline{A'B'} - \overline{AB}$) 그리고 베어링 볼의 열변형량($d'_B - d_B$)의 합이므로 식 (3)과 같다.

$$\delta' = \delta + (\overline{A'B'} - \overline{AB}) + (d'_B - d_B) \quad (3)$$

온도 상승 후 베어링 볼 지름(d'_B)은 볼의 열팽창 계수(α_{TB})와 온도 변화량(ΔT)을 이용하여 식 (4)와 같이 구할 수 있으며, 온도 상승에 의한 베어링 피치 지름의 변화는 내륜과 외륜의 반경 방향 위치 변화의 평균값이므로 온도 상승 후 베어링 피치 지름(d'_p)은 식 (5)와 같다.

$$d'_B = d_B + \alpha_{TB} \cdot \Delta T \cdot d_B \quad (4)$$

$$d'_p = d_p + (\Delta r_i + \Delta r_o) \quad (5)$$

볼 베어링은 회전 운동을 지지하는 요소로서 HDD 회전축계의 강성은 주로 볼 베어링에 의해 결정된다. 볼 베어링의 반경 방향 등가 강성(k_{RR})과 축 방향 등가 강성(k_{AA})은 베어링에 작용하는 반경 방향 힘(F_R)과 축 방향 힘(F_A)을 각각 베어링의 반경 방향 변위(u_R)와 축 방향 변위(u_A)로 편미분하여 구한다.⁽⁶⁾

$$k_{RR} = \frac{\partial F_R}{\partial u_R} = \frac{K \cdot n}{2} \left(\frac{\delta'^2}{\delta + r_i + r_o - d_B} + \frac{\delta'^2 (\delta + 3(r_i + r_o - d_B))}{2(\delta + r_i + r_o - d_B)} \cos^2 \alpha \right) \quad (6)$$

$$k_{AA} = \frac{\partial F_A}{\partial u_A} = K \cdot n \left(\frac{\delta'^2}{\delta + r_i + r_o - d_B} + \frac{\delta'^2 (\delta + 3(r_i + r_o - d_B))}{2(\delta + r_i + r_o - d_B)} \sin^2 \alpha \right) \quad (7)$$

여기서 K 는 베어링의 하중-변형 상수이고, r_i, r_o 는 베어링 내륜과 외륜의 곡률반경이다. 볼 베어링은 HDD 회전축계의 회전 운동을 지지하는 동시에 가진 원으로 작용하여 진동을 유발시킨다. 이는 HDD가 회전할 때 베어링 볼과 궤도륜의 기하학적 불완전성에 의해 베어링이 회전부에 가하는 힘이 시간에 따라 변

화하기 때문이다.^(7, 8) 볼 베어링의 가진에 의해 발생하는 진동의 주파수는 Table 1과 같이 HDD회전축계의 회전 주파수(f_o)와 볼 베어링 내부 회전 운동을 결정하는 베어링 케이지 회전 운동의 주파수(f_c)와 볼 구름 운동의 주파수(f_R)의 조합으로 나타나게 되며,^(5, 9) f_c 와 f_R 는 각각 식 (8)과 식 (9)로 구할 수 있다.⁽⁵⁾

$$f_c = \frac{1}{2d_p} (d_p + d_B \cos \alpha) f_o \quad (8)$$

$$f_R = \frac{1}{2d_p d_B} (d_p - d_B \cos \alpha) (d_p + d_B \cos \alpha) f_o \quad (9)$$

온도 상승 후 베어링의 강성과 가진 주파수는 식 (2)~(5)에서 구한 베어링의 기하학적 변화를 식 (6)~(9)에 적용하여 계산할 수 있다.

본 연구에서 사용한 볼 베어링 특성 해석 모델은 온도 변화에 따른 베어링 접촉각과 강성을 HDD 회전축계 유한요소모델에 적용하여 온도 변화에 의한

Table 1 Bearing frequencies and their sources

Bearing frequency	Source
$pm(f_o - f_c), pm(f_o - f_c) \pm qf_o$	Outer race form error
pmf_c	Inner race form error
$2pf_R, 2pf_R \pm qf_c$	Irregularity of ball
pf_c	Difference of ball diameter

Table 2 Major design specifications of a ball bearing

Number of balls	10
Ball diameter [mm]	1.588
Pitch diameter [mm]	9.1
Contact angle [degree]	24.51
Preload [N]	16
Inner race conformity	0.529
Outer race conformity	0.535
Radial clearance [mm]	0.013~0.020

HDD 회전축계 고유 진동수 변화를 구하고 이를 실험 결과와 비교함으로써 그 타당성을 검증하였다.⁽²⁾

2.2 해석결과

본 연구에서는 3.5인치 HDD 회전축계의 온도가 40 °C 상승하였을 때 스피들 모터에 사용하는 볼 베어링 특성 변화를 해석하였다. 본 연구에서 사용된 볼 베어링의 주요 사양은 Table 2와 같다. Table 3은 온도 상승에 따른 볼 베어링의 특성 해석 결과를 정리한 것으로, 온도가 상승하면 볼 베어링의 접촉각은 증가하고 변형량은 감소하며 피치 지름과 볼 지름은 거의 변화하지 않는 것을 알 수 있다. Table 3에서 온도 상승에 따라 베어링의 접촉각이 증가한 것은 외륜의 열팽창률이 내륜의 열팽창률보다 커서 ($\Delta h_o - \Delta h_i$)와 ($\Delta r_o - \Delta r_i$)이 모두 양수값을 가지게 되고 이에 따라 식 (2)의 오른쪽 항의 값이 증가하였기 때문이다. 또한 온도 상승에 따라 베어링 변형량이 감소한 것도 외륜의 열팽창률이 내륜의 열팽창률보다 커서 베어링 볼과 궤도륜 사이의 접촉이 느슨해졌기 때문이다. 특히 베어링 변형량의 감소 비율이 다른 특

성의 변화율에 비해 커서 식 (6)과 식 (7)에 따라 베어링의 강성이 크게 감소하였다. 이에 비해 베어링 접촉각의 증가에 의한 베어링 내부 회전 운동의 주파수(f_c, f_r) 변화는 크지 않다. 이는 식 (8)과 식 (9)에 의해 접촉각의 코사인 함수값이 베어링 내부 회전 운동의 주파수에 영향을 주기 때문이다. Table 3에서 온도 상승에 따른 접촉각의 변화는 상하 베어링 각각 +10.50 %와 +3.70 %이지만 이를 코사인 함수값의 변화로 바꾸면 상하 베어링 각각 -2.15 %와 -0.73 %가 된다. 또한 Table 3에서 온도 상승에 따른 상하 베어링 특성 변화에 차이가 발생하는 것은 온도 상승에 의해 발생하는 상부 베어링의 열변형량이 하부 베어링과 다르기 때문이다.

3. 온도 상승에 따른 NRRO 특성 변화

3.1 NRRO 측정 결과

Fig. 6은 HDD 회전축계에서 발생하는 NRRO를 온도 변화에 따라 측정하기 위한 실험 장치이다. Fig. 6에서 유리로 만들어진 상자내의 HDD 온도는 열전쌍(thermocouple)으로 측정되고 열풍기(hot air blower)에 의해 조절되었다. 그리고 HDD 회전축계 중심으로 부터 약 43 mm 떨어진 곳에서 HDD 디스크의 축방향 변위를 레이저 진동계를 이용하여 측정한다. 측정된 변위 값을 모터 구동 회로에서 나오는 전기 신호(index signal)를 사용하여, HDD 회전 주기를 기준으로 평균함으로써 RRO를 계산하고 RRO를 제외한 나머지 성분으로 NRRO를 구하였다. 본 연구에서는 NRRO 해석에 ADE사의 3700/FFT 시스템을 사용하였다.

Fig. 7과 Fig. 8은 각각 상온(28 °C)과 고온(69

Table 3 Ball bearing characteristics due to temperature elevation

	Room temperature	Elevated temperature(+40°C)	
		Lower bearing	Upper bearing
Contact angle a [degree]	24.510	25.416 (+3.70 %)	27.084 (+10.50 %)
δ [μ m]	1.054	0.667 (-36.72 %)	0.641 (-39.18 %)
Pitch diameter d_p [mm]	9.100	9.105 (+0.05 %)	9.107 (+0.08 %)
Ball diameter d_b [mm]	1.588	1.589 (+0.06 %)	1.589 (+0.06 %)
Radial stiffness k_{RR} [kN/mm]	22.555	17.7630 (-21.39 %)	16.894 (-25.10%)
Axial stiffness k_{AA} [kN/mm]	9.673	8.154 (-15.70 %)	8.968 (-7.29 %)
Cage frequency f_c [Hz]	52.145	52.092 (-0.10 %)	51.990 (-0.30 %)
Ball rolling frequency f_r [Hz]	251.370	251.486 (+0.05 %)	251.708 (+0.13 %)

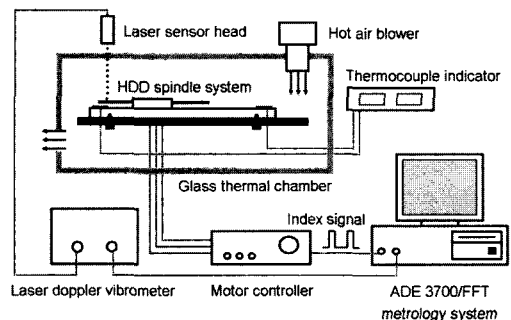


Fig. 6 Experiment setup to measure NRRO of a HDD spindle system

℃에서 측정된 TIR, RRO, NRRO를 시간 영역에서 나타낸 것이고, 각각의 값은 Table 4와 같다. Table 4에서 NRRO의 값을 표준 편차(σ)로 나타낸 것은 NRRO가 평균값이 영인 정규 분포를 갖기 때문에⁽¹⁰⁾ 측정 오차에 의해 측정마다 편차가 존재하는 최대값

과 최소값의 차이(peak-to-peak)보다 표준 편차가 NRRO의 특성을 더 잘 나타낼 수 있기 때문이다. 확률 이론에 의해 NRRO가 $\pm 3\sigma$ 범위에 존재할 확률은 99.7 %가 된다. Table 4에서 온도 상승에 따라 RRO는 약 6 % 증가하고 NRRO는 약 14 % 감소하였다. Fig. 9와 Fig. 10은 측정된 TIR, RRO, NRRO를 주파수 영역에서 나타낸 것이다. Fig. 9와 Fig. 10을 비

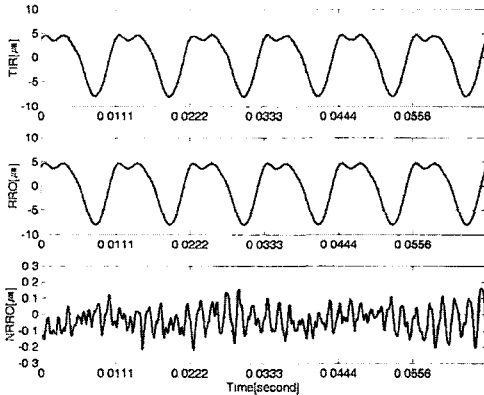


Fig. 7 Runout of a HDD spindle system in time domain at room temperature(28 °C)

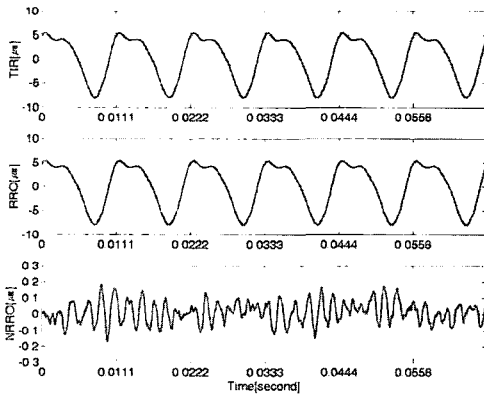


Fig. 8 Runout of a HDD spindle system in time domain at elevated temperature(69 °C)

Table 4 Runout of a HDD spindle system

	Room temperature (28 °C)	Elevated temperature (69 °C)
TIR (peak-to-peak)[μm]	12.992	13.743 (+5.78 %)
RRO (peak-to-peak)[μm]	12.651	13.365 (+5.64 %)
NRRO($\pm 3\sigma$)[μm]	0.455	0.392 (-13.85 %)

σ : standard deviation

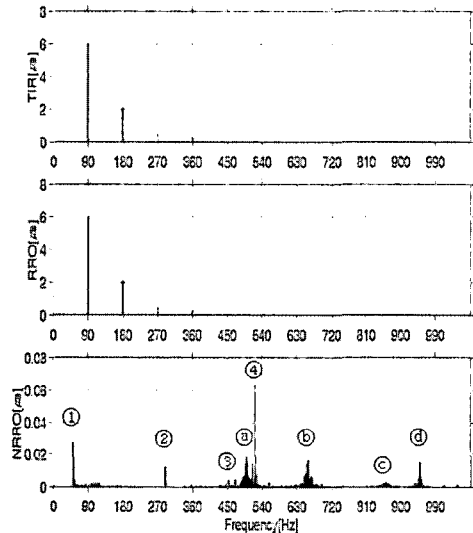


Fig. 9 Runout of a HDD spindle system in frequency domain at room temperature (28 °C)

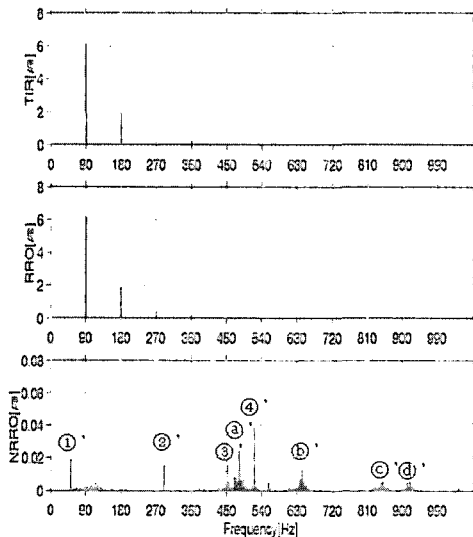


Fig. 10 Runout of a HDD spindle system in frequency domain at elevated temperature(69 °C)

교해 보면 RRO는 온도 상승에 따라 크게 변화하지 않으나 NRRO는 주파수 분포와 크기에서 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 그러므로 Table 4, Fig. 9, Fig. 10을 통해 HDD 회전축계 진동 성분 중에서 온도 상승에 따른 변화는 RRO보다 NRRO가 더 큰 것을 알 수 있다.

Table 5 NRRO frequencies and bearing frequencies at room temperature(28 °C)(unit : Hz)

	NRRO frequency by experimental measurement	Bearing frequency by theoretical analysis	
①	52.0	52.15	f_c
②	289.0	288.55	$10(f_o-f_c)-f_o$
③	452.1	450.60	$2f_R f_c$
④	521.7	521.45	$10f_c$
a	498.5	502.74	$2f_R$
b	657.8	659.18	$2f_R+3f_c$
c	859.2	865.65	$30(f_o-f_c)-3f_o$
d	946.4	953.34	$4f_R f_c$

Table 6 NRRO frequencies and bearing frequencies at elevated temperature(69 °C)(unit : Hz)

	NRRO frequency by experimental measurement	Bearing frequency by theoretical analysis		
①'	52.0 (0.0)	52.10 (-0.05)	51.99 (-0.16)	f_c
②'	289.0 (+0.7)	289.08 (+0.53)	290.10 (+1.55)	$10(f_o-f_c)-f_o$
③'	452.1 (0.0)	450.89 (+0.29)	451.43 (+0.83)	$2f_R f_c$
④'	521.7 (-0.7)	520.92 (-0.53)	519.90 (-1.55)	$10f_c$
a'	498.5	485.02	486.93	$4f_R-10f_c$
b'	657.8	641.30	642.90	$4f_R+7f_c$
c'	859.2	848.16	850.20	$20(f_o-f_c)+f_o$
d'	946.4	919.08	920.10	$10(f_o-f_c)+6f_o$

3.2 베어링 가진 주파수에 의한 NRRO 변화

온도 상승에 의해 베어링 접촉각이 증가하면 식 (8)과 (9)에 따라 베어링 내부 회전 운동 주파수가 변화하여 Table 1의 베어링 가진 주파수가 변화하게 된다. 그러므로 온도가 상승하면 베어링 가짐에 의해 발생하는 NRRO의 주파수 성분은 변화하게 된다. 또한 온도 상승에 의해 발생하는 상부 베어링 열변형이 하부 베어링과 같지 않기 때문에 Table 3과 같이 상하 베어링 내부 회전 운동 주파수의 차이가 발생하여 고온에서 상부 베어링 가진 주파수와 하부 베어링 가진 주파수는 달라지게 된다.

Table 5는 상온에서 측정된 NRRO 주파수 성분 (Fig. 9)을 Table 1의 베어링 가진 주파수와 비교하여 각각의 NRRO 주파수 성분이 어떤 원인에 의해 발생하였는지 살펴본 것이며, Table 6는 고온에서 측정된 NRRO 주파수 성분 (Fig. 10)의 원인을 분석한 것이다. 이 때 베어링 가진 주파수 계산에 필요한 상온과 고온에서의 베어링 내부 회전 운동 주파수는 Table 3의 값을 사용하였다.

Table 5와 Table 6에서 ①과 ①', ②와 ②', ③과 ③', ④와 ④'은 같은 베어링 가진 주파수에 의해 발생한 NRRO 성분이며, Table 6에서 괄호 안의 숫자는 온도 상승에 따른 NRRO 주파수와 베어링 가진 주파수의 변화를 나타낸다. ①과 ①', ③과 ③' 경우에는 온도 상승에 의한 해당 베어링 가진 주파수 변화량이 작기 때문에 온도 상승에 따른 NRRO 주파수 변화가 측정되지 않았다. ②와 ②', ④와 ④'의 경우 각각 그 베어링 가진 주파수가 $10(f_o-f_c)-f_o$, $10f_c$ 로서 온도 상승에 따른 베어링 케이지 회전 운동의 주파수(f_c) 변화에 베어링 볼 개수(10)가 곱해지므로 베어링 가진 주파수의 변화가 비교적 커서 NRRO 측정 실험에서 온도 상승에 따른 주파수 변화가 측정되었지만 NRRO 주파수 변화는 0.7 Hz로 그 양이 작다. 즉, Table 3에 나타난 것과 같이, 40 °C 온도 상승에 따라 상하 베어링 접촉각이 각각 10.50 %, 3.70 % 증가하고 접촉각의 코사인 함수값이 2.15 %, 0.73 % 감소하여, 볼 개수(10)가 곱해지더라도 베어링 가진 주파수 변화는 1.55 Hz, 0.53 Hz에 불과하다. 그리고 Table 6에서 이론적 해석에 의한 고온에서의 상하 베어링 가진 주파수 차이가 실험에서 NRRO 주파수 차이로 측정되지 않은 것은 온도 상승에 의해 발생하는 상하 베어링 가진 주파수 차이가 작기 때문이다.

따라서 Table 5와 Table 6의 비교를 통해 온도 상승에 따른 베어링 가진 주파수 변화가 NRRO에 미치는 영향은 크지 않음을 알 수 있다. 이는 2.2절에서 설명한 바와 같이 온도 상승에 따른 베어링 접촉각 증가에 의한 베어링 내부 회전 운동 주파수 변화가 작기 때문이다.

3.3 베어링 강성에 의한 NRRO 변화

HDD 회전축계의 작동 온도가 상승하면 볼 베어링 강성이 감소하고 디스크 잔류 응력이 변화하여 HDD 회전축계 고유 진동수가 감소하게 된다.^(1, 11) 특히 가장 낮은 고유 진동수인 rocking 모드에 의한 고유 진동수는 주로 볼 베어링 강성 감소에 의해 변화하기 때문에⁽¹⁾ 온도 상승에 따른 볼 베어링 강성 감소는 HDD 회전축계 고유 진동수와 베어링 가진 주파수의 공진 영역을 변화시킴으로써 NRRO에 영향을 주게 된다.

Fig. 11은 온도 상승에 따른 HDD 회전축계 고유 진동수 측정을 위한 실험 장치이다. Fig. 11에서 충격

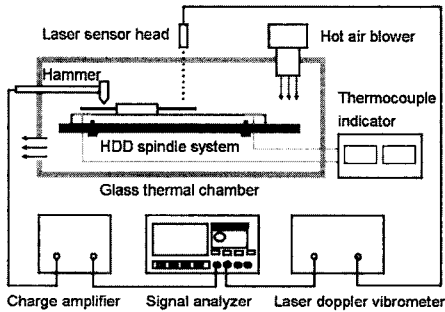


Fig. 11 Experiment setup to measure the natural frequencies of a HDD spindle system

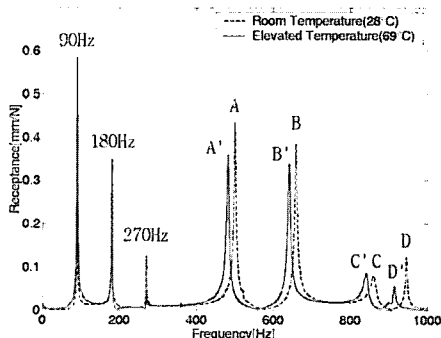


Fig. 12 Frequency response functions of a HDD spindle system

해머의 가진에 대한 HDD 회전축계의 응답을 레이저로 측정하고 이를 신호 분석기로 분석하여 주파수 응답 함수를 구하였다. Fig. 12는 상온(28 °C)과 고온

Table 7 Natural frequencies of a HDD spindle system(unit : Hz)

	Mode	Room temperature (28 °C)	Elevated temperature (69 °C)
A,A'	Backward rocking	500	481(-19)
B,B'	Forward rocking	658	641(-17)
C,C'	Axial	860	841(-19)
D,D'	Disk(0,2) backward	945	914(-31)

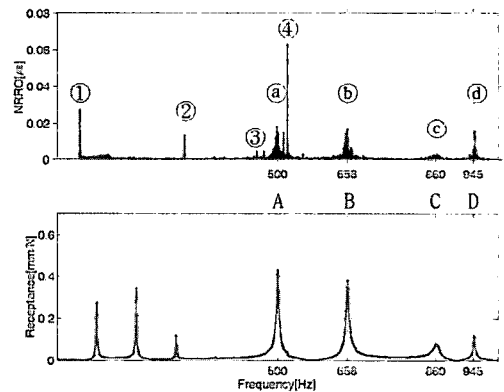


Fig. 13 NRRO and frequency response function of a HDD spindle system at room temperature(28 °C)

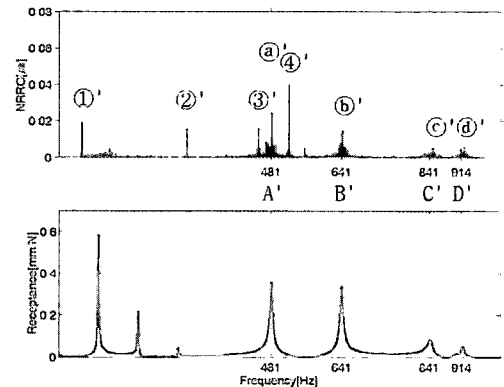


Fig. 14. NRRO and frequency response function of a HDD spindle system at elevated temperature(69 °C)

(69 °C)에서 측정된 HDD 회전축계 주파수 응답 함수이며, Fig. 12에서 90, 180, 270 Hz 주파수는 HDD 회전 운동에 의해 나타나는 회전 주파수 정수배 성분이다. Table 7은 온도에 따른 HDD 회전축계의 고유 진동수와 해당 고유 모드를 정리한 것이다. Fig. 12와 Table 7에서 온도가 상승하면 HDD 회전축계의 고유 진동수는 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig. 13과 Fig. 14는 NRRO 주파수 성분과 HDD 회전축계 고유 진동수를 상온과 고온에서 비교한 것이다. Fig. 13과 Fig. 14를 통해 온도 상승에 따른 HDD 회전축계 고유 진동수 감소에 의한 공진 영역 변화로 온도 상승 후 ③'번 NRRO 주파수의 크기는 커지고 ④'번 NRRO 주파수 크기는 작아진 것을 알 수 있다. 또한 Table 5와 Table 6에서 상온에서 존재 하던 NRRO 주파수 ①, ②, ③, ④가 고온에서 없어지고 그 보다 낮은 주파수 영역에서 새로운 NRRO 주파수 ①', ②', ③', ④'가 새로 생긴 것이 온도 상승에 따른 고유 진동수 변화에 의한 것임을 Fig. 13과 Fig. 14를 통해 확인할 수 있다. 그러므로 온도 상승에 따른 볼 베어링 강성 감소는 HDD 회전축계 고유 진동수를 감소시킴으로써 NRRO 주파수의 크기와 분포를 변화시킨다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

이 연구에서는 HDD 회전축계 온도 상승에 의해 발생하는 볼 베어링의 특성 변화를 해석하고, 볼 베어링의 특성 변화가 HDD 회전축계 NRRO에 미치는 영향을 분석하였다. HDD의 온도가 상승하면 볼 베어링의 접촉각이 증가하여 베어링 가진 주파수가 변화하고, 볼 베어링의 변형량이 감소하여 베어링 강성이 작아지게 된다. 이러한 볼 베어링 특성 변화는 HDD 회전축계에서 볼 베어링 가진에 의해 발생하는 NRRO에 영향을 미치게 된다. 베어링 가진 주파수의 경우 그 변화가 작아 NRRO에 미치는 영향을 무시할 수 있으나, 베어링 강성 감소는 HDD 회전축계 고유 진동수에 의한 공진 영역을 변화시킴으로써 NRRO 주파수의 크기와 분포를 변화시키게 된다.

참 고 문 헌

(1) Tseng, Chaw-Wu, Shen, Jr-Yi, Ku, C. -P. R. and Shen, I. Y., 2002, "Effects of Elevated Temperatures on Rocking Vibration of Rotating Disk and Spindle Systems," ASME Journal of

Tribology, Vol. 124, No. 4, pp. 794~800.

(2) 김동균, 장건희, 한재혁, 김철순, 2003, "온도 변화에 따른 HDD 회전축계 동특성 해석," 한국소음진동공학회논문집, 제 13 권 제 10 호, pp. 805~812.

(3) Jang, G. H., Kim, D. K., Kim, C. S. and Lee, H. S., 2004, "Improvement of Dynamic Characteristics of a HDD Spindle System Supported by Ball Bearing at Elevated Temperature," *Microsystem Technologies*, will be Published.

(4) Stein, J. L. and Tu, J. F., 1994, "A State-space Model for Monitoring Thermally Induced Preload in Anti-friction Spindle Bearings of High Speed Machine Tools," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 116(3), September, pp. 372~386.

(5) Harris, T. A., 1991, *Rolling Bearing Analysis*, 3rd Edn., John Wiley & Sons.

(6) Jones, A. B., 1960, "A General Theory for Elastically Constrained Ball and Roller Bearing under Arbitrary Load and Speed Conditions," ASME Journal of Basic Engineering, June, pp. 309~320.

(7) Akturk, Nizami, 1999, "The Effect of Waviness on Vibrations Associated with Ball Bearings," ASME Journal of Tribology, Vol. 121, pp. 667~677.

(8) Jang, G. H. and Jeong, S. W., 2002, "Non-linear Excitation Model of Ball Bearing Waviness in a Rigid Rotor Supported by Two or More Bearings Considering Five Degrees of Freedom," ASME Journal of Tribology, Vol. 124, pp. 82~90.

(9) Igarashi, Teruo and Hamada, Hiroyoshi, 1982, "Studies on the Vibration and Sound of Defective Rolling Bearings (First Report: Vibration of Ball Bearings with One Defect)," Bulletin of JSME, Vol. 25, No. 204, pp. 994~1001.

(10) Jang, G. H., Kim, D. K. and Oh, J. E., 1999, "New Frequency Domain Method of Non-repeatable Runout Measurement in a Hard Disk Drive Spindle Motor," IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 35, No. 2, pp. 833~838.

(11) Shen, Jr-Yi, Tseng, Chaw-Wu, Shen, I. Y. and Ku, C. -P. R., 2000, "Vibration of Disk Media at Elevated Temperatures," Journal of Information Storage and Processing Systems, Vol. 2, pp. 307~312.