

# 온도 상승에 따른 볼 베어링으로 지지되는 HDD 회전축계 NRRO 특성 해석

## Analysis of NRRO Characteristics of a HDD Spindle System Supported by Ball Bearing at Elevated Temperature

김동균\* 장건희\*\*

D. K. Kim and G. H. Jang

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

### ABSTRACT

This research investigates how characteristics of ball bearing affect non-repeatable runout(NRRO) in a HDD spindle system at elevated temperature. It shows that the elevated temperature results in the increase of bearing contact angle and the decrease of bearing deformation due to the different thermal expansion rate of the components of the HDD spindle system. The increase of contact angle at elevated temperature is so small that the variation of bearing frequencies is negligible. On the other hand, the decrease of bearing deformation at elevated temperature reduces the stiffness of ball bearing and the natural frequencies of HDD spindle system consequently, which changes the amplitude and the frequency distribution of NRRO.

### 1. 서 론

컴퓨터 내부에 존재하는 다양한 열원은 하드 디스크 드라이브(Hard disk drive, 이하 HDD) 작동 온도를 상승시킨다. Fig. 1 은 컴퓨터 내부 HDD 의 상부 덮개와 바닥에서 측정된 온도를 나타낸 것이다. Fig. 1 에서 컴퓨터가 작동하게 되면 HDD 외부 온도는 2 시간 후 약 55°C 에 이를 때까지 지속적으로 상승함을 알 수 있다. HDD 내부 온도의 경우 외부 온도보다 훨씬 높아서 최고 80° C 까지 상승하게 된다.

Fig. 2 와 같은 HDD 회전축계는 열팽창계수가 서로 다른 부품으로 구성되어 있다. 일반적으로 허브와 디스크의 재질은 알루미늄 합금이고 축 재질은 스테인리스 강이기 때문에 회전부와 회전 지지부의 온도 상승에 따른 열팽창율은 서로 다르게 된다. 그러므로 HDD 내부 온도가 상승하면 HDD 회전축계를 지지하는 볼 베어링의 특성이 변화되어 HDD 회전축계 동특성에 영향을 주게 된다. 이러한 온도 상승에 따른 HDD 회전축계 동특성 변화는 HDD 회전 정밀도를 저하시켜 데이터 처리 오류의 원인이 될 수 있다.

Chaw-Wu Tseng 등<sup>(1)</sup>은 온도 변화가 HDD rocking 모드 고유 진동수에 미치는 영향을 분석하기 위해 해석 모델을 개발하고 이에 대한 실험을 수행하여, 온도 상승에 따른 rocking 모드 고

유 진동수 변화의 주요 원인은 볼 베어링 강성 감소임을 확인하였다. G. H. Jang 등<sup>(2)</sup>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. 이와 같이 온도 상승에 따른 HDD 회전축계 동특성에 대한 연구는 주로 고유 진동 해석에 관한 것이었다. 하지만 온도 상승에

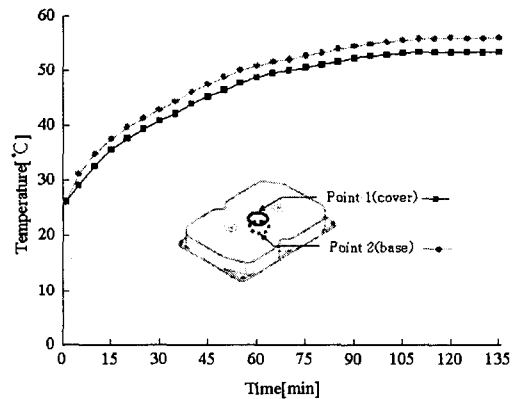


Fig. 1 Temperature variation on the top cover and base of a HDD in a computer

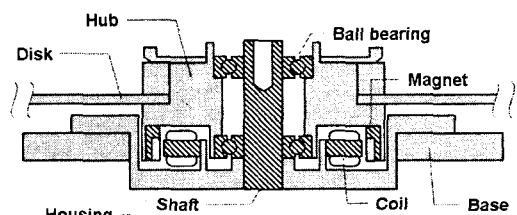


Fig. 2 HDD spindle system

\* 한양대학교 기계공학부 초정밀회전기연구실  
E-mail : hydckim@ihanyang.ac.kr  
Tel : (02) 2299-5685, Fax : (02) 2292-3406

\*\* 한양대학교 기계공학부 초정밀회전기연구실

의한 HDD 동특성 변화가 HDD 성능에 미치는 영향을 정확히 분석하기 위해서는 HDD 자기 기록 밀도를 제한하는 주요 요소인 비반복적 런아웃(Non-Repeatable Runout, 이하 NRRO)의 HDD 온도 상승에 따른 변화에 관한 연구가 필요하다.

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

## 2. 온도상승에 따른 볼베어링 특성 해석

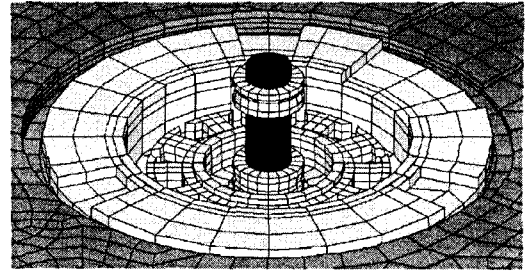
### 2.1 해석 방법

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

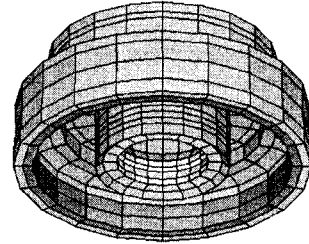
첫 번째 단계로, HDD 회전축계 열변형에 대한 유한요소해석과 상하 베어링 힘 평형 방정식을 이용하여 온도 상승에 의해 발생하는 베어링의 변위를 계산한다. Fig. 3은 온도 상승에 의해 발생하는 열변형량을 구하기 위한 HDD 회전축계 유한요소모델이다. 본 연구에서는 유한요소 열변형 해석을 위해 상용 프로그램인 ANSYS를 이용하였으며 회전지지부와 회전부를 분리하여 열변형을 해석하였다. Fig. 4는 유한요소해석에 의해 계산된 HDD 회전축계 열변형량을 나타낸 것이다. Fig. 2와 같이 HDD 회전축계에서 상부 베어링과 하부 베어링의 배열은 축 방향으로 비대칭이기 때문에 상하 베어링이 열변형은 서로 다르게 된다. 이로 인해 두 베어링에 작용하는 축 방향 힘의 불평형이 발생하게 되어 허브가 힘 평형을 이루는 방향으로 움직이게 된다. 그러므로 온도 상승에 의해 발생하는 베어링 변위는 온도 상승에 의한 열변형량과 허브의 축 방향 이동량의 합이다. 식(1)은 허브의 축 방향 이동량을 계산하기 위해 사용된 상하 베어링의 축 방향 힘에 관한 평형 방정식이다.

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

식(1)에서  $n$ 과  $F'$ 은 각각 베어링 볼의 개수와

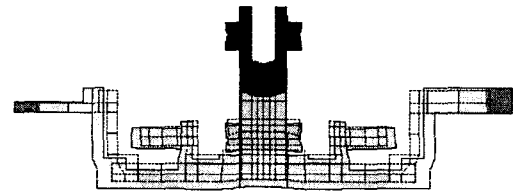


(a)

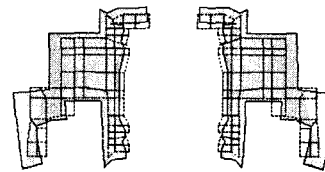


(b)

Fig. 3 Finite element models of a HDD spindle system for thermal analysis: (a) stationary part (b) rotating part



(a)



(b)

Fig. 4 Finite element thermal analysis of a HDD spindle system: (a) stationary part (b) rotating part

온도 변화 후 볼과 궤도륜 사이의 접촉력을 나타내며, 위 첨자  $L$ 과  $U$ 는 각각 하부 베어링과 상부 베어링을 나타낸다.

두 번째 단계로, 첫 번째 단계에서 계산된 베어링 변위를 가지고 베어링 요소의 기하학적 관계와 헤르쯔의 접촉 이론을 응용하여 온도 상승에 따른 베어링 특성 변화를 해석한다. Fig. 5는 온도 변화에 따른 베어링 변위를 나타낸 것이다. Fig. 5에서  $\Delta r_j$ ,  $\Delta h_i$ ,  $\Delta r_o$  그리고  $\Delta h_o$ 는 각각 베어링 내륜과 외륜의 반경 방향 및 축 방향 위치 변화이

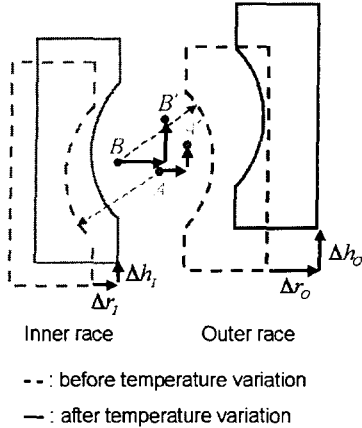


Fig. 5 Bearing displacement due to temperature variation

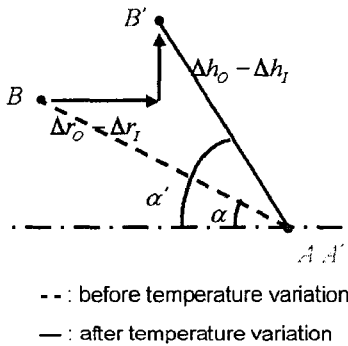


Fig. 6 Change of contact angle before and after temperature variation

고,  $A, B, A'$  그리고  $B'$  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. 6 과 같이 나타낼 수 있다. 내외륜과 베어링 볼의 접촉은 내외륜 곡률반경 중심을 잇는 선상에서 이루어지므로 Fig. 6 에서 온도 변화 후 베어링 접촉각( $\alpha'$ )을 온도 변화 전 베어링 접촉각( $\alpha$ )에 대해 나타내면 식(2)와 같다.

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

식(2)에서  $\overline{AB}$  는 온도 변화전의 내외륜 곡률반경 중심간의 거리이다. 온도 변화 후 베어링 변형량( $\delta'$ )은 온도 변화 전 변형량( $\delta$ )과 온도 변화에 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.

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

헤르쯔의 접촉 이론에 따르면 볼과 궤도륜 사이의 접촉력( $F$ )은 하중-변형 상수( $K$ )와 베어링 변형량( $\delta$ )의 함수로서 다음과 같다.

$$F = K \delta^{3/2} \quad (4)$$

그리고 볼 베어링에 작용하는 반경 방향 합력( $F_R$ )과 축 방향 합력( $F_A$ )은 볼과 궤도륜 사이의 접촉력( $F$ )의 벡터합으로서 다음과 같다.

$$F_R = \sum_{q=1}^n F \cos \alpha \cos \frac{2\pi q}{n} \quad (5)$$

$$F_A = nF \sin \alpha \quad (6)$$

또한 볼 베어링의 반경 방향 등가 강성( $k_{RR}$ )과 축 방향 등가 강성( $k_{AA}$ )은 식(5)와 식(6)에서 반경 방향 합력과 축 방향 합력을 각각 베어링의 반경 방향 변위( $u_R$ )와 축 방향 변위( $u_A$ )로 편미분하여 구한다.<sup>(3)</sup>

$$k_{RR} = \frac{\partial F_R}{\partial u_R} = \frac{K \cdot n}{2} \left( \frac{\delta^{3/2}}{\delta + \overline{AB}} + \frac{\delta^{3/2} (\delta + 3\overline{AB})}{2(\delta + \overline{AB})^2} \cos^2 \alpha \right) \quad (7)$$

$$k_{AA} = \frac{\partial F_A}{\partial u_A} = K \cdot n \left( \frac{\delta^{3/2}}{\delta + \overline{AB}} + \frac{\delta^{3/2} (\delta + 3\overline{AB})}{2(\delta + \overline{AB})^2} \sin^2 \alpha \right) \quad (8)$$

볼 베어링은 HDD 회전축계의 회전 운동을 지지하는 동시에 자체의 내부 회전을 하게 된다. 볼 베어링의 내부 회전 운동은 베어링 케이지 회전 운동과 볼의 구름 운동으로 나눌 수 있으며 케이지 회전 운동의 주파수( $f_C$ )와 볼의 구름 운동의 주파수( $f_R$ )는 다음과 같다.<sup>(3)</sup>

$$f_C = \frac{1}{2d_p} (d_p + d_B \cos \alpha) f_0 \quad (9)$$

$$f_R = \frac{1}{2d_p d_B} (d_p - d_B \cos \alpha) (d_p + d_B \cos \alpha) f_0 \quad (10)$$

여기서  $d_p$  는 베어링 피치 지름을 나타내고  $d_B$  는 베어링 볼 지름을 나타내며  $f_0$  는 HDD 회전축계의 회전 주파수를 나타낸다.

## 2.2 해석 결과

본 연구에서는 3.5 인치 HDD 회전축계의 온도가 40°C 상승하였을 때 스피들 모터에 사용하는

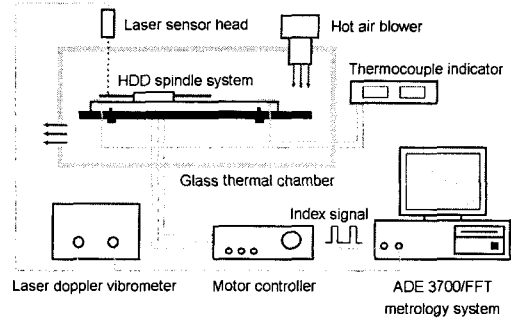
**Table 1** Major design specifications of a ball bearing

Number of balls	10
Ball diameter [mm]	1.588
Pitch diameter [mm]	9.1
Contact angle [degree]	24.51
Preload [N]	13.72
Inner race conformity	0.529
Outer race conformity	0.535
Radial clearance [mm]	0.013~0.020

**Table 2** Ball bearing characteristics due to temperature elevation

	Room temperature	Elevated temperature(+40°)	
		Lower bearing	Upper bearing
Contact angle[degree]	24.510	25.450 (+3.84%)	26.903 (+9.76%)
Deformation[ $\mu\text{m}$ ]	0.951	0.582 (-38.80%)	0.563 (-40.80%)
Pitch diameter[mm]	9.100	9.105 (+0.05%)	9.107 (+0.07%)
Ball diameter[mm]	1.588	1.589 (+0.06%)	1.589 (+0.06%)
Radial stiffness[kN/mm]	21.428	16.559 (-22.72%)	15.878 (-25.90%)
Axial stiffness[kN/mm]	9.159	7.621 (-16.79%)	8.285 (-9.54%)
Cage frequency[Hz]	52.145	52.090 (-0.11%)	52.001 (-0.28%)
Ball rolling frequency[Hz]	251.370	251.490 (+0.05%)	251.682 (+0.12%)

볼 베어링 특성 변화를 해석하였다. 본 연구에서 사용된 볼 베어링의 주요 사양은 Table 1 과 같다. Table 2 는 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. 특히 베어링 변형량의 감소 비율이 다른 특성의 변화율에 비해 커서 식 (7)과 식 (8)에 따라 베어링의 강성이 크게 감소하였다. 이에 비해 베어링 접촉각의 증가에 의한 베어링 내부 회전 운동의 주파수 변화는 매우 작다. 이는 식 (9)와 식 (10)에 의해 접촉각의 코사인 함수값이 베어링 내부 회전 운동의 주파수에 영향을



**Fig. 7** Experiment setup to measure runout of a HDD spindle system

주기 때문이다. Table 2 에서 온도 상승에 따른 접촉각의 변화는 상하 베어링 각각 +9.76%와 +3.84%이지만 이를 코사인 함수값의 변화로 바꾸면 상하 베어링 각각 -1.99%와 +0.76%가 된다.

### 3. 온도 상승에 따른 NRRO 변화 측정

HDD 회전축계에서 발생하는 진동을 일반적으로 TIR(Total Indicated Runout)이라 부르며, TIR 은 HDD 회전 주기마다 반복되는 성분인 RRO(Repeatable Runout)와 반복되지 않는 성분인 NRRO(Non-Repeatable Runout)로 나눌 수 있다. 시간 영역에서 RRO 는 HDD 회전 주기를 기준으로 한 TIR 의 평균값으로 나타나고 주파수 영역에서는 HDD 회전 주파수의 정수배 성분으로 나타나게 된다. 그리고 NRRO 는 시간 영역과 주파수 영역에서 TIR 에서 RRO 를 제외한 값이 된다.<sup>(4)</sup> NRRO 는 HDD 회전축계의 설계와 제작에 있어 중요한 사양으로서, RRO 와 달리 NRRO 는 제어 시스템에 의해 보상될 수 없으므로 NRRO 의 크기는 디스크의 자기 기록 밀도를 제한하는 요소가 된다.<sup>(5),(6)</sup>

Fig. 7 은 온도 변화에 따른 HDD 회전축계에서 발생하는 NRRO 를 측정하기 위한 실험 장치이다. Fig. 7 에서 유리로 만들어진 상자내의 HDD 온도는 열전쌍(thermocouple)으로 측정되고 열풍기(hot air blower)에 의해 조절되었다. 그리고 레이저 진동계를 이용하여 측정된 HDD 디스크의 축 방향 변위를, 모터 구동 회로에서 나오는 전기 신호(index signal)를 사용하여, HDD 회전 주기를 기준으로 평균함으로써 RRO 를 구하고 NRRO 를 해석하는 도구로써 ADE 3700/FFT 시스템을 사용하였다.

Fig. 8 과 Fig. 9 는 각각 상온(28° C)과 고온

(69° C)에서 측정된 TIR, RRO, NRRO 를 시간 영역에서 나타낸 것이고, 각각의 통계적 대표값은 Table 3 과 같다. Table 3 에서 NRRO 의 값을 표준 편차로 나타낸 것은 NRRO 가 평균값이 영인 정규 분포를 갖기 때문에<sup>(4)</sup> 측정시 마다 편차가 존재하는 최대값과 최소값의 차이(peak-to-peak)보다 표준 편차가 NRRO 의 특성을 더 잘 나타낼 수 있기 때문이다. Table 3 에서 온도 상승에 따라 RRO 는 약 6% 증가하고 NRRO 는 약 14% 감소하였다. Fig. 10 과 Fig. 11 은 측정된 TIR, RRO, NRRO 를 주파수 영역에서 나타낸 것이다. Fig. 10 과 Fig. 11 을 비교해 보면 RRO 는

온도 상승에 따라 크게 변화하지 않으나 NRRO 는 주파수 분포와 크기에서 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 그러므로 Table 3 과 Fig. 10 과 Fig. 11 을 통해 HDD 회전축계 진동 성분 중에서 온도 상승에 따른 변화는 RRO 보다 NRRO 가 더 큰 것을 알 수 있다.

#### 4. 온도 상승에 따른 NRRO 특성 해석

HDD 회전축계에서 발생하는 NRRO 는 주로 스피indle 모터를 지지하는 볼 베어링의 가진에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다.<sup>(4)</sup> 볼 베어링 가진

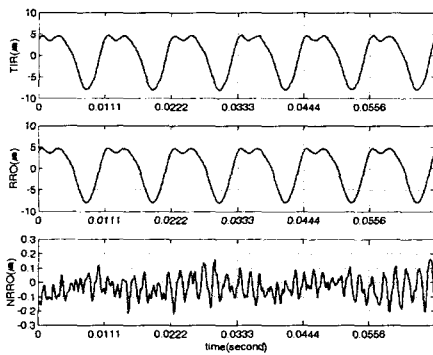


Fig. 8 Runout of a HDD spindle system in time domain at room temperature(28°C)

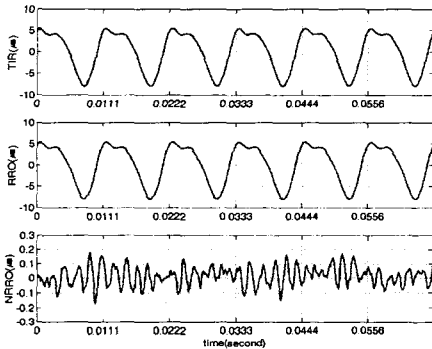


Fig. 9 Runout of a HDD spindle system in time domain at elevated temperature(69°C)

Table 3 Runout of a HDD spindle system

	Room Temperature (28°C)	Elevated Temperature (69°C)
TIR (peak-to-peak)[μm]	13.022	13.824 (+6.16%)
RRO (peak-to-peak)[μm]	12.651	13.365 (+5.64%)
NRRO(±3σ)[μm]	0.455	0.392 (-13.85%)

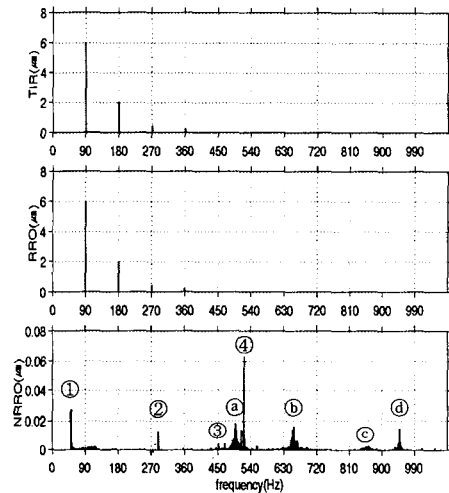


Fig. 10 Runout of a HDD spindle system in frequency domain at room temperature(28°C)

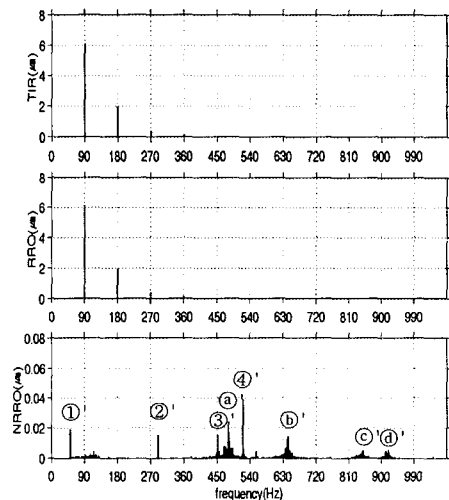


Fig. 11 Runout of a HDD spindle system in frequency domain at elevated temperature(69°C)

**Table 4** Bearing frequencies and their sources

Bearing frequency	Source
$pn(f_o - f_c), pn(f_o - f_c) \pm qf_c$	Outer race form error
$pnf_c$	Inner race form error
$2pf_r, 2pf_r \pm qf_c$	Irregularity of Ball
$pf_c$	Difference of ball diameter

$n$  : number of balls,  $p, q$  : positive integer

**Table 5** Frequencies of NRRO in Fig. 10 (unit: Hz)

	Experimental measurement (NRRO frequency)	Theoretical analysis (bearing frequency)	
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	$10f_c$
①a	498.5	502.74	$2f_r$
①b	657.8	659.18	$2f_r + 3f_c$
①c	859.2	865.64	$30(f_o - f_c) - 3f_o$
①d	946.4	953.33	$4f_r - f_c$

**Table 6** Frequencies of NRRO in Fig. 11 (unit: Hz)

	Experimental measurement (NRRO frequency)	Theoretical analysis (bearing frequency)		
		Upper bearing	Lower bearing	
①'	52.0 (-)	52.09 (-0.06)	52.00 (-0.15)	$f_c$
②'	289.7 (+0.7)	289.10 (+0.55)	289.99 (+1.44)	$10(f_o - f_c) - f_o$
③'	452.1 (-)	450.89 (+0.29)	451.36 (+0.76)	$2f_r - f_c$
④'	521.0 (-0.7)	520.90 (-0.55)	520.01 (-1.44)	$10f_c$
①a'	481.6	486.72	485.06	$4f_r - 10f_c$
①b'	643.4	642.72	641.33	$4f_r - 7f_c$
①c'	848.0	849.98	848.20	$20(f_o - f_c) + f_o$
①d'	918.0	919.99	919.10	$10(f_o - f_c) + 6f_o$

에 의해 발생하는 주파수는 Table 4 와 같이 볼 베어링 내부 회전 운동을 결정하는 베어링 케이지 회전 주파수 ( $f_c$ )와 볼 구름 주파수 ( $f_r$ ) 그리고 HDD 회전축계 회전 주파수 ( $f_o$ )의 조합으로 나타나게 된다.<sup>(7)</sup> Table 5 와 Table 6 은 각각 Table 4 의 베어링 가진 주파수를 이용하여 Fig. 10 과 Fig. 11 의 NRRO 주파수 성분이 어떤 원인에 의해 발생하였는지 살펴본 것이다. Table 6 에서 괄호 안의 숫자는 온도 상승에 따른 NRRO 주파수와 베어링 가진 주파수의 변화를 나타내며, 상부 베어링 가진 주파수와 하부 베어링 가진 주파수 해석 결과가 약간 차이가 나는 것은 온도 상승에 의해 발생하는 상부 베어링 변위와 하부 베어링의 변위가 같지 않아 Table 2 와 같이 고온에서 상부 베어링 내부 회전 운동 주파수가 하부 베어링과 약간 달라지기 때문이다. Table 5 와 Table 6 에서 ①과 ①', ②와 ②', ③과 ③', 그리고 ④와 ④' 은 같은 베어링 가진 주파수에 의해 발생한 NRRO 성분이다. 특히, ②와 ②' 그리고 ④와 ④' 의 경우 각각 그 베어링 가진 주파수가  $10(f_o - f_c) - f_o, 10f_c$  로서 온도 상승에 따른 베어링 접촉각 증가에 의한 케이지 회전 주파수 ( $f_c$ ) 변화에 베어링 볼 개수(10)가 곱해지므로 베어링 가진 주파수의 변화가 커져서 NRRO 주파수도 변화하였음을 알 수 있다. ①과 ①' 그리고 ③과 ③' 에서 온도 상승에 따른 NRRO 주파수 변화가 측정되지 않은 것은 온도 상승에 의한 해당 베어링 가진 주파수 변화량이 작기 때문이다. 그리고 Table 6 에서 이론적 해석과 달리 고온에서의 상하 베어링 가진 주파수 차이가 실험에서 측정되지 않은 것은 온도 상승에 의해 발생하는 상하 베어링 가진 주파수 차이가 작기 때문이다.

Fig. 10 과 Fig. 11 에서 온도가 상승하면 ③번 NRRO 의 크기는 증가하고 ④번 NRRO 의 크기는 감소함을 알 수 있다. 또한 Table 5 와 Table 6 에서 ①a와 ①a', ①b와 ①b', ①c와 ①c', ①d와 ①d' 의 경우 온도 상승에 따라 상온에서 존재하던 NRRO 주파수가 없어지고, 그 보다 낮은 주파수 영역에서 새로운 NRRO 주파수가 생겼음을 알 수 있다. 이 두 가지 현상은 온도 상승에 따른 볼 베어링 강성 감소와 디스크 잔류 응력 변화로 인해 HDD 회전축계 고유 진동수가 감소하여 공진 영역이 변화했기 때문이다.<sup>(1)(2)(8)</sup> 본 연구에서는 이를 확인하기 위해 상온과 고온에서 각각 HDD 회전축계의 고유 진동수를 측정하였다. Fig. 12 는

온도 상승에 따른 HDD 회전축계 고유 진동수 측정을 위한 실험 장치이다. Fig. 12에서 충격 해머의 가진에 대한 HDD 회전축계의 응답을 레이저로 측정하고 이를 신호 분석기로 분석하여 주파수 응답 함수를 구하였다. Fig. 13은 상온(28°C)과 고온(69°C)에서 측정된 HDD 회전축계 주파수

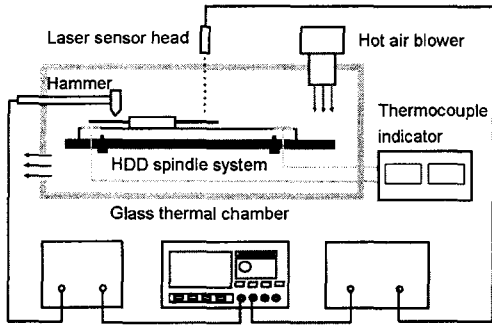


Fig. 12 Experiment setup to measure the natural frequencies of a HDD spindle system

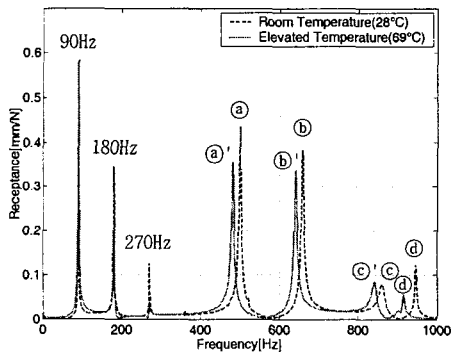


Fig. 13 Frequency response functions of a HDD spindle system

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

	Mode	Room temperature(28°C)	Elevated temperature(69°C)
(a)	Backward Rocking	500	481(-19)
(b)	Forward Rocking	658	641(-17)
(c)	Axial	860	841(-19)
(d)	Disk(0,2) Backward	945	914(-31)

응답 함수이며, Fig. 13에서 90, 180, 270Hz 주파수는 HDD 회전 운동에 의해 나타나는 회전 주파수 정수배 성분이다. Table 7은 온도에 따른 HDD 회전축계의 고유 진동수 변화와 해당 고유 모드를 정리한 것이다. Fig. 13과 Table 7에서 온도가 상승하면 HDD 회전축계의 고유 진동수는 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 14와 Fig. 15는 NRRO 주파수 성분과 HDD 회전축계 고유 진동수를 상온과 고온에서 비교한 것이다. Fig. 14와 Fig. 15를 통해 온도 상승에 따른 HDD 회전축계 고유 진동수 감소에 의한 공진 영역 변화로 온도 상승 후 ③번 NRRO 주파수의 크기는 커지고 ④번 NRRO 주파수 크기는 작아지며, (a), (b), (c), (d) NRRO 주파수는 없어지고 (a'), (b'), (c'), (d') NRRO 주파수가 새로 생겼음을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 HDD 회전축계 온도 상승에 의

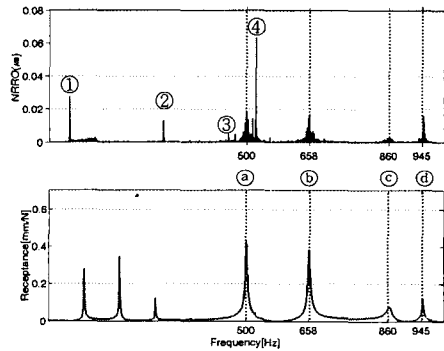


Fig. 14 NRRO and Frequency response function of a HDD spindle system at room temperature(28°C)

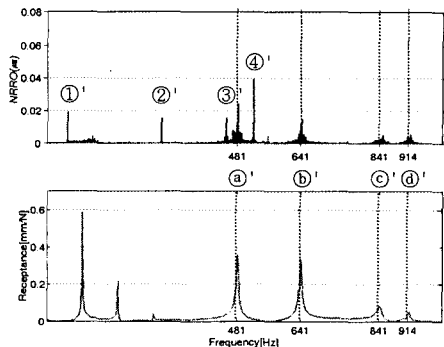


Fig. 15 NRRO and Frequency response function of a HDD spindle system at elevated temperature(69°C)

해 발생하는 볼 베어링의 특성 변화를 해석하고, 볼 베어링의 특성 변화가 HDD 회전축계 NRRO 에 미치는 영향을 분석하였다. HDD 의 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 베어링 가진에 의해 발생하는 NRRO 에 영향을 미치게 된다. 베어링 가진 주파수의 경우 그 변화가 작아 NRRO 에 미치는 영향은 무시할 수 있으나, 베어링 강성 감소는 HDD 회전축계 고유 진동수에 의한 공진 영역을 변화시킴으로써 NRRO 주파수의 크기와 분포를 변화시키게 된다. 그러므로 HDD 회전축계 온도 상승에 따른 NRRO 변화로 인해 발생할 수 있는 HDD 회전 정밀도 저하를 방지하기 위해서는 온도 상승에 따른 볼 베어링 강성 감소를 막을 수 있는 스피들 모터 설계가 필요하다.

### 참 고 문 헌

- (1) Chaw-Wu Tseng, Jr-Yi Shen, C. -P. R. Ku and I. Y. Shen, 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) G. H. Jang, D. K. Kim, J. H. Han and C. S. Kim, 2003, "Analysis of Dynamic Characteristics of a HDD Spindle System Supported by Ball Bearing due to Temperature Variation", Microsystem Technologies, Vol. 124, pp. 794-800
- (3) 정동관, 1996, "3.5 인치 하드 디스크 드라이브 스피들 모터의 회전축을 지지하는 볼 베어링의 동특성 해석", 한양대학교 석사학위논문
- (4) G. H. Jang, D. K. Kim and J. E. Oh, 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
- (5) Richter W. O., Talke F. E., 1988, "Nonrepeatable radial and axial runout 5 1/4" disk drive spindles", IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 24, No. 6, pp. 2760-2762
- (6) K. Ono, N. Saiki, Y. Sanada and A. Kumano, 1991, "Analysis of Nonrepeatable Radial Vibration of Magnetic Disk Spindles", Transaction of ASME Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 133, pp. 292-298
- (7) 정성원, 장건희, 2001, "다수의 각접촉 볼베어링으로 지지된 5 자유도 회전계에서 볼베어링의 waviness 에 의해 발생하는 비선형 진동 해석 모델", 한국소음진동공학회지, 제 11 권, 제 2 호, pp. 336-345
- (8) Jr-Yi Shen, Chaw-Wu Tseng, I. Y. Shen and C. -P. R. Ku, 2000, "Vibration of Disk Media at Elevated Temperatures", Journal of Information Storage and Processing Systems, Vol. 2, pp. 307-312