

컴퓨터 하드 디스크 드라이브 스피들 모터 런아웃 측정 및 해석

장건희* 0 김동균**

Analysis and Measurement of a HDD Spindle Motor Runout

Gunhee Jang and Dongkyun Kim

Abstract

This research presented a frequency analysis method to analyze NRRO in a computer hard disk drive. RRO was proved to be the harmonics of rotational frequency. The frequency components of NRRO is the subtraction of the harmonics from TIR in frequency domain, so that NRRO in time domain can be obtained by Fourier inverse transformation of NRRO in frequency domain. This method can make the experiments simple without the index signal indispensable to time domain analysis. This research also shows that NRRO is caused by the defect frequencies of ball bearing. Even though the excitation force of ball bearing is independent of the rotational speed, the amplitude of NRRO is magnified near the resonance frequencies of the spindle motor. NRRO in axial direction is almost twice bigger than that in radial direction, because the spindle motor has smaller stiffness in axial direction.

1. 서 론

대용량의 하드 디스크 드라이브를 구현하기 위해서는 스피들 모터에서 발생하는 비반복적인 진동 성분을 감소시키고 트랙 서보 제어 기능을 향상시켜야 한다. 그림 1 과 같이 이상적인 디스크 트랙의 궤적은 진원(true circle)이지만 스피들 모터의 진동에 의해 실제 트랙과 진원의 차이인 디스크 런아웃이 발생하며 디스크 런아웃은 헤드가 트랙을 읽을 때의 에러를 발생시키는 요인이 된다.

디스크 런아웃을 TIR (Total Indicated Runout)이라 하면 TIR 은 회전 주기마다 반복되는 성분인 RRO (Repeatable RunOut)와 반복되지 않는 성분인 NRRO (Non-Repeatable RunOut) 로 나눌 수 있다. RRO 와 달

* 정회원 한양대학교 정밀기계공학과

** 한양대학교 정밀기계공학과

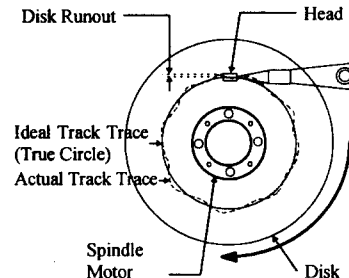


Fig. 1 Disk Runout in Hard Disk Drive

리 NRRO 는 제어 시스템에 의해 보상될 수 없으므로 NRRO 의 크기는 디스크의 자기 기록 밀도(Magnetic Track Density)를 제한하는 중요한 요소이며 하드 디스크 드라이브에서의 NRRO 는 track pitch 의 약 5% 이내로 규제하고 있다. 현재 보편적인 3.5" 하드 디스크 드라이브에 있어 자기 기록 밀도는 약 7000 TPI(Track Per Inch)이며 이 경우 track pitch 는 3.6 μm 이고 NRRO 는 0.18 μm 이하로 규제되고 있다. 2000 년에는 자기 기록

밀도가 25000TPI 정도가 될 것으로 예상되며 이 경우 NRRO가 0.05 μm 이하가 되어야 한다.

Bourchard와 Lau 등[1]은 시간 영역과 주파수 영역에서의 NRRO 측정 방법을 정립하여 볼 베어링과 유체 베어링에서의 NRRO를 해석하였으며 Klein[2]은 반경 방향의 NRRO 측정 시스템을 개발하여 NRRO의 측정뿐 아니라 스피들 모터의 검증 시스템으로도 사용하였다. Richter와 Talke[3]는 3.5" 하드디스크 드라이브에서 반경 방향과 축 방향의 NRRO의 상호관계에 관한 연구를 하였으며 Ono와 Saiki 등[4]은 Jitter 현상과 마그네틱 드럼 모터의 볼 베어링의 가진에 의해 발생하는 NRRO의 관계에 관한 연구를 수행하였다. 또한 Ohmi[5]는 시뮬레이션을 통해 스피들 모터의 NRRO와 Head Tracking Error 사이의 관계를 연구하였다. NRRO 계산 방법에는 평균법(Average Method), 단일점법(Single Point Method), 빼기법(Subtraction Method), 주파수 영역법(Frequency Domain Method)이 있으며, 계산이 쉽고 모터의 전체적인 NRRO를 파악할 수 있는 장점을 지닌 평균법이 가장 많이 쓰이고 있다. 이러한 계산 방법들은 모터의 특정 위치에서의 변위를 측정하여 이를 바탕으로 NRRO를 계산하며 특정 위치를 파악하기 위하여 엔코더 등의 보조 장치를 쓰고 있다.

본 연구에서는 Klein[2]이 제시한 주파수 영역에서의 NRRO 계산 방법을 응용하여 모터의 위치에 대한 정보를 제공하는 보조 장치 없이 NRRO를 계산할 수 있는 방법을 제시하고 이를 수학적으로 증명하였다. 이 방법을 실험적으로 확인하기 위하여 3.5" 하드 디스크 드라이브 스피들 모터의 NRRO를 평균법과 제시된 방법을 사용하여 비교 검토하였다. 또한 모터의 회전 속도를 변화시키면서 측정한 Campbell Diagram을 통해 NRRO의 원인을 규명하고 모터의 고유 진동수와와의 관계를 고찰하였다.

2. NRRO 해석 방법

2.1. 평균법(Average Method)

그림 2와 같이 모터의 1회전 주기를 L개의 섹터로 나누고 M번의 회전에 대하여 각 섹터의 변위를 측정하여 l번째 섹터, m번째 회전의 변위를 $TIR(l, m)$ 이라 정의한다. TIR은 RRO와 NRRO로 나눌 수 있고, RRO는 각 회전 때마다 반복되므로 m에는 무관한 값으로서 $RRO(l)$ 으로 표현된다.

$$TIR(l, m) = RRO(l) + NRRO(l, m) \quad (1)$$

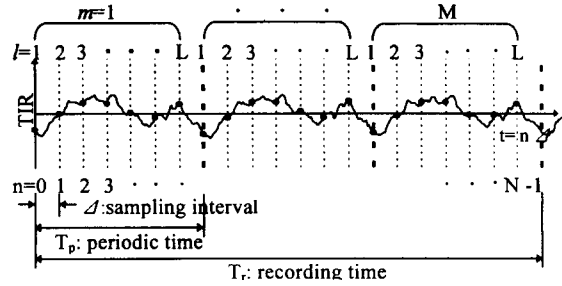


Fig. 2 sector(l) and revolution(m) in TIR

NRRO는 반복되지 않는 불규칙 성분이므로 충분히 큰 개수의 데이터에 대하여 그 평균은 0에 수렴한다. 따라서 RRO의 값은 TIR을 각 섹터별로 평균함으로써 얻어진다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M TIR(l, m) \\ &= \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (RRO(l) + NRRO(l, m)) \\ &= \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M RRO(l) + \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M NRRO(l, m) \\ &= RRO(l) \end{aligned} \quad (2)$$

NRRO는 TIR에서 RRO를 빼면 구할 수 있다.

$$NRRO(l, m) = TIR(l, m) - RRO(l) \quad (3)$$

2.2. 주파수 해석법(Frequency Analysis Method)

그림 2와 같이 얻어진 $N(N=L \times M)$ 개 TIR의 RRO 성분 중에서 n 번째를 x_n 이라 놓고 RRO의 이산 푸리에 변환을 구하면 아래와 같다.

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-1} x_n e^{-i \frac{2\pi kn}{N}} \quad (4)$$

$$(k = 0, 1, 2, \dots, N-1)$$

$n=(m-1)L+(l-1)$ 이므로 이를 (4)에 대입하면 아래와 같다.

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M x_{(m-1)L+(l-1)} e^{-i \frac{2\pi k}{N} ((m-1)L+(l-1))} \quad (5)$$

$x_{(m-1)L+(l-1)}$ 은 RRO이므로 x_{l-1} 과 같다.

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^L x_{l-1} e^{-i \frac{2\pi k}{N} (-L+l-1)} \left(\sum_{m=1}^M e^{-i \frac{2\pi k}{N} mL} \right) \quad (6)$$

식 (6)에서 $N=M \times L$ 의 관계를 이용하면

$$\sum_{m=1}^M e^{-i\frac{2\pi k}{N}mL} = \sum_{m=1}^M e^{-i\frac{2\pi k}{M}m} \quad (7)$$

$$= \begin{cases} M & \text{if } k=0, M, \dots \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

즉 X_k 에 대하여 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$X_k = \begin{cases} \frac{M}{N} \sum_{l=1}^L x_{l-1} e^{-i\frac{2\pi k}{N}(-L+l-1)} & k=0, M, \dots \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

그러므로 RRO를 푸리에 변환하면 회전 주파수의 정수배에 해당하는 성분만이 존재하며, 회전 주파수의 정수배 성분을 푸리에 역변환하면 시간 영역에서 RRO가 된다. 따라서 측정된 변위(TIR)를 푸리에 변환하여 회전 주파수의 정수배 성분(RRO)을 빼면 NRRO 성분을 구할 수 있고 이를 푸리에 역변환으로 시간 영역으로 옮기면 NRRO를 얻게 된다.

3. 실험 결과 및 해석

3.1. 평균법

본 연구에서는 정격 회전 속도 90Hz의 3.5" 하드 디스크 드라이브 스피ن들 모터를 실험에 사용하였다. 모터의 TIR은 모터 드라이버에서 나오는 전기적 신호(Index Signal)를 이용하여 모터 1회전 주기를 128섹터로 나누고 모터가 128회전할 때까지의 변위를 측정하여 얻어졌다. TIR 측정 시스템은 그림 3과 같고 반경 방향과 축 방향 변위 센서의 해상도(resolution)는 각각 11.6nm, 12.7nm이다.

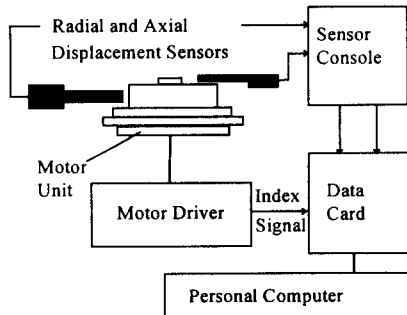


Fig. 3 TIR Measurement System in Average Method

그림 4는 정전 용량 변위 센서에서 측정된 반경 방향의 변위 신호(TIR)를 가지고 평균법을 사용하여 RRO와 NRRO를 구한 것이며 각각에 대한 peak-to-peak 값과 표준 편차는 표 1과 같다. 그림 5는 NRRO의 히스토그램이며, 실선은 NRRO에서 구한 평균과 표준편차를 가지는 정규 분포이다. NRRO의 분포는 정규 분포에 가까우며 평균은 0임을 알 수 있다.

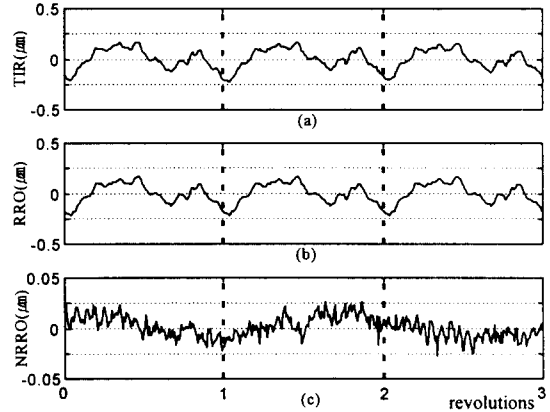


Fig. 4 Average Method Analysis with Capacitive Sensor (a) TIR (b) RRO (c) NRRO

Table 1 Peak-to-peak Value and standard deviation of TIR, RRO, and NRRO by Average Method Analysis with Capacitive Sensor

	pk-pk(μm)	σ(μm)
TIR	0.4420	0.0982
RRO	0.3840	0.0980
NRRO	0.0870	0.0105

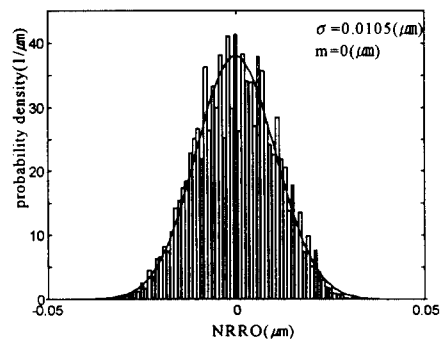


Fig. 5 Probability Density Function of NRRO by Average Method

3.2. 주파수 해석법

그림 6은 3.1 절에서 얻은 TIR을 푸리에 변환한

후 회전 주파수의 정수배 성분들인 RRO를 제거하여 NRRO의 주파수 성분을 구한 것이다. 그림 7은 이를 푸리에 역변환하여 시간 영역으로 옮긴 것으로 해석 방법에서 제시한 것처럼 평균법을 사용하여 계산한 그림 4과 동일하게 된다.

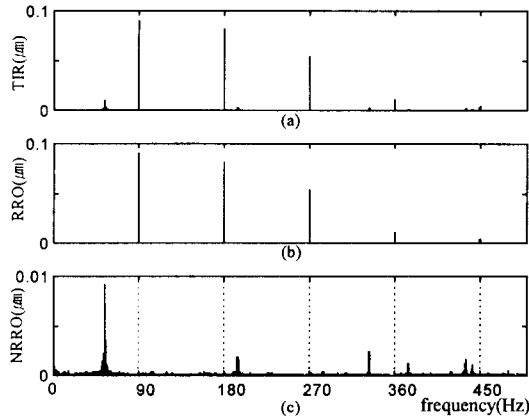


Fig. 6 Frequency Analysis of Spindle Motor Runout (a) TIR (b)RRO (c)NRRO in frequency domain

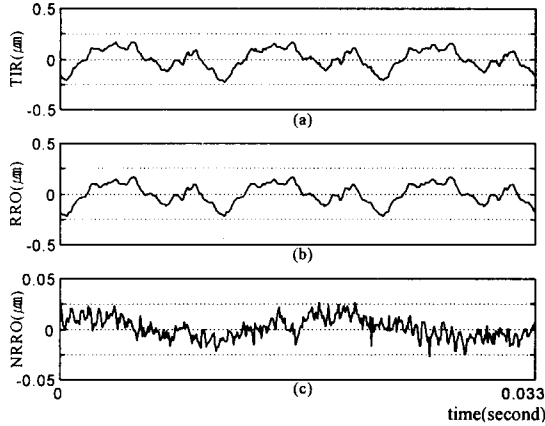


Fig. 7 Frequency Analysis Method with Capacitive Sensor (a) TIR (b) RRO (c) NRRO

3.3. 평균법과 주파수 해석법 비교

평균법에서는 NRRO가 정확히 계산되기 위해 섹터의 위치가 각 회전시마다 동일해야 한다. 이를 위해 모터에 엔코더를 설치하거나 sampling frequency를 조절하는 control board를 사용하는 등의 방법이 이용되고 있다. 엔코더를 설치하는 경우는 모터의 동특성이 변할 수 있고 control board는 NRRO 측정 시스템을 복잡하고 비싸게 만드는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서 제시한 주파수 해석법의 경우 이산

푸리에 변환의 정의에 의해 회전 주파수의 정수배의 성분들(RRO)은 회전 주기의 배수에 해당하는 시간의 신호만 얻으면 된다. 회전 주기의 배수의 신호는 미리 속도와 sampling frequency에 맞추어 측정 시간을 정하거나 임의의 측정 시간 동안의 해석 결과에서 나온 주기를 기준으로 알맞은 크기의 측정 자료를 선택함으로써 얻을 수 있다. 따라서 평균법과 달리 주파수 해석법에서는 섹터를 나누지 않아도 NRRO를 계산할 수 있다.

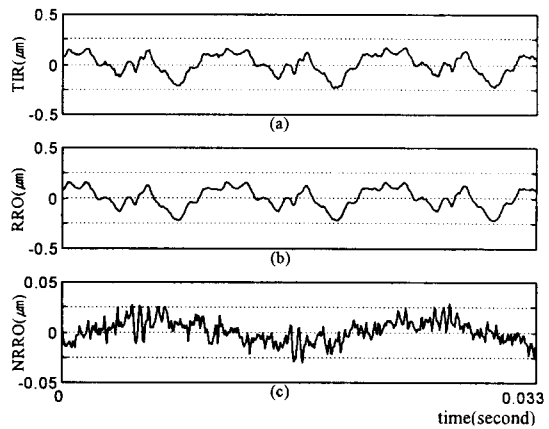


Fig. 8 Frequency Analysis Method with Capacitive Sensor (a) TIR (b) RRO (c) NRRO

Table 2 Peak-to-peak Value and standard deviation of TIR, RRO, and NRRO by Frequency Analysis Method with Capacitance Sensor

	pk-pk(μm)	σ (μm)
TIR	0.4322	0.1015
RRO	0.3926	0.1010
NRRO	0.0617	0.0097

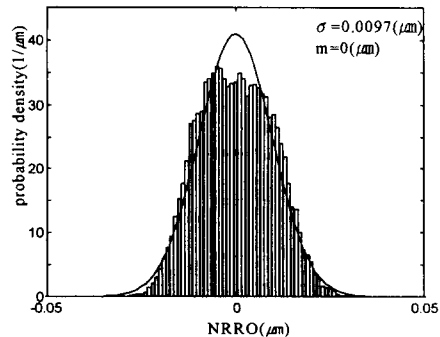


Fig. 9 Probability Density Functions of NRRO by Frequency Analysis Method

그림 8은 섹터를 나누지 않고 회전 속도 90Hz, sampling frequency 12,800Hz에서 측정 시간을 2초로 하여 180 주기의 신호(25,600 개의 데이터)를 얻은 다음 주파수 해석법을 사용하여 RRO와 NRRO를 계산한 것이다. TIR, RRO, NRRO의 peak-to-peak 값과 표준편차는 표 2와 같다. 불규칙한(random) 성격을 갖는 NRRO의 통계적 특성을 나타내는 표준편차는 표 1의 값과 거의 같으나 peak-to-peak 값은 차이가 나는 것을 알 수 있다. 그림 9는 주파수 분석법으로 해석한 NRRO의 히스토그램이며, 실선은 NRRO에서 구한 평균과 표준편차를 가지는 정규 분포이다. 이를 그림 5와 비교하여 보면 평균법에 의한 NRRO와 주파수 해석법에 의한 NRRO는 같은 통계적 분포를 하는 것을 알 수 있다. 이렇게 주파수 분석에 의한 NRRO 계산에서는 섹터를 나눌 필요가 없으므로 간단한 NRRO 측정 시스템 구축이 가능하다.

주파수 분석법이 가지는 또 하나의 장점은 평균법과 달리 변위 센서의 종류에 대한 제약이 없다는 것이다. 예를 들어 광 센서를 변위 측정에 사용하는 경우 그림 10에서와 같이 정전 용량 센서에서는 나타나지 않는 표면 거칠기 성분이 검출되어 변위 신호의 변화가 심해진다. 이는 평균법에서 섹터를 나눌 때의 약간의 차이가 NRRO 계산에 있어 큰 오차를 만드는 요인이 된다. 이러한 문제 때문에 평균법에 의한 NRRO 측정에는 주로 정전 용량 센서가 사용되어 왔으며 광 센서를 사용하는 경우에는 표면 거칠기의 고주파 성분을 없애기 위해 Low Pass Filter (cutoff frequency: 1000Hz)를 사용하였다.[4] 변위 측정면인 허브의 표면 거칠기는 3.2S로서 기준 길이 0.8mm인 채취 부분의 평균선에 대한 최대 높이와 최소 높이의 차이가 3.2 μm 이며 표면 거칠기가 포함된 변위 신호는 값도 크고 변화도 심해진다.

이에 비해 주파수 해석법은 섹터를 나눌 필요가 없으므로 광 센서를 사용하여도 NRRO를 계산할 수 있다. 그림 11은 광 센서에서 측정된 반경 방향의 변위(TIR)를 가지고 주파수 해석법으로 RRO와 NRRO를 구한 것이고 표 3은 각각에 대한 peak-to-peak 값과 표준 편차이다. 이를 통해 광 센서를 사용함으로써 나타나는 측정 대상의 표면 거칠기는 RRO 성분이 되는 것을 알 수 있다. 광 센서를 사용하여 구한 NRRO의 표준 편차가 정전 용량 센서를 사용한 경우보다 큰 것은 실험에 사용된 두 센서의 분해능의 차이에 의한 것이다. (정전 용량 센서: 11.6nm, 광 센서: 47.2nm) 센서의 분해능은 센서가 갖는 noise에 의해

결정되는데, 그림 12와 같이 각각의 센서로 측정된 NRRO의 주파수 성분을 비교하여 보면 광 센서의 noise가 정전 용량 센서의 noise보다 크음을 알 수 있고 NRRO의 성분들은 비슷한 값을 가짐을 알 수 있다. 그러므로 모터의 변위 측정에 광 센서를 사용하는 경우, 변위 신호에 표면 거칠기가 포함되어 신호의 변화가 심하게 되므로 평균법으로는 NRRO를 측정하기 어렵지만 주파수 해석법은 이에 관계없이 NRRO를 측정할 수 있다. 따라서 디스크를 달았을 때와 같은 측정면 확보가 어려워 정전 용량 센서의 사용이 힘든 경우에도 광 센서와 주파수 해석법을 이용하여 NRRO를 계산할 수 있다.

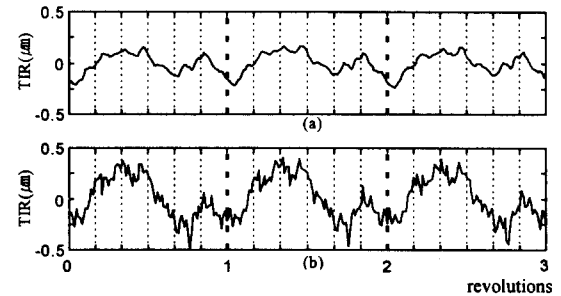


Fig. 10 TIR (a) capacitive sensor (b) optic sensor

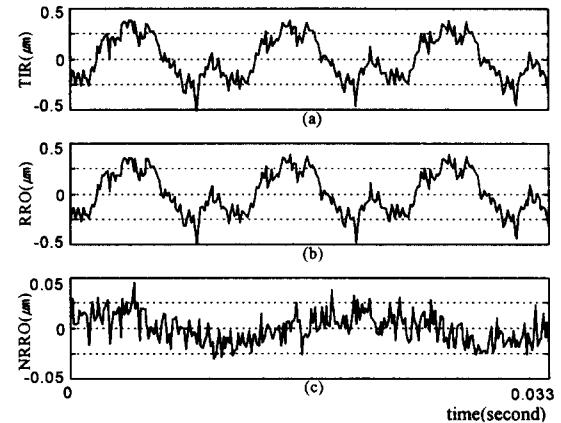


Fig. 11 Frequency Analysis Method with Optic Sensor (a) TIR (b) RRO (c) NRRO

Table 3 Peak-to-peak Value and standard deviation of TIR, RRO, and NRRO by Frequency Analysis Method with Optic Sensor

	pk-pk(μm)	σ (μm)
TIR	0.9138	0.2066
RRO	0.8832	0.2061
NRRO	0.0882	0.0138

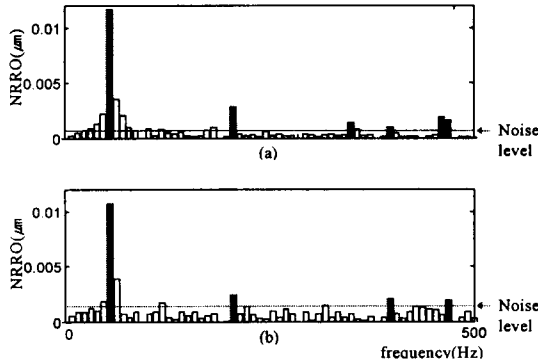


Fig. 12 NRRO in frequency domain
(a) capacitive sensor (b) optic sensor

3.4. NRRO 원인 규명

스핀들 모터의 NRRO는 모터를 지지하고 있는 베어링 요소의 결합이 모터 회전시 강제 진동을 일으켜 생기는 것으로 알려져 있다. 베어링 요소의 결합에 의해서 발생할 수 있는 가진 주파수는 표 4와 같다.[6]

Table 4 Expected Defect Frequency of Ball Bearing

Cause	Defect Frequency
Outer Race Defect or Waviness	pnf_o $pnf_{co} \pm qf_o$
Inner Race Defect or Waviness	pnf_c $pnf_c \pm qf_o$
Irregularity of Ball	$2pf_R \pm f_c$ $2pf_R + f_c - qf_o$
Difference of Ball Diameter	pf_c

f_o : rotational frequency of outer race

f_c : rotational frequency of cage

f_{co} : rotational frequency of outer race relative to cage

f_R : spin frequency of ball

n : number of ball p, q : positive integer

그림 13 과 그림 14 는 모터의 회전 속도를 76Hz 에서 102Hz 까지 6Hz 씩 증가시켜가면서 측정한 반경 방향과 축 방향의 TIR 을 가지고 주파수 분석법으로 NRRO 의 주파수 성분을 구하여 이를 Campbell diagram 으로 나타낸 것이다. 그림에서 원의 크기는 주파수 성분의 진폭과 비례하고 실선은 베어링 결합 주파수를 나타낸다. 그림 14, 15 에서 대부분의 NRRO 는 베어링의 결합 주파수에 의해 설명되고 있다. 실험 결과 축 방향의 NRRO 가 반경 방향의 NRRO 보다 약 2

배 크게 나타났는데, 이는 스핀들 모터의 축 방향의 강성 계수가 반경 방향 강성 계수보다 작아서 NRRO 가 축 방향으로 크게 나타났기 때문이다.[7]

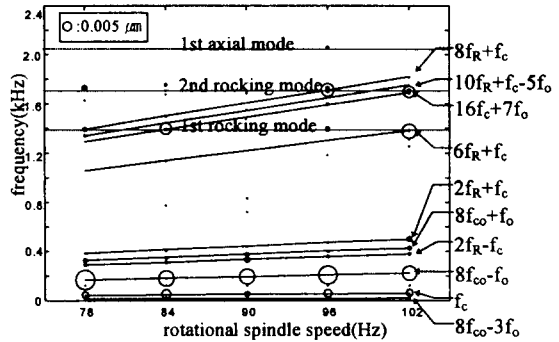


Fig. 14 Campbell Diagram of Radial NRRO

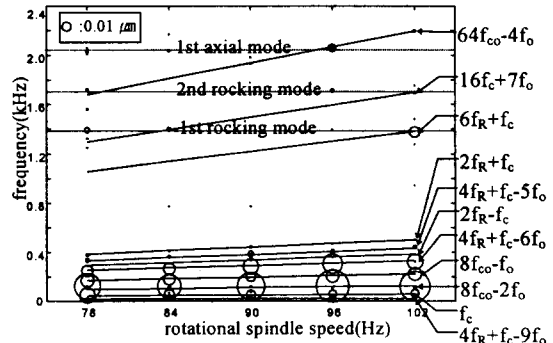


Fig. 15 Campbell Diagram of Axial NRRO

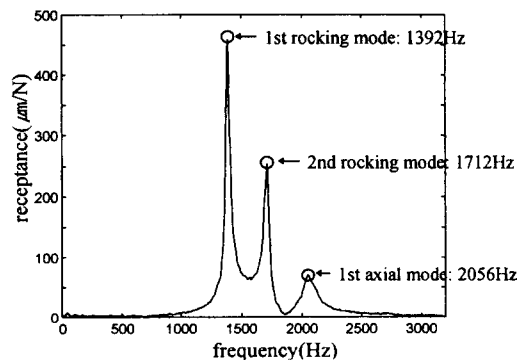


Fig. 16 Frequency Response Function of the Motor

충격 실험을 통해 구한 모터의 주파수 응답 함수와 고유 주파수는 그림 16 과 같다. 1392Hz 와 1712Hz 는 스핀들 모터의 rocking mode 에 해당하며 2056Hz 는 축 방향 모드이다.[8] 그림 14, 15 에서 같은 원인에 의한 NRRO 의 진폭은 공진시를 제외하고

회전 속도가 증가하여도 일정함을 알 수 있는데 이는 볼 베어링 결함에 의한 가진력이 회전 속도와 관계없이 일정함을 나타낸다. 가진 주파수가 고유 주파수 근처에 있으면 공진 현상으로 인해 NRRO의 진폭이 커지고 있는데 고유 주파수 1392Hz와 1712Hz는 rocking 모드이기 때문에 반경 방향, 축 방향 NRRO 모두에 영향을 주고 있으며, 고유 주파수 2056Hz는 축 방향으로 진동하는 모드이므로 축 방향의 NRRO에만 영향을 미치고 있다. 따라서 NRRO의 진폭은 고유 주파수뿐 아니라 그 고유 모드의 형상과도 관련이 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 HDD 스피들 모터의 런아웃 측정 시스템을 구성하고 NRRO를 해석하기 위한 주파수 해석법을 제시하였다. RRO는 주파수 영역에서 회전 주파수의 정수배 성분으로 나타나므로 TIR의 주파수 성분에서 이를 빼줌으로써 NRRO의 주파수 성분을 구할 수 있고 이를 푸리에 역변환하면 시간 영역의 NRRO를 구할 수 있다. 이 방법은 모터의 위치에 대한 정보 없이 NRRO 측정이 가능하므로 보다 간단한 측정 시스템 구성이 가능하며 센서에 대한 제약이 없다. 측정된 NRRO의 Campbell Diagram을 통해 NRRO의 원인이 볼 베어링 결함에 의한 가진에 있음을 확인하였다. 같은 볼 베어링 결함에 의한 가진력은 회전 속도에 관계없이 일정하지만, 가진이 고유 주파수 근처에서 이루어지면 공진 현상으로 NRRO의 진폭이 커진다. 이 때 Rocking Mode는 반경 방향, 축 방향 모두에 영향을 주고 Axial Mode는 축 방향의 NRRO에만 영향을 주었다. 또한 스피들 모터의 축 방향의 강성이 반경 방향보다 작기 때문에 축 방향의 NRRO가 반경 방향보다 크게 나타났다.

후 기

본 연구는 한국 과학 재단의 핵심 연구 과제 “컴퓨터 하드 디스크 드라이브 스피들 모터에서 발생하는 런아웃 해석 및 측정 시스템 개발에 관한 연구”의 지원으로 수행되었으며, 실험에 협조해주신 삼성 종합 기술원 정밀 기계 Lab과 삼성 전기 정밀 사업부 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] G. Bouchard, L. Lau and F. E. Talke, "An Investigation of Nonrepeatable Spindle Run-out", IEEE Trans. Magn., Vol. 23, No. 5, 1987, pp3687-3689.
- [2] E. J. Klein, "The Asynchronous Runout of Spindle", Mechanical Signature Analysis, Machinery Vibration, Flow-Induced Vibration and Acoustic Noise Analysis -De-Vol. 7, ASME, Sept. 1987, pp95-99.
- [3] W. O. Richter and F. E. Talke, "Nonrepeatable Radial and Axial Runout of 5 1/4 in. Disk Drive Spindles", IEEE Trans. Magn., Vol. 24, No. 6, 1988, pp2760-2762.
- [4] K. Ono, N. Saiki, Y. Sanada and A. Kumano, "Analysis of Nonrepeatable Radial Vibration of Magnetic Disk Spindles", Trans. ASME, Vol. 133, 1991, pp292-298.
- [5] T. Ohmi "Non-repeatable Runout of Ball-Bearing Spindle-Motor for 2.5" HDD", Asia-Pacific Magnetic Recording Conference, Sept. 1995.
- [6] T. A. Harris, "Rolling Bearing Analysis ", John Wiley & Sons, 1991.
- [7] G. H. Jang, D. K. Jung, N. Y. Park and J. S. Park, "Analysis of the Dynamic Characteristics of Ball Bearing in 3.5" HDD Spindle Motor ", Proceedings of Incremental Motion Control Systems and Devices, 1996, pp167-174.
- [8] G. H. Jang, J. H. Han, K. C. Ro, N. Y. Park and D. K. Jung, "Analysis of the Vibration Characteristics in a HDD Spindle Motor by Transfer Matrix Method", Proceedings of Incremental Motion Control Systems and Devices, 1997, pp293-300.
- [9] D. E. Newland, "An Introduction to Random Vibrations, Spectral Analysis", Longman Scientific & Technical, Essex, England, 1993.