

# Unbalance force 에 의한 HDD pivot ball bearing 의 동적 반응 분석 Dynamic Analysis of HDD Pivot Ball Bearing by Unbalance Force

윤주영\* · 박노철† · 임건엽\* · 박영필\* · 박경수\*\*

Joo Young Yoon, No-Cheol Park, Gunyeop Lim, Young-Pil Park and Kyoung-Su Park

## 1. 서 론

최근 Solid-state Drive(SSD)의 기술적 발전으로 인해 정보 저장 기기에서 SSD의 시장 점유율이 크게 성장하고 있다. SSD는 Hard Disk Drive(HDD)보다 빠른 입, 출력 속도를 장점을 가지고 있다. 그에 반해, HDD는 SSD보다 입, 출력 속도가 느리지만 SSD보다 정보 저장 용량이 크다. 따라서 SSD의 성장에 대응하여 HDD의 기술 발전은 정보 저장 용량을 늘리는 방향으로 발전하고 있다.

같은 부피에서 HDD의 정보 저장 용량을 더 늘리기 위해서는 자기 기록 밀도를 높여야 한다. 따라서 트랙의 크기는 작아지고, 작은 면적에 정보를 정확히 입, 출력을 하기 위해 더욱 정밀한 슬라이더의 위치 제어가 필요하다. 하지만 슬라이더와 연결되어 있는 피벗 볼 베어링의 비선형적인 특성으로 인해 슬라이더의 위치를 분석하는데 어려움이 있다.

본 연구는 슬라이더의 위치 제어 향상을 위해, unbalance force가 작용하는 피벗 볼 베어링의 비선형 운동에 관하여 연구했다. 액추에이터와 볼 베어링의 결합으로 인해 회전 시 발생하는 unbalance force와 볼과 outer race가 접촉했을 때 발생하는 Hertzian contact force를 고려하여 피벗 볼 베어링의 비선형적 움직임을 분석했다.

## 2. 볼 베어링의 비선형 운동

### 2.1 비선형 운동방정식

#### (1) Unbalance Force

볼 베어링의 outer race와 액추에이터가 결합함으

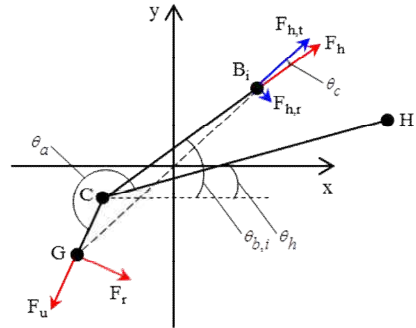


Fig.1 운동방정식에 사용되는 상수 설명

로 인해 질량 중심이 outer race 원 중심에서 이동하게 된다. 볼 베어링이 원 중심에서 회전을 하게 되면 질량 중심이 회전하면서 unbalance force가 발생한다. Fig.1은 피벗의 볼 베어링에 작용하는 힘을 보여준다. 베어링의 작용하는 unbalance force는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{u,x} = md_m \dot{\theta}_h^2 \cos(\theta_a + \theta_h) \quad (1)$$

$$F_{u,y} = md_m \dot{\theta}_h^2 \sin(\theta_a + \theta_h)$$

여기서  $m$ 은 outer race와 액추에이터를 합친 질량이고,  $d_m$ 은 outer race의 원 중심과 질량 중심 사이의 거리이다. 식 1에서 사용된 두 개의 각도는 Fig.1에 표시했다.

#### (2) Rotating Force

슬라이더가 seeking을 하기 위해 피벗의 볼 베어링이 회전을 한다. 그로 인해, 질량 중심에는 회전하는 힘이 발생하게 된다. Rotating force는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{r,x} = md_m \ddot{\theta}_h \cos\left(\theta_a + \theta_h + \frac{\pi}{2}\right) \quad (2)$$

$$F_{r,y} = md_m \ddot{\theta}_h \sin\left(\theta_a + \theta_h + \frac{\pi}{2}\right)$$

피벗 볼 베어링이 회전하는 각 가속도 프로파일은 이전 연구된 논문을 인용하여<sup>(1)</sup> seeking을 할 때 베어링이 회전하는 움직임을 정의했다.

† 교신저자; 연세대학교 기계공학과

E-mail : pnch@yonsei.ac.kr

Tel : 02-2123-4677, Fax : 02-365-8460

\* 연세대학교 기계공학과

\*\* 가천대학교 기계공학과

### (3) Hertzian Contact Force

피봇 볼 베어링의 outer race가 회전하면서, 볼과 outer race가 접촉함으로써 인해 Hertzian contact force가 작용한다. Hertzian contact force는 이전에 연구된 논문을 인용하였다<sup>(2),(3)</sup>. Hertzian contact force는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{h,t,x} = C_b \sum_{i=1}^{N_b} (x_c \cos \theta_i + y_c \sin \theta_i - \gamma_o)_+^{1.5} \cos \theta_c \cos (\theta_{b,i} + \theta_c) \quad (3)$$

$$F_{h,t,y} = C_b \sum_{i=1}^{N_b} (x_c \cos \theta_i + y_c \sin \theta_i - \gamma_o)_+^{1.5} \cos \theta_c \sin (\theta_{b,i} + \theta_c)$$

이전 연구에서는 볼 베어링만을 고려하여 outer race의 원 중심과 질량 중심이 일치한다고 가정했지만, 본 연구에서는 액추에이터가 합쳐져 질량 중심이 이동되었다. 따라서 질량 중심에 작용하는 Hertzian contact force 성분을 나누어 병진운동을 하게 하는 힘과 회전 운동을 하게 하는 힘으로 나누었다.

### (4) Governing Equations

피봇 볼 베어링의 작용하는 힘을 적용하여 질량 중심 $(x_g, y_g)$ 과 outer race의 원 중심 $(x_c, y_c)$ 의 운동방정식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \ddot{x}_g &= \frac{1}{m} (-C\dot{x}_g + F_{u,x} + F_{r,x} + F_{h,t,x}) \\ \ddot{y}_g &= \frac{1}{m} (-C\dot{y}_g + F_{u,y} + F_{r,y} + F_{h,t,y}) \\ \dot{x}_c &= \dot{x}_g - d_m \cos \left( \theta_a + \theta_h + \int \frac{F_{h,r}}{I_c} dt \right) \\ \dot{y}_c &= \dot{y}_g - d_m \sin \left( \theta_a + \theta_h + \int \frac{F_{h,r}}{I_c} dt \right) \end{aligned} \quad (4)$$

## 2.2 결과

위에서 구한 운동방정식을 Table 1에 표시된 상수 값을 대입하여 outer race의 원 중심이 비선형 운동방정식을 적용하여 계산했다. Fig.3은 0초에서 10초까지 헤드가 ID에서 OD사이를 왕복하는 조건에서의 원 중심의 움직임을 나타낸다. Fig.4는 원 중심의 움직임이 saturation되었을 때 원 중심의 움직임을 나타낸다.

## 3. 결 론

Seeking이 시작되고 나서 초기에는 outer race의 원 중심이 계속 움직이다가 saturation이 되었을 때에는 일정한 움직임을 갖는다. 이 때, 일정한 움직임의 크기가  $\pm 20\mu\text{m}$  정도로 트랙의 크기보다 큰 것을 확인할 수 있다.

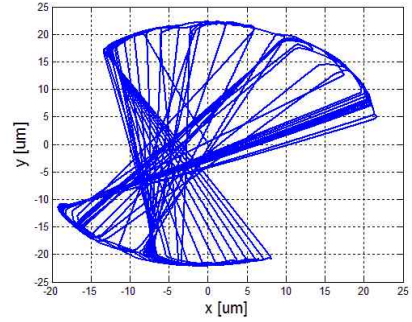


Fig.3 원 중심의 이동(at 0~10sec)

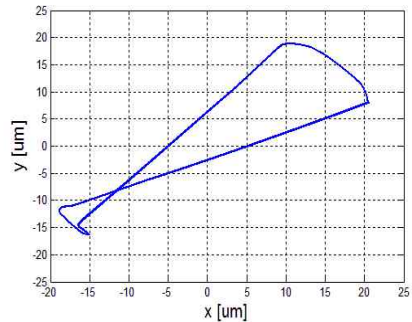


Fig.4 원 중심의 이동(at saturation)

Table 1 상수 값

$C_b$	$2.7 \cdot 10^9 \text{ Nm}^{-1.5}$	$r_i$	2.4 mm
$d_m$	0.9885 mm	$r_o$	3.201 mm
$N_b$	11	$\theta_a$	201.6 °
$m$	4.4 g	$\gamma_o$	20 $\mu\text{m}$
$I_c$	$657.5 \cdot 10^{-9} \text{ Nm}$	$C$	200 $\text{Nsm}^{-1}$

## 참고문헌

- [1] Juang, Jia-Yang, Hiroyuki Kubotera, and David B. Bogy. "Effects of track-seeking motion on the flying attitudes of ultralow flying sliders." *Magnetics, IEEE Transactions on* 42.10 (2006): 2522-2524.
- [2] Tiwari, M., K. Gupta, and O. Prakash. "Dynamic response of an unbalanced rotor supported on ball bearings." *Journal of Sound and Vibration* 238.5 (2000): 757-779.
- [3] Tiwari, M., K. Gupta, and O. Prakash. "Effect of radial internal clearance of a ball bearing on the dynamics of a balanced horizontal rotor." *Journal of Sound and vibration* 238.5 (2000): 723-756.