

# 김발 시스템의 동특성을 고려한 조합형 베어링의 예압설계 Pre-load design of miniature precision duplex bearings for the dynamic characteristics of gimbals systems

\*#류성훈<sup>1</sup>, 진상훈<sup>2</sup>, 여보연<sup>3</sup>

\*#S. H. Ryu(sunghunryu@lignex1.com)<sup>1</sup>, S. H. Jin<sup>2</sup>, B. Y. Yeo<sup>3</sup>  
<sup>1 2 3</sup> LIG넥스원

Key words : Displacement Pre-load Method, Duplex bearing, Bearing stiffness, Resonance Frequency

## 1. 서론

본 연구는 유도무기에 장착된 탐색기 내부의 2 축 김발 시스템에 있어서, 김발의 동특성을 고려한 정밀소형 베어링의 예압 설계에 관한 내용이다. 탐색기는 유도무기의 핵심부품으로, 피치/요축의 2 축 김발구조, 광학렌즈, 모터, 자이로, 위치검출기, 적외선 검출기 등으로 구성되며, 움직이는 표적 혹은 고정 표적을 탐지, 추적하는 역할을 수행한다. 표적의 탐지 및 추적을 위해서는 2 축 김발의 정밀한 제어가 필요한데, 김발에 사용되는 소형정밀베어링(Miniature Precision Bearing)은 김발이 최소마찰로 구동되도록 김발을 지지하고 김발 시스템의 고유 주파수를 결정짓는 중요한 요소 중 하나이다.

본 김발 시스템에 사용된 베어링은 축 방향 하중과 반경방향 하중을 동시에 지지할 수 있는 각 접촉 볼 베어링(Angular contact ball bearing)을 고려하였다. 일반적으로 베어링이 정밀하게 제작된다 하더라도 내/외륜과 볼 사이에 유격이 존재하며, 이러한 유격은 김발 시스템이 정밀한 위치제어를 하는데 방해가 된다. 축을 정밀하게 제어하고 베어링의 강성을 높이며 베어링 내부 볼간의 하중을 골고루 분포시키고, 외란에 의해 가진 될 때 회진 중 skidding과 noise를 감소시키기 위해 베어링 조립 시 예압(pre-load)를 주게 되는데, 베어링에 예압을 주는 방법에는 정위치 예압법(Displacement preload method)과 정압 예압법(Force preload method)이 있다. 정위치 예압법은 베어링의 상대적인 위치가 변하지 않도록 스페이서(spacer)나 shim)등으로 예압을 주는 방법이며 정압 예압법은 베어링의 상대위치는 변하더라도 일정한 하중이 작용하도록 예압 스프링을 사용하는 방법이다<sup>[1]</sup>. 본 연구에서는 예압량의 변화가 김발 시스템에 미치는 영향을 보기 위해 예압 구조의 단순함과 예압량 조정이 비교적 편리한 정위치 예압법을 선택하였으며, 정위치 예압량의 변화에 따른 김발 시스템의 동특성을 분석하고 적절한 예압량을 설계하는 과정을 제시하는데 그 목적이 있다. 각 접촉 볼 베어링의 모델링을 위해서는 Tedric A. Harris와 Michael N. Kotzalas가 제안한 방법<sup>[2-3]</sup>을 사용하였으며, 모델링을 통해 도출된 베어링의 강성을 김발 시스템의 강성으로 입력하여 유한 요소법을 사용해 시스템의 고유 진동수를 계산하고 분석하였다.

## 2. 본문

### 2.1 조합형 볼 베어링

정위치 예압의 또 다른 방법은 조합형 베어링(Duplex Bearing)을 사용하는 것이다. 조합형 베어링은 동일한 형태의 베어링을 쌍(a pair)으로 사용하는 것으로, 협소한 공간(작은 반경방향)에 베어링에 가해지는 하중을 분배하기 위해 사용하며, 조립 방식에 따라 별도의 스페이서(spacer)나 shim)없이 설계된 예압이 가해지기에 조립성이 간편해지는 장점이 있는 반면, 베어링을 아주 정밀히 제작해야 하므로 단가가 비싸다는 단점이 있다. 조합의 종류로서 외륜

의 정면을 맞춘 정면 조합(DF형), 배면을 맞춘 배면 조합(DB형), 그리고 똑같은 방향이 되도록 조합한 병렬 조합(DT형)이 있으며, DF형 및 DB형 조합의 베어링은 반경방향 하중과 양방향의 축 방향 하중을 부하할 수 있고, DT형은 어느 한 방향의 축 방향 하중이 클 경우에 사용된다<sup>[4]</sup>. 아래 그림은 DB 타입 조합형 베어링의 한 예시이다

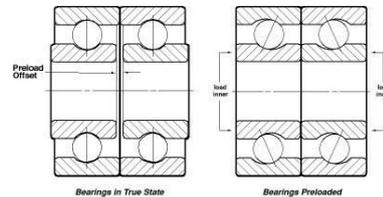


Fig. 1 Duplex Ball bearing of Back-to-Back type

### 2.2 각 접촉 볼 베어링 모델링

그림 2 는 일반적인 각 접촉 볼 베어링에 정위치 예압이 적용된 형태이다.

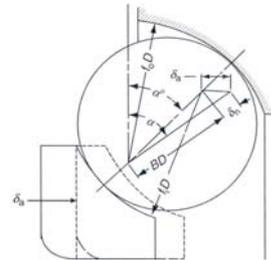


Fig. 2 Angular contact ball bearing with displacement preload

축 방향으로 가상의 힘  $F_a$ 가 작용하면 베어링의 내륜은  $\delta_a$ 의 변위가 발생하며, 그림 2 로부터 아래의 관계가 성립한다.

$$\delta_n = BD \left( \frac{\cos \alpha^\circ - 1}{\cos \alpha} \right)^{1.5} \quad (1)$$

축 방향 하중  $F_a$ 에 의해 ball에 법선방향으로 작용하는 하중을  $Q_n$ 이라고 할 때, Tedric A. Harris와 Michael N. Kotzalas는 스틸(steel)재질의 볼 베어링에 한해 아래와 같은 식을 제안했다<sup>[2]</sup>.

$$Q_n = K_n \delta_n^{1.5} \quad (3)$$

$$Q_n = \frac{F_a}{Z \sin \alpha} \quad (4)$$

(1)~(3)식을 정리하여 아래 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{F_a}{Z D^2 K} = \sin \left( \frac{\cos \alpha^\circ - 1}{\cos \alpha} \right)^{1.5} \quad (5)$$

여기서  $D$  는 ball 의 지름이며  $K$  는 베어링 제조사에서 제공하는 베어링 특성 값이다.

그림 2로부터 아래 관계를 도출 할 수 있는데,

$$\delta_a = (BD + \delta_n) \sin \alpha - BD \sin \alpha^\circ \quad (6)$$

식 (6)을 (1)에 넣고 정리하면 아래 식(7)을 얻는다.

$$\delta_a = \frac{BD \sin(\alpha - \alpha^\circ)}{\cos \alpha} \quad (7)$$

식(5)와 (7)로부터, 임의의 정위치 예압이 결정되면 볼베어링의 접촉각  $\alpha$  가 결정되고, 예압에 필요한 축방향 하중이 계산된다. 이 하중은 또 다른 시스템 제어 변수로써, 베어링의 마찰력 증가로 인한 제어부하로 작용하여 요구 성능을 만족시킬 수 있는 적정값 이하가 되도록 설계 되어야 한다. 계산된 접촉각  $\alpha$  를 아래 식에 이용하여 축방향 베어링 스프링 상수와 반경방향 베어링 스프링 상수를 구할 수 있다.

$$\delta_r = 4.36 \times 10^{-4} \frac{Q^{2/3}}{D^{1/3} \cos \alpha} \quad (8)$$

$$\delta_r = 4.36 \times 10^{-4} \frac{Q^{2/3}}{D^{1/3} \sin \alpha} \quad (9)$$

(8), (9)는 저속으로 회전하는 각 접촉 볼베어링에 있어서, 하중과 변위 사이 관계를 나타내는 식으로 Palmgren에 의해 제안되었다<sup>[3]</sup>.

### 2.3 유한 요소법을 이용한 동특성 해석

2.2 절에서 임의의 정위치 예압에 대해 접촉각을 구하고 이로부터 예압이 적용된 볼 베어링의 스프링 상수를 구하는 방법을 설명하였다. 이렇게 도출된 베어링 스프링 상수를 유한 요소 모델에 적용하여 김발 시스템의 공진주파수를 해석해 보았다.

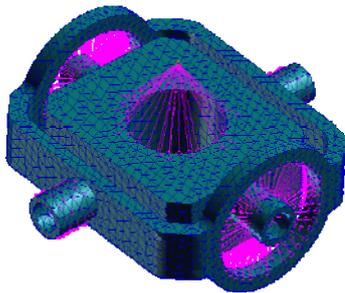


Fig. 3 FEM modeling of the gimbals system

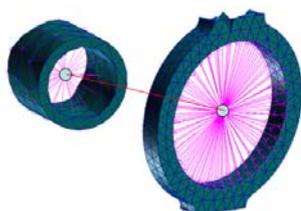
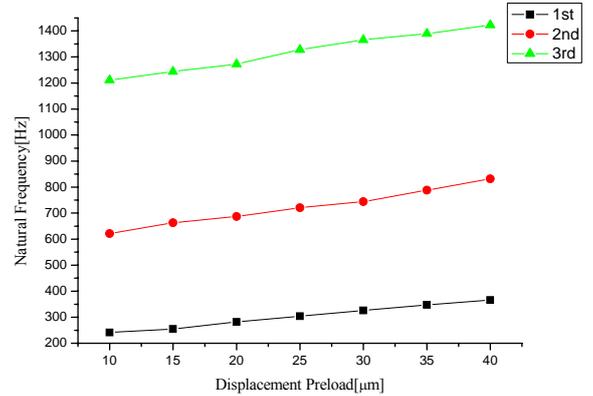


Fig. 4 FEM modeling of the bearing

유한요소해석에 사용된 상용코드는 MSC.NASTRAN 이며 베어링의 모델링을 위해서, 각 축 센터에 노드를 생성하고 축주위 노드들을 rigid bar 로 묶은 다음 각 중심노드들을 Nastran 에서 제공하는 bush 유한요소를 사용하여 연결하였다. Bush 유한요소의 물성치 정의에서 축 방향 및 반경 방향 베어링 스프링 상수를 입력하면 된다.

임의의 정위치 예압에 대해 유한요소법을 사용해 해석한 김발 시스템의 고유주파수는 아래와 같다



### 4. 결론

본 연구에서는 축방향으로 정위치 예압이 가해질 경우 각 접촉 볼베어링의 스프링 상수 변화에 따른 김발 시스템의 고유주파수 변화 여부를 유한 요소해석을 통해 도출해 보았다. 설계 단계에서 베어링의 예압을 잘못 설계할 경우, 김발 시스템에 조립될 민감한 핵심 부품들의 고유 주파수와 시스템의 고유주파수가 근접하게 되어 상당히 불안정한 설계를 할 우려가 있다. 본문에서 제시된 방법을 통해 사전에 시스템의 고유주파수를 검증하고 적정한 정위치 예압을 도출하여 설계단계에서 그 결과를 예측하므로써, 김발 시스템의 안정화를 구현할 수 있다.

### 참고문헌

1. 강중욱, 홍성욱, "각 접촉 볼 베어링의 정위치 예압 변화에 따른 회전체 계 동특성 변화 연구," 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, pp. 389-392, 2001.
2. Tedric A. Harris and Michael N. Kotzalas, "Essential Concepts of Bearing Technology," CRC, Taylor & Francis, 2007.
3. Palmgren, A., "Ball and Roller Bearing Engineering, 3rd," Burbank, Philadelphia, 49-51, 1959.
4. KAYDON Bearing Catalog300, "Real-slim, Ball and Roller Bearings", 2007.
5. 신용진, 조경래, 이진걸, 조설, 최석, "김벌 베어링 마찰의 영향을 고려한 4 축 안정화 플랫폼의 운동에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제 12 권, 제 6 호, pp.52-63, 1995.