

# LM 베어링의 강성예측 모델 및 실험적 특성

## Stiffness Prediction and Experimental Characteristics of Liner Motion Bearings

\*#김경호<sup>1</sup>, 박천홍<sup>1</sup>

\*#G. Khim(gyungho@kimm.re.kr)<sup>1</sup>, C. H. Park<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 한국기계연구원 초정밀기계시스템연구실

Key words : LM bearing, Stiffness prediction, Ball, Hertz contact

### 1. 서론

LM(Linear Motion) 베어링은 가이드 레일을 감싸는 블록 내에 여러 개의 볼이나 롤러가 순환하여 구동하는 방식으로 구성되어 있으며, 공작기계나 정밀스테이지 등에 주로 사용되고 있다[1]. 베어링의 특성을 결정짓는 가장 중요한 요소 중 하나는 강성으로, LM 베어링의 경우 내부 전동체의 종류(볼, 롤러)나 접촉각, 블록이나 레일의 곡률사이즈, 예압 등에 의해 결정된다. 외부하중이나 레일의 형상오차에 기인한 베어링 내 전동체의 변형은 Hertz의 탄성변형식에 의해 구할 수 있다[1]. Shimizu는 이 식에 근거하여 LM 베어링의 부하용량을 이론적으로 계산하였으며, 이로부터 LM 스테이지의 운동정밀도 평균화 효과에 대해 기술하였다[2-3]. LM 베어링의 강성은 Shimizu의 논문에서 제안한 부하용량 계산식을 이용하여 계산할 수 있으나, 비선형식에 의해 뉴턴랩슨법 등의 수치해석적 접근이 필요하다. 본 논문에서는 Hertz식과 Shimizu의 부하용량 방정식을 기본으로 하되, 레일형상오차 0 주기 성분의 진폭에 대한 베어링 반력의 개념을 도입하여 수치해석적인 접근 없이도 쉽게 강성을 구할 수 있는 방법 및 실험결과에 대해 간단히 소개한다.

### 2. LM 베어링의 강성해석

그림 1은 전동체가 볼(THK SHS30R)인 LM 베어링의 구조를 보여준다. 베어링 강성을 구하기 위한 레일형상오차는 0 주기 성분만을 고려하였으며, 레일에서 실제로 볼이 굴러가는

4개의 면은 형상오차가 각각 존재하나 서로 대칭인 형상오차에 의해 발생하는 베어링 반력은 상쇄되므로, 평균오차만을 고려하였다.

베어링 블록의 자세오차가 전혀 없다고 가정하면, 레일형상오차의 0 주기 성분에 의해 볼의 탄성변형이 발생하며 이에 대응하여 반력이 생성된다. 즉, 레일의 형상오차 0 주기 성분 진폭을 증가시켜가며 계산한 베어링의 반력을 이용하여 강성을 계산할 수 있다. 수직방향 강성의 경우, 레일의 수직방향 오차에 대한 수직방향 반력의 비로써 계산한다.

LM 볼베어링의 경우, 각각의 볼에 대한 반력은 식 (1)과 같이 계산하며, 수직방향의 전체 반력은 식 (2)로 표현된다.

$$F_{e,ijk} = C_b \sqrt{D_a} (\xi_{ijk})^{3/2} \quad (1)$$

$$f_e = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 F_{e,ijk} \times \sin \beta'_{ijk} \quad (2)$$

$$\beta'_{ijk} = \tan^{-1}(V_{y,ij} / V_{z,ik})$$

따라서 수직방향의 베어링 강성은 식 (3)으로 계산할 수 있다.

$$K = \Delta f_e / \Delta e_z \quad (3)$$

$\xi_{ijk}$ 는 볼의 탄성변형량,  $D_a$ 는 볼직경,  $\beta_{ijk}$ 는 접촉각,  $C_b$ 는 볼직경 및 레일/블록 곡률에 의해 결정되는 상수이며,  $p$ 는 한 열당 볼의 수를 의미한다. 한편 볼의 탄성변형량  $\xi_{ijk}$ 는 식 (4)로 계산된다.

$$\xi_{ijk} = \sqrt{V_{y,ij}^2 + V_{z,ik}^2} - l_r + \chi_p \quad (4)$$

$$l_r = 2R - D_a$$

$$V_{y,ij} = l_r \cos \beta_0 + (-1)^j e_{y,i}$$

$$V_{z,ik} = l_r \sin \beta_0 + (-1)^k e_{z,i}$$

그림 1 에서  $A_r$  은 레일 홈의 이상적인 곡률중심,  $A_r'$ 은 레일형상오차에 의해 이동된 실제 곡률중심,  $A_b$  는 블록 홈의 곡률중심점을 의미하며 레일 및 블록의 곡률은 같다고 가정한다.  $\beta_0$  및  $\beta'$ 은 초기접촉각 및 변형후 접촉각이고,  $e_y, e_z$  는 수평, 수직방향으로의 레일의 형상오차,  $F_{e,ijk}$  는 각각의 볼이 받는 반력을 의미한다.

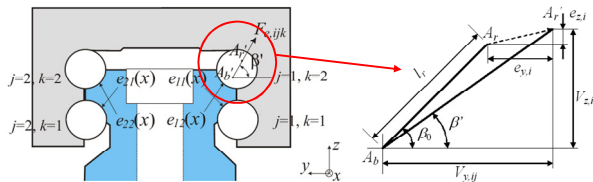


Fig. 1 Analysis model for LM ball bearing

그림 2 는 LM 베어링의 강성을 측정하기 위한 실험장치를 보여준다. 로드셀과 스크류를 이용하여 베어링에 힘을 가하고, 변위센서로 변형량을 측정한다. 이때 레일과 베어링 블록과의 상대적인 변위만을 측정하여 보다 정확하게 강성이 평가될 수 있도록 하였다.



Fig. 2 Experimental setup for measurement of stiffness

그림 3 은 THK SHS30R(보통예압)에 대해 수평방향 강성을 측정한 결과이다. 스크류를

이용하여 힘을 가한 후 제거하는 형태로 3 번을 반복 실험하였으며, 이때 얻어진 기울기로 강성을 평가하였다. 사용된 베어링은 보통예압으로, 카달로그상 -9 에서 0  $\mu\text{m}$  의 예압분포를 보이고 있으나, 정확히 얼마의 예압이 적용되었는지에 대한 확인 및 측정은 불가능하였다. 예압 -2  $\mu\text{m}$  에서의 계산값은 270  $\text{N}/\mu\text{m}$  으로, 실험치인 279  $\text{N}/\mu\text{m}$  와 근사한 값을 얻을 수 있었다. 그러나 LM 베어링의 강성예측 모델은 볼 사이즈나 곡률반경, 특히 예압에 따라 크게 달라지는 것을 확인할 수 있었으며, 따라서 예측하고자 하는 모델에 대한 정확한 정보입력이 필요할 것으로 판단된다.

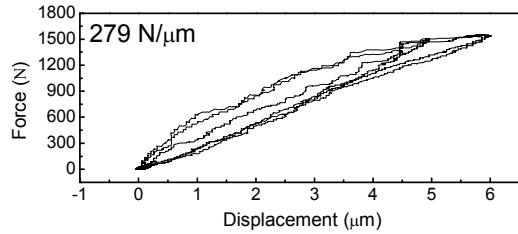


Fig. 3 Experiment result (SHS30R, normal preload)

#### 4. 결론

LM 베어링의 강성을 이론적으로 보다 쉽게 평가하기 위해, 레일의 형상오차 진폭을 증가시켜가며 계산된 베어링의 반력의 비로써 강성을 예측하였다. 실험을 통해 구해진 강성과 근사한 값을 강성예측모델을 통해 얻을 수 있었으나, 보다 정확한 평가를 위해서는 LM 베어링의 정확한 치수 정보가 필요할 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. THK linear motion system catalog, THK Co., Ltd., 2005.
2. Shimizu, S., "Load Distribution and Accuracy – Rigidity of Linear Motion Ball Guides System," J. of JSPE, Vol. 56, No. 8, p. 1445-1451, 1990. (Japanese)
3. Shimizu, S., "Stiffness Analysis of Linear Motion Rolling Guide," J. of JSPE, Vol. 57, No. 10, p.1814-1819, 1991. (Japanese)