

# LM 스테이지의 5 자유도 운동오차 예측 및 실험적 검증 Prediction and Experimental Verification of 5 DOF Motion Errors of LM Stage

\*#김경호<sup>1</sup>, 박천홍<sup>1</sup>, 오정석<sup>1</sup>, Pham Van Dinh<sup>2</sup>

\*#G. Khim(gyungho@kimm.re.kr)<sup>1</sup>, C. H. Park<sup>1</sup>, J. S. Oh<sup>1</sup>, P. V. Dinh<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 한국기계연구원 초정밀시스템연구실

<sup>2</sup> 과학기술연합대학원대학교 나노메카트로닉스학과

Key words : linear motion bearing, 5 dof motion errors, rail form error, stiffness, transfer function

## 1. 서론

정밀공작기계나 반도체장비, 측정장비 등에 요구되는 운동정밀도가 높아짐에 따라 기존에 전문가에 의존하던 수작업에서 벗어나 운동정밀도를 체계적으로 분석하고 향상시킬 필요가 있다.<sup>1</sup> 본 논문에서는 운동정밀도에 가장 크게 영향을 미치는 레일형상오차와 테이블 운동오차와의 상관관계를 파악하여, 설계단계에서 운동정밀도를 예측해 볼과 동시에 정밀도 향상을 위한 작업을 체계적으로 수행할 수 있도록 하고자 하였다. 기존에 수직이나 수평방향 운동오차에 국한되던 해석<sup>2</sup>을 동시에 5 자유도 해석이 가능하도록 확장하였고, 여기에 모터 코강력이나 볼스크류 미스얼라인먼트 등에 의한 외력이 운동오차에 미치는 영향을 살펴볼 수 있도록 하였다.

## 2. 5 DOF 운동오차 예측

LM 테이블의 5 자유도 운동오차는 베어링 반력에 대한 힘과 모멘트 평형방정식으로부터 구한다. 베어링 반력은 Hertz 변형식을 이용하여 계산하며, 임의의 사인과 공간주파수 성분을 갖는 레일형상오차에 대해 레일형상오차 크기에 대한 베어링 반력의 비를 전달함수라 정의하면, 임의의 레일형상에 대해서도 레일형상오차에 대한 푸리에 시리즈와 전달함수를 이용하여 베어링 반력을 쉽게 구할 수 있다.

LM 테이블 중심에서의 5 자유도 운동오차-즉,  $\delta_z, \delta_y, \theta_x, \theta_y, \theta_z$  를 각각 수직, 수평 진직도오

차, 롤, 피치, 요오차라 할때, LM 스테이지를 구성하는 각 베어링 위치에서의 수직변위( $z_{ij}$ ), 수평변위( $y_{ij}$ )는 식 (1)로 표현된다. 따라서 LM 테이블의 5 자유도 방향에 대한 힘과 모멘트의 평형방정식은 식 (2)와 같으며, 베어링 반력은 식 (3)과 같이 레일형상오차  $e(x)$ 에 대한 푸리에 시리즈와 사전에 구한 전달함수  $K(2k\pi/L)$ 로부터 구할 수 있다. 리니어모터 코강력이나 볼스크류 런아웃오차, 미스얼라인먼트오차 등이 존재하는 경우 식 (2)의 평형방정식에 이들에 의한 영향을 외력으로 추가 고려하여 계산한다.

$$z_{ij} = \delta_z + \theta_y X_{ci} - Y_{cj} \theta_x \quad (1)$$

$$y_{ij} = \delta_y - X_{ci} \theta_z - z_c \theta$$

$$\sum_j^n \sum_i^m (f_{z,ij} - K_z z_{ij}) = 0 \quad (2)$$

$$\sum_j^n \sum_i^m (f_{z,ij} X_{ci} - K_z z_{ij} X_{ci}) = 0$$

$$\sum_j^n \sum_i^m (f_{z,ij} Y_{cj} - K_z z_{ij} Y_{cj}) + z_c \sum_j^n \sum_i^m (f_{y,ij} - K_y y_{ij}) = 0$$

$$\sum_j^n \sum_i^m (f_{y,ij} - K_y y_{ij}) = 0$$

$$\sum_j^n \sum_i^m (f_{y,ij} X_{ci} - K_y y_{ij} X_{ci}) = 0$$

$$e(x) = \sum_{k=1}^{\infty} \left( a_k \cos \frac{2k\pi}{L} + b_k \sin \frac{2k\pi}{L} \right) \quad (3)$$

$$f_c(x) = \sum_{k=1}^{\infty} K \left( \frac{2k\pi}{L} \right) \left( a_k \cos \frac{2k\pi}{L} + b_k \sin \frac{2k\pi}{L} \right)$$

여기서  $f_{z,ij}$  와  $f_{y,ij}$  는 각각 수직, 수평방향으로  $i, j$  번째 베어링 반력을,  $K_z$  와  $K_y$  는 수직, 수평방향 강성을,  $m$  과  $n$  은  $x, y$  방향으로의 베어링 개수를 의미한다.  $X_{ci}$  와  $Y_{cj}$  는 각각 테이블 중심으로부터  $x, y$  방향으로 베어링까지의

거리를 의미한다.  $z_c$  는 수직방향으로의 베어링 중심에서 테이블 윗상면까지의 거리이다.

한편 LM 베어링 레일과 같이 형상오차를 측정하기 어려운 경우는 레일 자체의 형상오차 대신 레일에 대한 LM 블록의 상대적인 주행정도, 즉 진직도 오차를 입력하여 스테이지의 운동오차를 예측할 수 있도록 하였다.

### 3. 실험적 검증

Fig. 1 은 5 자유도 운동오차 실험을 위한 LM 베어링 스테이지와 제원을 보여준다. 레일 형상오차를 대신한 LM 베어링 블록의 수직, 수평 진직도 오차는 레이저 간섭계(HP5529)를 이용하여 측정하였으며, 두 레일 사이의 수직, 수평방향 평행도 오차는 정전용량형센서(ADE 6810)가 설치된 블록을 이송시키면서 다른 레일에 대해 상대적인 변위를 측정하였다.



베어링	THK, SHS30R
리니어모터	Trilogy, 310-4N
리니어스케일	Renishaw, RGH24, 0.1 $\mu$ m
드라이브	Copley, XSL230-36
스트로크	700 mm

Fig. 1 Experimental setup

Fig. 2 는 이렇게 측정된 블록의 진직도 오차와 두 레일 사이의 평행도 오차로부터 이론적으로 예측된 5 자유도 운동오차와 실제 측정된 운동오차와의 비교결과이다. 롤 오차를 제외한 테이블 운동오차는 레이저 간섭계를 이용하고, 롤 오차는 전자수준계(electronic level)를 이용하여 측정하였다. 5 자유도 운동오차 예측시 두 레일 사이의 평행도 오차를 고려하였기 때문에 롤 오차를 포함한 모든 운동오차가 잘 일치하고 있는 것을 확인할 수 있다.

LM 스테이지에서 간섭시스템의 옵틱 측정 위치가 테이블 중심에서 벗어나기 때문에 테이블의 수평진직도 오차 측정시 테이블의 롤오차에 의한 영향을 받는다. 즉, 롤오차에 의해 원치 않는 수평진직도 오차가 발생하며, 이를 보상하면 Fig. 3 에서 보는 바와 같이 수평진직도 오차는 이론치와 잘 일치함을 알 수 있다.

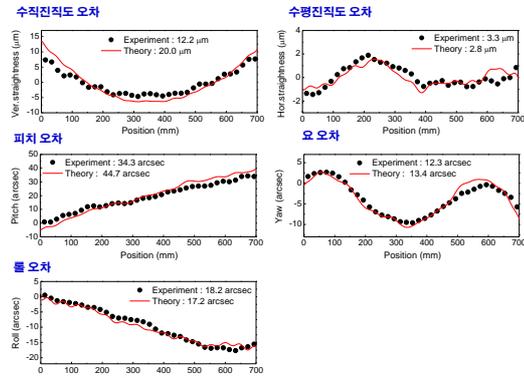


Fig. 2 Comparison between theoretical and experimental data

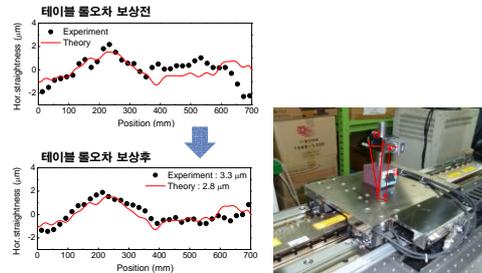


Fig. 3 Compensation of table roll error for horizontal straightness error

### 4. 결론

LM 베어링 스테이지에서 레일형상오차로부터 5 자유도 운동오차를 예측하고 실제 측정된 운동오차와 비교, 검증하였다. 제안된 운동정밀도 예측기술은 기 제작된 LM 스테이지의 운동정밀도 향상뿐만 아니라 정밀도 설계에도 큰 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

### 참고문헌

- Oh, J. S., Khim, G., Park, C. H., Chung, S. C., Lee, S. K., Kim, S. J., "Simulation of Motion Accuracy in the Precision Linear Motion System," J. KSPE, Vol. 19, No. 5, pp. , 2011
- Khim, G., Park, C. H., Lee, H., Kim, S. W., "Analysis of the Motion Errors in Linear Motion Guide," J. KSPE, Vol. 19, No. 5, pp.139~149, 2002