

슬라이드 가이드 스테이지의 다자유도 운동 오차 해석 Analysis of Multi-DOF Motion Errors in Slide Guide Stage

*김규하¹, #이선규¹

*G. H. Kim¹, #S. K. Lee(skyee@gist.ac.kr)²

¹광주과학기술원 기전공학부

Key words : Motion Error, Motion Accuracy, Transfer Function Method, Slide Guide, Turcite

1. 서론

일반적으로 이송 테이블의 운동 오차는 FEM 이나 Newton-Raphson 법을 이용하여 반복 계산을 통해 구한다^{1,2}. 이와 같은 해석 방법은 비교적 정확한 계산 결과를 얻을 수 있으나 해석에 많은 시간이 필요하다. 그러나 스테이지는 동일한 베어링으로 구성되므로 레일의 공간 주파수에 대한 베어링의 강성 특성과 베어링 사이의 기하학적 상관 관계를 이용하는 전달 함수법을 사용할 경우, 보다 효과적으로 운동 오차를 해석할 수 있다.

본 논문은 앞에서 설명한 전달 함수법을 이용하여 슬라이드 가이드 테이블의 5 자유도 운동 오차 모델 및 해석 알고리즘을 제안하고자 한다.

2. 전달 함수법

슬라이드 가이드는 복수개의 패드로 구성되어 있으며 동일한 형상을 갖는다. 만약 레일에 대한 하나의 패드의 강성 특성을 파악한다면 각 패드의 기하적 관계를 이용, 테이블 전체의 운동 오차를 계산할 수 있다.

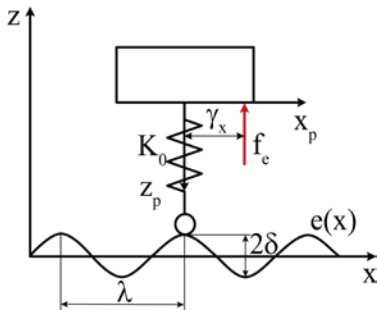


Fig. 1 Pad reaction force to sinusoidal profile of rail

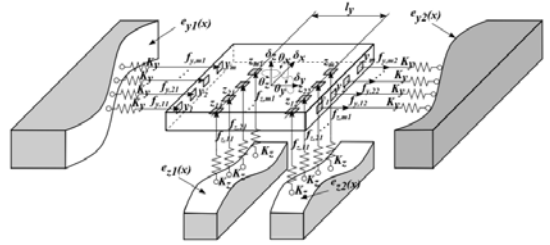


Fig. 2 Force-moment equilibrium model of a table for 5 DOF motion errors

Fig. 1 은 하나의 패드가 임의의 단일 주파수 ω 를 가진 레일 진폭도 $e(\omega)$ 상을 이동하는 경우를 나타낸 것이다. 특정 공간 주파수에서의 진폭도 $e(\omega)$ 와 유막 반력 $f_c(\omega)$, 모멘트 중심 편차 $\gamma_x(\omega)$ 의 사이의 관계식을 전달 함수라 하며 Eq. (1)과 같이 나타낸다.

$$K(\omega) = \frac{f_c(\omega)}{e(\omega)}, \quad G(\omega) = \frac{\gamma_x(\omega)}{e(\omega)} \quad (1)$$

Fig. 2 는 수직(z), 수평(y) 방향으로 복수개의 패드를 가진 슬라이드 가이드의 힘-모멘트 평형 모델을 나타낸 것이다. 이 모델과 위에서 구한 전달 함수를 이용하여 운동 오차에 대한 연립 방정식을 행렬식으로 나타내면 Eq. (2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \mu \frac{|v|}{v} A_1 & -\mu \frac{|v|}{v} A_2 & -\mu \frac{|v|}{v} (A_3 + A_6) & 0 & 0 & 1 \\ A_3 & 0 & -A_7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_4 & A_8 & 0 & 0 & 0 \\ -A_7 & A_9 & A_5 & 0 & 0 & 0 \\ -\mu \frac{|v|}{v} A_5 & \mu \frac{|v|}{v} A_{10} & \mu \frac{|v|}{v} A_{11} & A_{12} & 0 & z_{T_thrust} \\ -\mu \frac{|v|}{v} A_{13} & \mu \frac{|v|}{v} A_8 & \mu \frac{|v|}{v} A_{14} & 0 & -A_{15} & -y_{T_thrust} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_y \\ \delta_z \\ \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \\ F_{thrust} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \\ B_6 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \sum_{i=1}^m [K_{0i} n_i \sin \theta_{iPT}] & A_9 &= \sum_{i=1}^m [K_{0i} n_i (l_{yi}^2 \cos^2 \theta_{iPT} + l_{zi}^2 \sin^2 \theta_{iPT})] \\
 A_2 &= \sum_{i=1}^m [K_{0i} n_i \cos \theta_{iPT}] & A_{10} &= \sum_{i=1}^m [K_{0i} n_i l_{zi} \cos \theta_{iPT}] \\
 A_3 &= \sum_{i=1}^m [K_{0i} n_i \sin^2 \theta_{iPT}] & A_{11} &= \sum_{i=1}^m [K_{0i} n_i l_{zi} (l_{yi} \cos \theta_{iPT} + l_{zi} \sin \theta_{iPT})] \\
 A_4 &= \sum_{i=1}^m [K_{0i} n_i \cos^2 \theta_{iPT}] & A_{12} &= \frac{1}{12} \sum_{i=1}^m [K_{0i} n_i (n_i + 1)(n_i - 1)^2 \cos^2 \theta_{iPT}] \\
 A_5 &= \sum_{i=1}^m [K_{0i} n_i l_{zi} \sin \theta_{iPT}] & A_{13} &= \sum_{i=1}^m [K_{0i} n_i l_{zi} \sin \theta_{iPT}] \\
 A_6 &= \sum_{i=1}^m [K_{0i} n_i l_{yi} \cos \theta_{iPT}] & A_{14} &= \sum_{i=1}^m [K_{0i} n_i l_{yi} (l_{yi} \cos \theta_{iPT} + l_{zi} \sin \theta_{iPT})] \\
 A_7 &= \sum_{i=1}^m [K_{0i} n_i l_{zi} \sin^2 \theta_{iPT}] & A_{15} &= \frac{1}{12} \sum_{i=1}^m [K_{0i} n_i (n_i + 1)(n_i - 1)^2 \sin^2 \theta_{iPT}] \\
 A_8 &= \sum_{i=1}^m [K_{0i} n_i l_{yi} \cos^2 \theta_{iPT}] \\
 B_1 &= \mu \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [f_{e(i,j)}] - F_{cx}, B_2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [f_{e(i,j)} \sin \theta_{iPT}] + F_{cy} \\
 B_3 &= -\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [f_{e(i,j)} \cos \theta_{iPT}] + F_{cz} + F_{table} + F_{work} \\
 B_4 &= -\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [f_{e(i,j)} (l_{yi} \cos \theta_{iPT} + l_{zi} \sin \theta_{iPT})] + M_{cx} + M_{table_x} + M_{work_x} \\
 B_5 &= -\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[f_{e(i,j)} \left\{ l_{yi} \mu \frac{|V|}{V} - l_{zi} \left(j - \frac{n_i + 1}{2} \right) \cos \theta_{iPT} + \gamma_{s(i,j)} \cos \theta_{iPT} \right\} \right] \\
 &\quad + M_{cy} + M_{table_y} + M_{work_y} \\
 B_6 &= -\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[f_{e(i,j)} \left\{ l_{yi} \mu \frac{|V|}{V} + l_{zi} \left(j - \frac{n_i + 1}{2} \right) \sin \theta_{iPT} + \gamma_{s(i,j)} \sin \theta_{iPT} \right\} \right] \\
 &\quad - M_{cz}
 \end{aligned}$$

3. 전달 함수법 검증

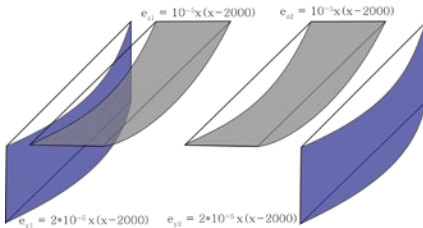


Fig. 3 Rail profiles to verify the transfer function method

유도한 해석 모델을 검증하기 위해서 Fig. 3 과 같이 길이 2000mm, 포물선 형태의 레일 형상에 대해 5 자유도 운동 오차 해석을 수행하였다. 레일 형상을 포물선으로 선정하 이유는 대부분의 스테이지 레일이 포물선 형태의 처짐량을 가지며 포물선의 기울기는 거리에 대해 선형인 관계로 해석시 회전 운동 오차가 거리 따라 선형적으로 계산되는지 확인하기 위해서 선정하였다.

Fig. 4 는 위에서 설명한 스테이지에 대한 해석 결과를 나타낸 것이다. 수직·수평 운동 오차는 레일 처짐량과 같은 포물선을 가진다. 회전 운동 오차의 경우, 롤 오차는 수직면의

두 레일이 동일하므로 전 영역에 대해 0 이 된다. 피치 오차는 수직 방향 레일의 포물선의 기울기와 동일하게 $-0.02\mu\text{rad/mm}$ 의 기울기를 가진 직선 형태이며, 요 오차도 마찬가지로 수평 방향 레일의 포물선 기울기와 동일한 $0.04\mu\text{rad/mm}$ 의 기울기를 가진 직선 형태로 나타난다.

4. 결론

본 논문에서 제안한 운동 오차 해석 모델이 레일의 영향을 반영하여 슬라이드 가이드의 5 자유도 운동 오차를 해석할 수 있음을 알 수 있으며 향후 실험 결과와 비교할 예정이다.

후기

이 논문은 기계장비 정밀도 시뮬레이션 플랫폼 기술 개발 과제 지원을 받아 수행한 연구임.

참고문헌

1. Park, C. H., Oh, Y. J., Lee, C. H. and Hong, J. H., "Theoretical Verification on the Motion Error Analysis Method of Hydrostatic Bearing Tables Using a Transfer Function," Int. J. of KSPE, **4**, 64-70, 2003.
2. Kim, K. H., Park, C., H., Lee, H., and Kim, S., W., "Analysis of the Motion Errors in Linear Motion Guide," J. of KSPE, **19**, 139-148, 2002.

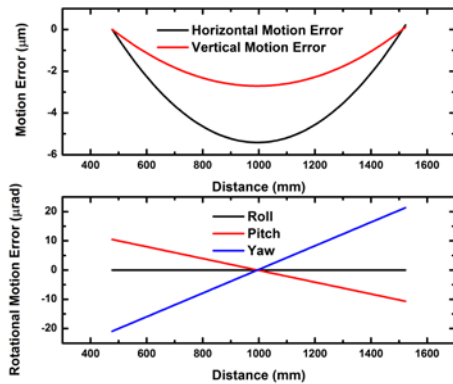


Fig. 4 Solved 5 DOF motion errors