

공작기계 직선 베어링 안내면의 정도 설계에 관한 연구

김경호*(KAIST 기계공학과), 박천홍(KIMM 자동화연구부), 송창규(KIMM 자동화연구부),
이후상(KIMM 자동화연구부), 김승우(KAIST 기계공학과)

The Accuracy Design of LM Guide System in Machine Tools

K. H. Kim(KAIST), C. H. Park(KIMM), C. K. Song(KIMM), H. S. Lee(KIMM), S. W. Kim(KAIST)

ABSTRACT

This paper is concerned with Accuracy Design of LM Guide System in Machine Tools. Elastic deformation of bearing is calculated by Hertz contact theory and motion error of LM block is analyzed. A new algorithm using block stiffness is proposed for the analysis of motion accuracy of the table. The best advantage of this algorithm is fast analysis speed because it isn't necessary iteration processes for satisfying equilibrium equation of the table. Motion errors of the table analyzed under artificial form error of rail theoretically and experimentally. Only one of two rails is bent by putting a thickness gauge into horizontal direction. This form error of rail is measured by gap sensor against the other rail. Then, motion errors of the table are predicted by proposed new algorithm theoretically and measured by laser interferometer. Measurements are carried out by changing the preload and thickness. The results show that the table motion errors are reduced from 1/2 to 1/60 times than form error of rail according to its height and width. And the effect of preloading is almost negligible.

Key Words : linear motion bearing guide(직선 베어링 안내면), machine tools (공작기계), accuracy design(정도설계), stiffness analysis(강성해석)

1. 서론

공작기계의 고속·고정도화 기술은 공작기계의 성능과 품질을 결정하는 중요한 요소이다. 공작기계의 고속·고정도화를 위해서는 주축과 더불어 가공물을 이송시키는 이송계의 역할 또한 매우 중요하다. 이러한 이송계의 고속·고정도화를 위해서는 테이블 안내요소, 이송 구동요소, 제어요소 등 해결해야 할 많은 과제들이 있다. 안내요소의 경량화, 저마찰 기술, 이송 구동요소의 냉각기술, CNC 제어장치의 고속응답기술, 다축 제어 기술 등이 그것이다.

지금까지 공작기계 안내면으로는 미끄럼 안내방식이 주로 사용되었으며, 현재에도 가장 많이 사용되는 방식이기도 하다. 그러나 미끄럼 안내방식은 레일면과 테이블의 직접 마찰에 의해 구동되는 방식이므로 마찰에 따른 발열과 고속화를 얻지 못하는다는 문제점이 있어 왔다. 그러나 1970 년대에 새로이 등장한 직선 베어링 안내면(Linear Motion Bearing Guide, 이하 LM 가이드)은 레일면과 블록 사이에 볼이나 롤러와 같은 전동체를 넣어 구름 운동을 시킴으로써 마찰저항이 미끄럼 운동에 비하여

1/20 ~ 1/40 이상 줄어들었으며, 스틱 슬립 현상이 발생하지 않고 서브 마이크론 대의 고정도가 얻어질 수 있었다. LM 가이드의 등장으로 이송계의 고속·고정도화가 크게 진전된 것은 사실이나 해결해야 할 과제도 많이 남아 있다. 실용화 된지 겨우 20 년 남짓한 기계요소로서 아직 ISO 표준화가 되어있지 않고, 강성과 감쇠 성능이 떨어져 chatter 진동이 발생할 가능성도 높은 편이기 때문이다.

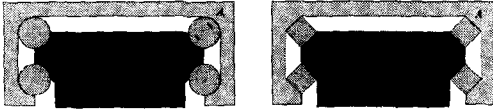
본 연구는 이러한 LM 가이드를 이송계로 사용함에 있어서 가공조건에 적합한 LM 블록의 선정 문제 등을 포함한 고속·고정도화를 위한 가이드 설계 기준을 확립하고자 하는 것이다. 이를 위해서 우선적으로 볼과 롤러를 사용한 LM 블록의 특성을 파악하고, 안내면의 설치 오차라든지 예압이 테이블의 운동오차에 미치는 영향을 살펴보았다.

2. 테이블 운동오차 예측

2.1 블록의 강성 해석

블록에 사용되는 전동체로 볼과 롤러 베어링이 있다. 이런 베어링이 사용될 때 블록의 강성은 같은 과정을 거쳐 구할 수 있으나 가장 큰 차이점은

볼 베어링은 볼의 변형 후 초기 접촉각이 변하게 되고, 롤러 베어링은 초기 접촉각이 변하지 않는 데 있다. 또한 볼 베어링의 탄성 변형량은 Hertz 접촉식에 의해, 롤러 베어링의 변형량은 Palmren 의 식이 사용된다. Fig. 1은 볼과 롤러가 사용된 블록의 정면도를 보여준다.



(a) Ball (b) Roller

Fig. 1 Ball / Roller Bearing

전동체가 붙인 경우에 대해서만 생각해 보면, Fig.2 처럼 블록(THK HSR 35 모델)을 간단히 모델링 할 수 있다. 여기서 Hertz 접촉론에 의한 볼의 변형은 볼과 레일면과의 상호 접근량을 의미하므로, 이 모델링에서는 볼만 변형하고 다른 요소는 강체로써 취급한다는 가정을 하였다.

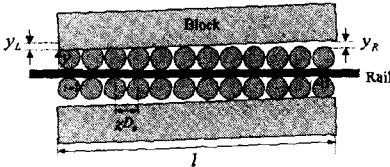


Fig. 2 LM Block Modeling (in x-y plane)

볼의 변형량을 구하기 위해서 볼 내에 위치하는 특정한 두 점 사이의 거리의 변화량을 살펴보았다. 즉, 하나의 볼에 대해서 블록의 곡률 중심점과 레일의 곡률 중심점 사이의 거리가 외부하중 작용 후에 어떻게 달라지는가의 차이를 구하였다. Fig. 2에서 각 볼의 위치에서의 블록의 y 방향의 변위량은 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta y_i(x) = y_L(x) + \frac{y_R(x) - y_L(x)}{l} \cdot X_{ci} + \phi_x \cdot z_g$$

여기서 y_L 는 블록의 좌측방향 변위량, y_R 은 우측방향 변위량, ϕ_x 는 블록의 rolling 오차이며, X_{ci} 는 좌표 원점에서부터 각 볼까지의 거리를 나타낸다. Z 방향의 변위량도 같은 방식으로 생각하면, 결국 볼의 탄성 변형량은 미지수 $y_L, y_R, z_L, z_R, \phi_x$ 의 함수로 나타내어진다. 이제 이런 변형량에 해당하는 Hertz Force 를 계산하고, 이 힘들에 의한 평형 방정식을 Newton Method 를 이용하여 풀면 미지수 값들을 구할 수 있게 된다. 따라서 블록의 5 가지 운동오차 성분은 이런 미지수들의 간단한 연산으로써 나타낼 수 있다. 예를 들면 y 방향 진직도 오차

는 $(y_L + y_R)/2$ 과 같다.

한편, 외부하중을 변수로 하여 이런 운동 오차의 변화량을 구하면 블록의 강성을 이론적으로 구할 수 있다. Fig. 3은 볼과 롤러를 사용한 블록의 강성을 예압량에 따라 비교한 그림으로 롤러 블록이 2-3 배 정도로 강성이 큰 것으로 나타났다.

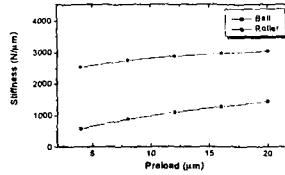


Fig. 3 Stiffness Comparison of Ball / Roller Block

Fig. 4는 볼과 롤러 블록의 오차 흡수 정도를 나타낸 그림이다. 레일의 오차를 사인파로 가정했을 때 공간주파수의 상대값에 따른 오차 흡수 정도를 비교하였다. 고주파로 갈수록 볼을 사용한 블록이 오차 흡수 정도가 좋아지는 것을 알 수 있다.

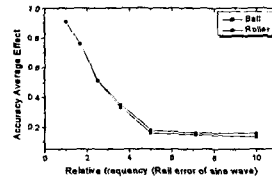


Fig. 4 Accuracy average effect of Ball / Roller Block

2.2 테이블의 운동오차 예측

일반적으로 블록 4 개로 이루어진 LM 가이드에서 블록의 5 방향 강성을 이용하여 테이블의 평형 방정식을 세우고, 이 식을 풀면 블록과 마찬가지로 테이블의 운동오차도 구할 수 있게 된다. 테이블의 5 방향 운동 오차에 대한 식은 다음과 같다.

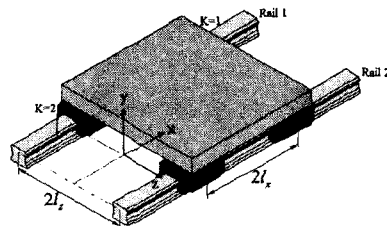


Fig. 5 L M Table

수직 진직도 오차 :

$$\delta_y = \frac{1}{4} [B_{11}(X, y) + B_{12}(X, y) + B_{21}(X, y) + B_{22}(X, y)] - \frac{1}{4} \frac{F_y}{k_{ver}}$$

피치 오차 :

$$\phi_z = \frac{k_{ver} \cdot l_x}{\dots} [B_{11}(X, y) - B_{12}(X, y) + B_{21}(X, y) - B_{22}(X, y)]$$

수평 진직도 오차 :

$$\delta_z = \frac{1}{4} [B_{11}(X, z) + B_{12}(X, z) + B_{21}(X, z) + B_{22}(X, z)] - \frac{1}{4} \frac{F_z}{k_{hor}}$$

요 오차 :

$$\phi_y = \frac{k_{hor} \cdot l_x}{8k_{yaw} - 2k_{hor} \cdot l_x^2} [-B_{11}(X, z) + B_{12}(X, z) - B_{21}(X, z) + B_{22}(X, z)]$$

롤 오차 :

$$\phi_x = \frac{k_{hor} \cdot l_x}{8k_{roll} - 2k_{hor} \cdot l_x^2} [-B_{11}(X, y) - B_{12}(X, y) + B_{21}(X, y) + B_{22}(X, y)]$$

여기서 k_{ver} 는 수직 강성, k_{pitch} 는 피치 강성, k_{hor} 는 수평 강성, k_{yaw} 는 요 강성, k_{roll} 은 롤 강성을 의미한다. 또한 $2l_x$ 는 x 방향에서의 블록간 거리를, $2l_z$ 는 레일 간 거리를, B_{ij} 는 j 번째 블록이 i 번째 레일 위를 지나갈 때의 궤적을 나타낸다. 이는 2.1 절에서 블록의 강성 해석을 통해 구할 수 있다.

3. 실험 방법 및 결과

3.1 레일 설치오차 실험

레일의 설치오차가 테이블의 운동정도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 두 레일 중 하나에만 인위적으로 설치오차를 주어 실험을 수행하였다. 설치오차를 주는 방법으로는 두께 40um의 Thickness gauge를 레일 고정부에 삽입하여 Gaussian 형태의 레일이 만들어지도록 하였다. 이런 레일 오차의 측정방법으로는 기준 레일에 대해서 gap sensor를 이용하여 흰 레일의 상대거리를 측정하도록 하였다. 측정된 결과는 Fig. 7과 같다.

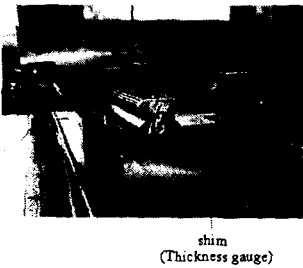


Fig. 6 Artificial rail form error using thickness gauge

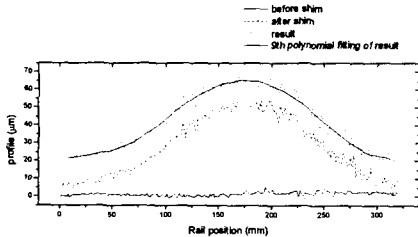


Fig. 7 Measurement of rail error profile

3.2 테이블의 운동오차 측정

테이블의 운동오차를 측정하기 위하여 laser

interferometer(HP. 5529A)를 이용하였다. 레일에 z 방향에만 인위적으로 설치오차를 주었으므로 테이블의 운동오차도 수평방향 진직도와 요 오차를 측정하였다. Fig. 8(a)와 Fig. 8(b)는 예압이 14um이고, thickness gauge의 두께가 40um일 때의 테이블의 수평 진직도와 요 오차를 측정한 결과이다.

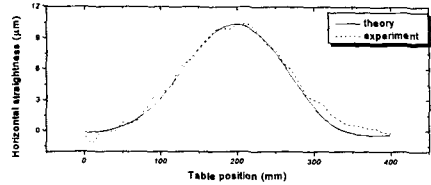


Fig. 8(a) Horizontal straightness error

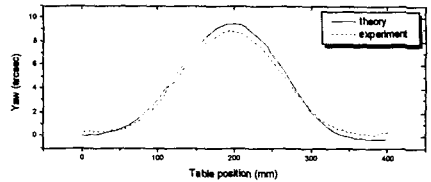


Fig. 8(b) Yaw angle error

Fig. 8에서 실선은 측정된 레일 프로파일을 바탕으로 2.2 절에서 제안한 테이블 운동오차 예측법을 이용하여 이론적으로 구한 결과이며, 점선은 laser interferometer를 이용하여 실험적으로 구한 결과이다. 이론치와 실험치는 잘 일치하며 수평 진직도는 레일 설치 오차량의 약 1/4 정도로 나타남을 알 수 있다.

Fig. 9는 예압에 따른 테이블의 운동오차를 살펴본 것으로 결과를 보면, 거의 차이를 보이지 않고 있다. 이것은 40um에 달하는 설치오차를 인위적으로 주었기 때문에 볼에 예압이 적게 들어가 있더라도 이미 어느 정도 이상의 예압을 받는 것이라 생각된다.

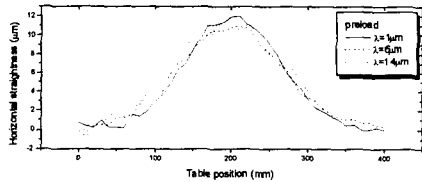


Fig. 9(a) Horizontal straightness error

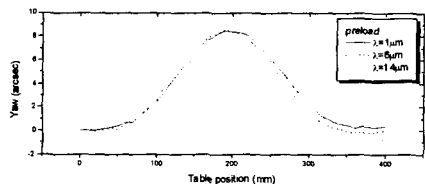


Fig. 9(b) Yaw angle error

3.3 정도 평균화 효과

3.2 절의 결과를 정리하여 정도 평균화 효과란 측면에서 Fig. 10 과 같이 정리할 수 있다. 여기에서 정도 평균화 효과란 의미는 레일 설치 오차량에 대한 테이블의 운동오차의 비를 의미하는 것으로 하겠다.

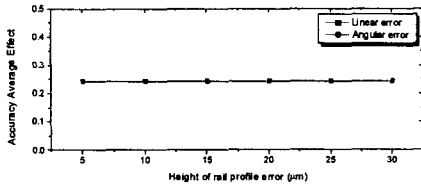


Fig. 10(a) By rail error height

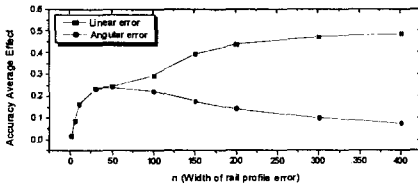


Fig. 10(b) By rail error width

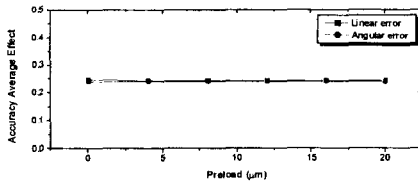


Fig. 10(c) By preload

레일의 설치오차 높이(즉, Gaussian 형태의 레일에서 중심점의 높이)에 따라서는 그 값에 관계없이 정도 평균화 효과는 일정하다. 그러나 높이가 같더라도 폭(Gaussian 형태의 레일 폭)이 다르면 정도 평균화 효과는 달라진다. 여기서 오차 폭을 나타내는 n 의 값은 두 볼 사이의 거리를 기준으로 하여 이의 배수 값을 의미한다. Fig. 10(b)에서 n 이 50 이 될 때까지는 linear 오차나 angular 오차 모두 증가하게 되고, 50 이후부터는 linear 오차는 계속 커져 거의 1/2 에 수렴하게 되나, 요 오차는 거의 0 에 이르게 된다. 이 결과는 쉽게 짐작할 수 있는데 레일 설치오차 높이는 일정한 채 폭이 계속 커진다는 것은 레일이 거의 평행 이동한다는 것을 의미한다. 따라서 linear 오차는 두 레일에서 오차의 평균값인 1/2 에 수렴하게 되고, angular 오차는 0 에 수렴하게

되는 것이다.

4. 결론

본 논문은 LM 가이드의 정도 설계에 있어서 우선적으로 레일 설치 오차나 예압이 테이블의 운동 오차에 미치는 영향을 살펴본 것으로 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- (1) 볼 베어링은 롤러 베어링에 비해 강성은 떨어지지만 고주파 성분의 레일 오차의 흡수 능력이 크다.
- (2) Gaussian 형태의 레일 오차인 경우에 대해서, 정도 평균화 효과는 오차 높이에 의해서는 대략 1/4 정도로 일정한 값을 지니며, 오차 폭에 의해서는 그 크기에 따라 1/2 ~ 1/60 까지의 값을 나타낸다.
- (3) 예압에 의해서는 거의 영향이 나타나지 않는 것으로 보인다.
- (4) 일반적으로 정도 평균화 효과는 고주파 성분의 레일 오차에서 그 효과가 크게 나타난다.

참고문헌

1. 清水 茂夫, “직동 볼가이드 시스템의 부하분포와 정도, 강성에 관한 연구”, 일본정밀공학회지 Vol.56, No.8, p1445, 1990
2. 清水 茂夫, “직동 볼가이드 시스템의 부하분포와 정도, 강성에 관한 연구 - 정도 평균화 효과의 이론적 검증”, 일본정밀공학회지, Vol.57, No.10, p1814, 1991
3. 清水 茂夫, “직동 볼가이드 시스템의 정도 평균화 효과에 관한 연구”, 일본정밀공학회지, Vol.58, No 11, p1873, 1992
4. 清水 茂夫, “직동 가이드의 강성해석”, 일본정밀공학회지, Vol.64, No 11, p1573, 1998
5. 이후상 외, “리니어모션 볼베어링의 예압특성에 관한 연구”, 한국정밀공학회지 춘계 학술대회 논문집, p857, 1998
6. 上村 明彦, “공작기계 롤러타입 직동안내기기의 특성과 응용”, 기계연구, 제 45 권 제 12 호, p1257, 1993
7. S. T. Smith and D.G. Chetwynd, “Foundations of Ultraprecision Mechanism Design”, Gordon and Breach Science Publishers, 1992
8. Alexander H. Slocum, “Precision Machine Design”, Prentice-Hall International, Inc, 1992