韓國精密工學會 2000年度 秋季學術大會論文集 pp.179~183 KSPE 00F042

직선베어링 이송계의 운동정밀도 해석

김경호(KAIST 기계공학과), 이후상(KIMM 자동화 연구부), 박천홍(KIMM 자동화 연구부), 김승우(KAIST 기계공학과)

Analysis of the Motion Accuracy in Linear Motion Bearing Guide

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

ABSTRACT

This paper is concerned with achieving the high motion accuracy of linear motion bearing guide according to estimate accuracy average effect of bearing. Accuracy average effect can be obtained by analysis the relationship between motion error of the table and spatial frequency of the rail form error. And influences of ball diameter, ball number, and block length on block motion error and block number on the table motion error are analyzed theoretically. In addition to, a simple experiment is performed in order to verify theoretical result.

Key Words : Linear motion bearing guide(직선베어링 이송계), Motion Accuracy(운동 정밀도), Accuracy average effect(정도평균화효과), Spatial frequency of rail(레일의 공간주파수)

1. 서론

직선베어링 이송계는 고속화 및 고정도, 고강성의 장점으로 인해 공작기계나 초정밀 가공기의 안내면으로 널리 사용되고 있다. 특히 베어링의 정도평균화효과에 의해 레일의 형상오차보다도 수십배 이상의 운동정밀도를 달성할 수 있다는 것은 큰 매력이 아닐 수 없다.

현재 직선베어링 이송계에서 원하는 정밀도가 나오지 않을 경우에는 운동정밀도에 가장 큰 영향을 주는 레일을 분해한 후 레일 및 취부면(레일이 부착되는 면)을 재가공하는 방법을 사용하고 있다. 그러나 이러한 작업은 몇몇의 고도로 숙련된 사람에 의해 제한되며, 그것도 생산성과 재현성 면에서 큰 문제점을 갖고 있다. 레일의 형상오차와 테이블의 운동정밀도와의 관계를 알 수 있다면 이러한 작업은 비숙련자들도 쉽게 접근할 수 있는 문제가 될 것이다. 레일의 형상오차의 주파수 성분이 운동정밀도에 미치는 영향을 파악함으로써, 굳이 레일의 형상오차를 0 으로 만들지 않더라도 볼팅 등과 같은 간단한 작업에 의해서 특정한 주파수 성분을 만들음으로써 충분히 원하는 운동정밀도를 달성할 수 있기 때문이다

따라서 본 논문에서는 레일의 주파수 성분에 따른 테이블의 운동정밀도를 여러가지 변수들에 대해서 분석하고, 정도평균화효과의 정량적인 산출을 통하여 수정가공의 효율을 높이고자 하였다. 즉, 블록 내의 볼의 수와 크기, 예압, 레일의 형상오차의 진폭, 블록의 개수가 블록 및 테이블의 운동정밀도에 미치는 영향을 분석하였으며 간단한 실험을 통하여 이를 검증하였다.

2. 해석을 위한 블록과 테이블의 모델링

2.1 블록과 테이블의 모델링

분석에 사용한 블록은 현재 공작기계용으로 많이 사용되고 있는 THK 의 HSR 35 로 고강성이며 등하중 타입의 특징을 가지고 있다. 해석을 위한 블록과 테이블의 모델링에 대한 내용은 지면관계상 생략하며, 자세한 내용은 저자 등이 2000 한국정밀공학회 춘계학술대회 때 발표한 논문 [5] 을 참고하기 바란다.

2.2 레일의 형상오차 가정

푸리에 정리(Fourier's theorem)에 의해 공간주기가 L 인 레일은 다음과 같이 코사인과 사인의 조합으로써 나타낼 수 있다. 여기서 m 은 30 이상의 고주파 성분은 실제의 레일에 거의 존재하지 않을 것으로 생각되어 30 으로 제한하였다.

$$e(x) = \frac{A_0}{2} + \sum_{m=1}^{30} \left(A_m \cos \frac{2\pi m}{L} x + B_m \sin \frac{2\pi m}{L} x \right)$$

여기서 코사인파나 사인파는 위상만 다를 뿐, 같은 형태이므로 코사인 형태의 오차를 가정하여 블록이나 테이블이 한 주기만큼 이동하였을때의

오차의 최대값과 최소값의 차이를 구하여 나타내었다. 단 기준주기는 블록의 경우에는 블록길이를 기준으로 하였고, 테이블의 경우에는 테이블의 양 끝단에 위치해 있는 블록 사이의 거리를 기준으로 하였다. 오차의 진폭은 0.5μm 로 설정하여 바로 표준화된 결과를 알아볼 수 있도록 하였다.

2.3 블록과 테이블 변수의 설정

주파수 분석에 필요한 블록과 테이블의 변수 값과 조건들을 나타내면 Table.1 과 같다. 앞으로 변수들의 값을 따로 표시하지 않는 한, 아래의 값이 기본값들로 사용된다.

Table 1 Dimensions for analysis of motion error

블록	볼 직경 D_a, (μm)	6.354
	예압 λ, (μm)	-4
	볼 사이의 간격 팩터 χ	1.03
	블록 길이 l, (μm)	80.4
	기준주파수 ω_b (=2π/l)	0.078
	레일의 진폭 δ, (μm)	0.5
테이블	사용된 블록 수 (개)	4
	두 레일 사이 거리 (mm)	290
	두 블록 사이 거리 L, (mm)	450
	기준주파수 ω_t(=2π/L)	0.014
	레일의 진폭 δ, (μm)	0.5

3. 블록의 운동정밀도 분석결과

3.1 운동정밀도의 전체적인 특징

Fig.1 에서 레일의 형상오차의 주파수 성분에 따른 블록의 운동오차를 살펴보면 12.3Hz 마다 직선운동오차는 최대가 되며, 각운동오차는 최소가 된다. 이 값은 분석에 사용된 기준주기인 80.4mm 를 두 볼 사이의 거리인 χD_a (=6.54mm)로 나눈 값이다. 즉, 기준주기를 블록의 길이가 아닌 블록 내에 실제로 볼이 존재하는 길이로 설정하게 되면 블록의 직선운동오차는 볼 개수의 배수에 해당하는 주파수에서는 최대가 되며, 각운동오차에서는 최소가 된다.

3.2 진폭의 영향

Fig. 1 은 레일의 형상오차의 진폭을 0.5, 2.5, 5, 10, 25μm 로 변화시켰을 때 구한 블록의 운동오차를 진폭의 2 배로 나누어 표준화시킨 결과이다. 진폭과 관계없이 모두 일정한 그래프를 얻을 수 있었다. 따라서 기준진폭인 0.5μm 에 대해서 주파수 분석한 결과만을 알면 나머지 진폭에 대해서는 그 크기만 곱해주면 운동오차를 구할 수 있을 것이다

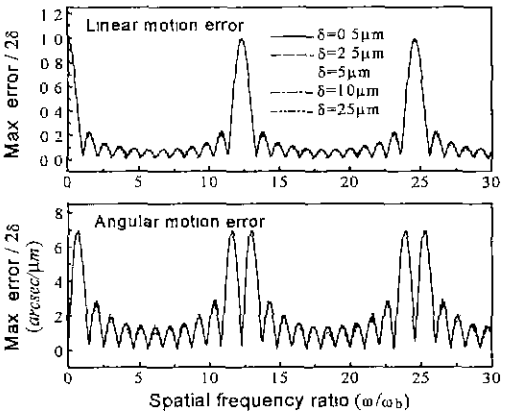

Fig. 1 Nomalized result of motion error by amplitude of rail form error

3.3 예압의 영향

일반적으로, 예압을 주는 방법은 볼의 크기를 그루브보다 오버사이즈되게 만드는 방법을 주로 사용하며 (-)기호로써 나타낸다. Fig 2 는 예압을 -4 μm 에서 -20 μm 로 주었을때의 정밀도 분석 결과로 예압에 의한 영향은 없는 것으로 보인다. 볼의 예압은 강성을 의미하므로 블록의 운동정도는 볼의 강성과는 무관하다는 것을 알 수 있다

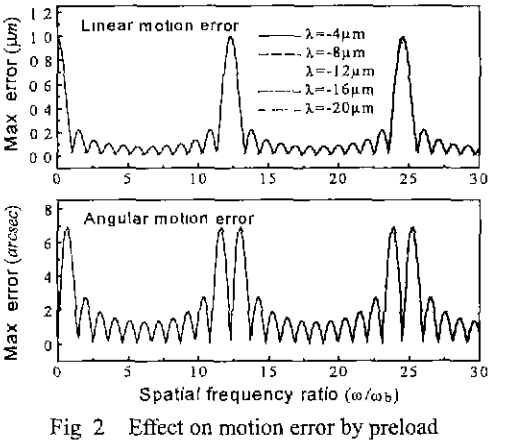

Fig 2 Effect on motion error by preload

3.4 볼수와 볼 크기에 의한 영향

다음은 한 블록 내의 볼의 개수와 크기, 블록의 길이가 블록의 운동정도에 미치는 영향을 살펴본 것이다

Table. 2 Specification of parameters for block motion error analysis

	볼개수	볼직경 (mm)	블록길이 (mm)	블록강성 (N/μm)
A	6	6.354	40.2	285
B	6	12.704	80.4	420
C	9	8.471	80.4	522
D	12	6.354	80.4	607
E	24	6.354	160.8	1225

Table.2 에서 D 는 현재 상용 제품으로 나오는 HSR 35 의 스펙을 나타내며, A 는 같은 볼 직경에 길이를 반으로 줄인 것이며 E 는 두 배 한 것이다. B 는 볼 개수는 반으로, 직경은 두 배로 하여 전체 블록길이는 변화지 않게 했으며, C 는 중간으로 볼 개수와 직경을 각각 9 개, 8.471 로 하였다.

실제 레일의 형상오차는 고주파보다는 저주파가 크게 영향을 미치므로 Fig. 3 에서는 5 주기까지만을 비교하였다. B, C, D 의 그래프로부터 블록길이가 일정할 경우는 볼 개수가 많아질수록(볼 직경은 작아짐) 운동정도가 향상되는 것을 알 수 있으며, 부수적으로 강성도 증가하는 것을 알 수 있다 또한 A, D. E 의 그래프로부터 볼 직경이 같을 때에는 볼 개수가 많아질수록(블록길이도 늘어남) 운동정도가 좋아지고 강성도 증가하는 것을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 블록은 가능한 한 같은 길이 내에서 많은 볼이 들어가도록 설계하는 것이 운동정도와 강성 면에서 유리함을 알 수 있다.

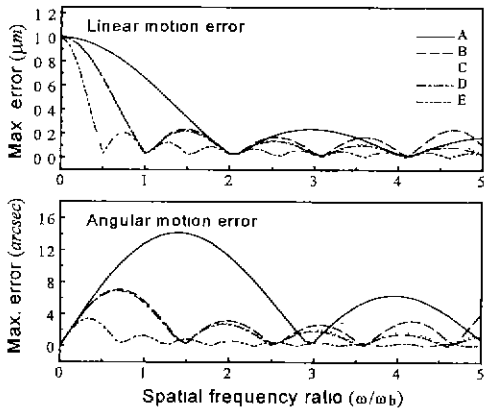

Fig. 3 Effect on motion error by number and diameter of ball, length of block

4. 테이블의 운동정밀도 분석결과

4.1 운동정밀도의 전체적인 특징

일반적으로 테이블은 두 개의 레일이 사용되므로 이 두 레일의 상호 위치 관계에 따라서 운동오차가 좌우되게 된다. 한 예로, 두 레일의 형상오차가 전혀 없는 경우와 마찬가지로 두 레일이 대칭인 경우에도 운동오차는 0 이 될 것이다. 따라서 주파수 분석시 두 레일의 형상오차를 모두 고려하지 않고 상대적인 차이만을 고려하였다.

Fig. 4 는 블록이 4 개일때, 기준주기를 두 블록 사이의 거리인 450mm, 진폭을 0.5μm 로 설정하여 분석한 결과이다. 전체적으로 보면, 주기가 5.6, 그리고 1 인 파가 동시에 나타나고 있으며 고주파로 갈수록 크기는 작아지고 있다. 여기서 5.6 이라는 값은 블록의 길이인 80.4mm 를 테이블 기준주기인 450mm 에 대해서 나타낸 주파수이며, 1 은 두 블록 사이의 거리를 기준주기로 했기 때문에 나온 결과이다. 즉, 테이블의 운동오차는 블록의 길이와 두 블록 사이의 거리가 종합적으로 작용하여 나타난다는 것을 알 수 있다. 또한 기준주기에 대해서 5 주기 이하의 성분을 제거하면 직선운동오차와 각운동오차 모두 1/5 이상의 정도평균화효과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

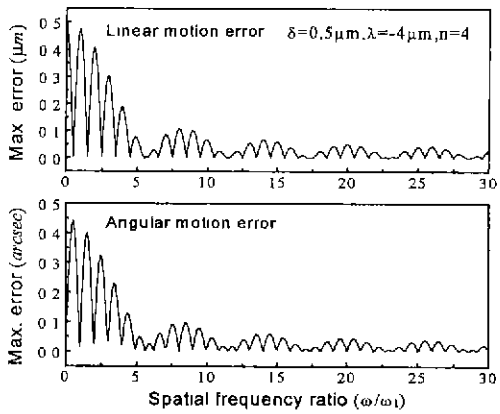

Fig. 4 Table motion error by frequency analysis of rail form error

4.2 블록 수에 의한 영향

Fig. 5 은 한가운데에 블록을 추가하여 전체 블록 수를 6 개로 했을 때의 결과로, 2 의 배수에 해당하는 주파수는 직선운동오차에서 그대로 민감주파수가 되며, 나머지는 둔감주파수로 바뀌었다. 각운동오차의 경우에는 블록이 4 개인 경우와 거의 차이를 보이지 않는다. Fig. 6 은 블록수가 8 개일때로 3 의 배수인 주파수에 대해서 직선운동오차는

그대로 이고 나머지 주파수에 대해서는 작아졌다.

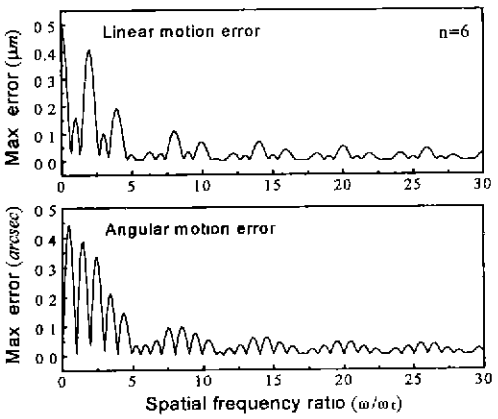

Fig. 5 Motion error when number of blocks are 6

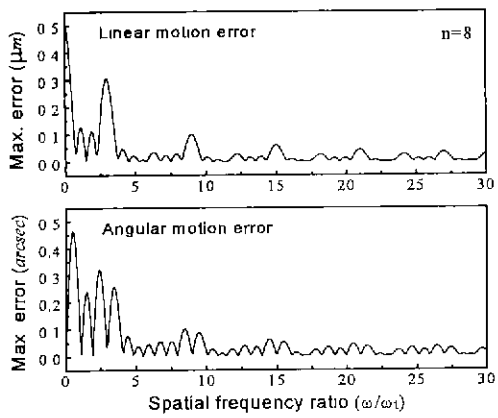

Fig. 6 Motion error when number of blocks are 8

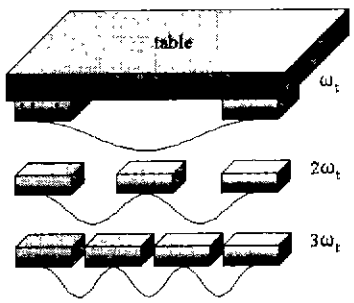

Fig. 7 Configuration of block position by # of block

이것은 블록이 4 개일때 한 레일상에 있는 두 블록 사이의 거리를 기준주기로 택하였기 때문에 블록이 6 개인 경우에는 이웃하는 두 블록 사이의 거리에 해당하는 주기가 기준주기의 1/2 배, 즉 주파수로는 2 배가 되기 때문에 2 의 배수인 주파수는 민감 주파수가 되는 것이다. 블록이 8 개일때도 마찬가지라 할 수 있다.

결국, 블록수가 4 개일때 두 블록 사이의 거리를 기준주기로 하면, 블록 수가 n 인 테이블에 대해서 (n/2)-1 의 배수에 해당하는 주파수는 직선운동오차에 대해서 민감주파수, 각운동오차에 대해서 둔감주파수가 된다고 말할 수 있다.

5. 실험결과

다음은 레일에 심을 넣어 임의로 코사인 성분의 형상오차를 만들어서 실험한 결과이다. 심으로는 40μm 두께 게이지를 이용하여 Fig.8 과 같이 레일과 취부면 사이에 넣었으며, 측정된 레일의 형상은 Fig. 9 와 같다.

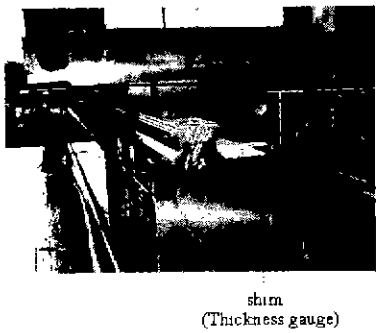

Fig. 8 Making rail form error using thickness gauge

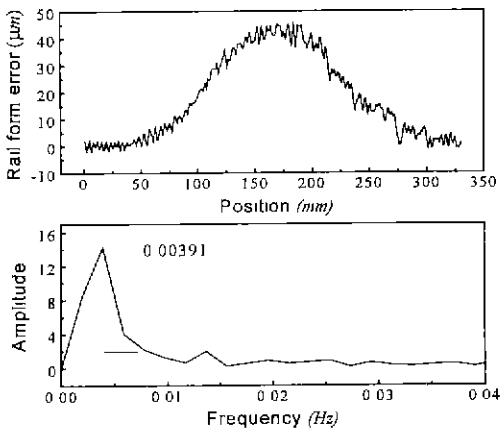

Fig. 9 Measurement of rail form error and it's FFT analysis

측정된 레일형상을 FFT 한 결과 0.00391Hz 의 주파수 성분을 가지고 있으며, 이를 기준주기인 450mm 에 대해서 나타내면 1.76Hz 가 된다. 이 주파수에 해당되는 직선운동오차와 각운동오차를 Fig. 10 에서 찾아 레일의 형상오차 진폭인 42μm 를 곱하면 테이블의 직선운동오차는 12.9μm, 각운동오차는 10.1arcsec 가 된다. Fig. 11 은 측정된 레일 형상오차를 프로그램에 입력하여 이론적으로 계산한 운동오차와 레이저 간섭계(HP 5529A)를 이용하여 측정된 운동오차를 비교한 결과이다. 이론적으로 구한 결과는 직선운동오차 10.3μm, 각운동오차 9.4arcsec 이며, 실험을 통하여 구한 결과는 직선운동오차 11.7μm, 각운동오차 8.5arcsec 로 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 그러나 이 두 개의 결과는 모두 Fig. 10 의 주파수 분석 결과와 약간의 차이를 보이고 있는데 이것은 레일의 형상오차를 주파수 분석할 때 주된 주파수인 1.76Hz 만 고려하고 나머지 성분은 모두 무시했기 때문이다.

6. 결론

본 논문은 직선베어링을 이용한 이송계에서 운동정도를 향상시키기 위한 방법으로 레일의 주파수 성분에 따른 테이블의 운동정밀도를 여러가지 변수들에 대해서 분석한 것으로 결과를 간단히 요약하면 다음과 같다.

1) 레일의 형상오차와 테이블의 운동정밀도와의 관계 분석을 통하여 정도평균화효과를 정량적으로 산출하였다
2) 블록에 사용되는 볼의 수가 많아질수록 운동정도와 강성이 모두 향상되었다.
3) 블록의 운동오차는 레일의 형상오차 진폭의 크기에 비례하여 증가하며, 이를 진폭의 크기에 대해서 표준화시킨 결과는 모두 일치한다.
4) 볼의 예압은, 즉 베어링의 강성은 운동정밀도에 영향을 주지 못한다.
5) 테이블의 운동정밀도는 사용되는 블록의 개수에 따라 달라지며, 테이블 양 끝단에 위치하는 블록 사이의 거리를 기준으로 할 때 (블록수/2)-1 의 배수가 되는 주파수에 대해서 직선운동오차는 최대가 되며, 각운동오차는 최소가 된다.

참고문헌

1. 清水茂夫: 直動ボールガイドシステムの負荷分布と精度・剛性に關する研究, 日本精密工學會誌, Vol. 56, No. 8 (1990) p1445.
2. 清水茂夫 直動ボールガイドシステムの負荷分布と精度・剛性に關する研究 -精度平均化效果の理論的檢 -, 日本精密工學會誌, Vol. 57, No. 10 (1991) p1814.
3. 清水茂夫: 直動ボールガイドシステムの精度平均化效果に關する研究, 日本精密工學會誌, Vol. 58, No 11 (1992) p1873.
4. 清水茂夫. 直動ガイドの剛性解析, 日本精密工學會誌, Vol. 64, No. 11 (1998) p1573.
5. 김경호 외, "공작기계 직선 베어링 안내면의 정도설계에 관한 연구", 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, p692, 2000

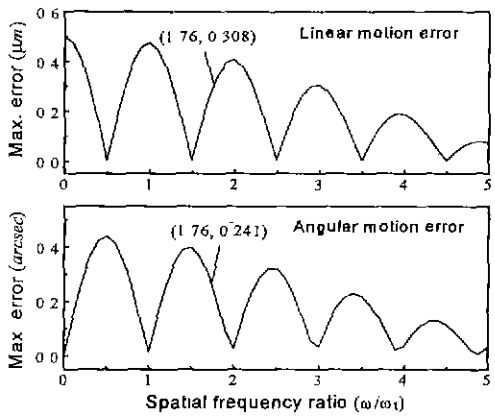

Fig. 10 Motion error by measured rail frequency

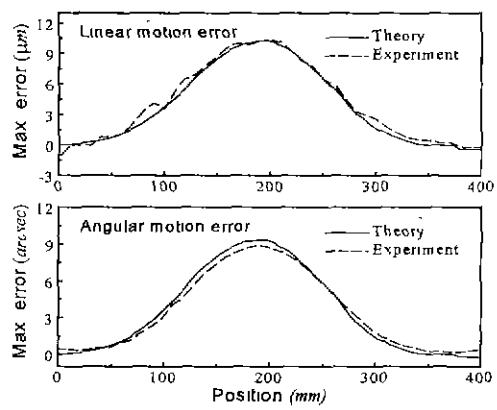

Fig.11 Comparison between theoretical and experimental result of motion error