

전달함수를 이용한 직선베어링 안내면의 운동정밀도 향상

김경호*, 박천홍**, 이후삼**, 김승우***

Improvement of Motion Accuracy Using Transfer Function in Linear Motion Bearing Guide

Kyung Ho Kim*, Chun Hong Park**, Husang Lee**, and Seung Woo Kim***

ABSTRACT

An analysis method which calculates corrective machining information for improving the motion accuracy of linear motion guide is proposed in this paper. The method is composed of two algorithms. One is the algorithm for prediction of the motion errors from rail form error. The other is the algorithm for prediction of rail form error from the motion errors of table. Transfer function is utilized in each algorithm, which represents the ratio of bearing reaction force variation to unit magnitude of spatial frequencies of rail form error. As the corrective machining information is acquired from the measured motion errors of table, the method has a merit not to measure rail form error directly. Validity of the method is verified both theoretically and experimentally. By applying the method, linear motion error of test equipment is reduced from $5.97\mu\text{m}$ to $0.58\mu\text{m}$, and reduced from 32.78arcsec to 6.21arcsec in case of angular motion error. From the results, it is confirmed that the method is very effective to improve the motion accuracy of linear motion guide.

Key Words : Linear motion bearing guide(직선베어링안내면), Motion error(운동오차), Transfer function(전달함수), Corrective machining(수정가공), Rail form error(레일형상오차)

1. 서론

직선베어링 안내면(이하, 직선안내면)의 운동정밀도를 향상시키기 위해서는 운동정밀도에 가장 큰 영향을 미치는 레일의 형상오차를 개선해야 하며, 이를 위해서는 먼저 레일의 형상을 측정하고 그 측정값을 기준으로 운동정밀도 향상방안을 모색하는 과정을 수행해야 한다. 그러나 직선안내면의 레일은 곡률을 지닌 홈이 복수 개 배열되어 있으며, 조립 기준면의 정밀도에 의해서도 크게 영

향을 받으므로 그 형상오차를 측정하기가 매우 어렵다. 따라서 실제 운동정밀도의 향상은 숙련된 조립자의 경험에 크게 의존하고 있다.

본 논문에서는 이러한 개선과정을 이론적으로 체계화하기 위해 레일 형상오차를 구성하는 각각의 공간주파수의 단위크기에 대응하는 직선베어링 내에서의 반력의 변화를 전달함수로 정의하고, 이론적으로 구한 전달함수와 직선안내면 운동오차(직선 및 각운동오차) 측정값을 이용하여 레일형상오차(이하, 레일이 체결된 베드면 또는 기준면

2001년 11월 30일 접수
* 한국과학기술원 기계공학과 대학원
** 한국기계연구원 자동화연구부
*** 한국과학기술원 기계공학과

의 정밀도를 포함한 형상오차를 나타냄)를 추정하여 운동정밀도 향상에 필요한 수정가공정보를 얻을 수 있는 수정가공 알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘은 운동오차 측정값으로부터 베어링 반력의 변화를 매개로 하여 레일 형상오차를 추정해 내는 레일추정 알고리즘 및 추정된 레일 형상오차로 수정가공 한 후의 운동정밀도를 미리 예측할 수 있는 운동오차해석 알고리즘으로 구성된다.

레일 형상오차를 가정하고 이 레일에 대해 운동오차를 이론적으로 구한 후, 계산된 운동오차를 이용하여 레일 형상오차를 추정하여 앞에서 가정한 레일 형상오차와의 비교를 통해 추정특성을 검토함으로써 수정가공 알고리즘을 이론적으로 검증하였다. 또한 실제 직선베어링 안내면에 대해 수정가공 알고리즘을 적용하여 운동정밀도 향상특성을 검토함으로써 실험적으로도 유용성을 검증하였다.

2. 전달함수를 이용한 운동오차 해석

2.1 전달함수의 도입

레일의 형상오차를 주기함수로 가정하면 푸리에 급수를 이용하여 식(1)과 같이 나타낼 수 있으며, 여기서 L 은 레일의 길이 A_k, B_k 는 공간주파수 ω_k 에 대한 푸리에 계수를 나타낸다.

$$e(x) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \left(A_k \cos \frac{2\pi k}{L} x + B_k \sin \frac{2\pi k}{L} x \right) \quad (1)$$

여기서 레일형상오차가 임의의 단일 공간주파수 성분 ω_k 만으로 구성되고, 그 레일상에서 베어링이 자세변화 없이 공간주파수의 1 주기분만큼 이동될 때, 베어링 내에서 발생하는 반력의 변화량 $\Delta F(\omega_k)$ 와 레일형상오차의 진폭 $\alpha(\omega_k)$ 와의 비를 이 공간주파수에 대한 전달함수라고 정의하여 식(2)와 같이 나타낸다. 따라서 공간주파수 ω_0 에 대한 전달함수는 베어링의 정강성을 의미하게 된다.

$$H(\omega_k) = \frac{\Delta F(\omega_k)}{2\delta(\omega_k)} \quad (2)$$

전달함수는 해석 대상인 직선베어링이 임의의 단일 공간주파수로 구성된 레일 형상오차상을 이동할 때의 반력의 변화량을 헤르쯔의 탄성변형식을 이용하여 계산하고^{1),2),3)}, 이 과정을 계산에 고려할 공간주파수까지 순차적으로 반복하는 것에

의해 얻을 수 있다.

2.2 운동오차의 해석

2.2.1 직선안내면의 모델링

식(1), (2)로부터, 임의의 주파수성분으로 구성된 레일형상오차에 의해 베어링 내에서 발생하는 반력은 형상오차의 크기에 이 주파수에서의 전달함수를 곱함으로써 구해지며, 다양한 공간주파수로 구성된 형상오차를 갖는 레일에 대해서는 각 주파수 성분에 의해 받는 힘을 식(3)과 같이 합산함으로써 구할 수 있다.

$$F(x) = \frac{A_0}{2} H(\omega_0) + \sum_{k=1}^{\infty} H(\omega_k) \left(A_k \cos \frac{2\pi k}{L} x + B_k \sin \frac{2\pi k}{L} x \right) \quad (3)$$

한편, 레일당 m 개의 베어링이 서로 l 의 거리를 갖도록 구성된 안내면의 수직방향 운동상태를 그림 1 에 나타내었다. 여기서 W 는 안내면에 수직으로 작용하는 외부하중 및 자중을, $e_1(x), e_2(x)$ 는 좌우 레일의 수직 방향 형상오차를 나타내고 있다. l_w 는 두 레일간의 거리, l_0 는 테이블의 길이, l_b 는 베어링의 길이를 나타낸다. 또한 K 는 베어링 한 개의 수직방향 강성을, $F_{1i}(x), F_{2i}(x)$ 는 각 레일상에서 테이블이 힘의 평형을 이룬 상태에서의 각 베어링의 수직방향 반력을 나타낸다

일반적으로 하나의 직선안내면에 있어 직선베어링은 동일규격으로 복수개가 사용된다. 따라서 안내면의 운동상태는 다수의 동일한 베어링이 기하학적인 관계를 갖고 이동하는 상태가 되므로, 한 개의 베어링이 레일형상에 대해 갖는 특성인

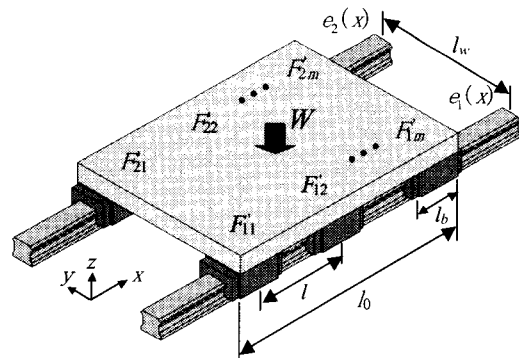


Fig. 1 Static equilibrium state of LM guide in vertical direction

전달함수와 각 베어링의 공간적인 거리를 이용하면 운동오차의 해석이 가능하다.

해석을 위해 먼저, 각 베어링에서의 모멘트 중심은 항상 베어링의 기하학적 중심과 일치하고, 경사변위는 각 베어링간의 수직변위에 의해서만 결정되며, 베어링의 수직방향변위 영역 내에서 베어링의 강성은 일정함을 가정한다. 이러한 가정을 고려하면 그림 1 의 모델에 있어 평형상태 이후의 반력 $F_{ji}(x)$ 와 형상오차에 의해 베어링 내에 발생하는 반력(이하, 반력으로 약칭함) $F_{ji}(x)$ 와는 식(4)의 관계를 갖게 되며, 이를 이용하여 정적상태에서의 롤방향을 포함한 힘과 모멘트의 평형조건을 나타내면 식(5)~(8)과 같이 된다.

$$F_{ji}(x) = F_{ji}(x) - K \cdot z_{ji}(x) \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^m \{F_{ji}(x) - K \cdot z_{ji}(x)\} = W \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^m \{F_{ji}(x) - K \cdot z_{ji}(x)\} \left(X_i + \frac{l_0}{2} \right) = W \frac{l_0}{2} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^m \left\{ (F_{2i}(x) - K \cdot z_{2i}(x)) \frac{l_w}{2} - (F_{1i}(x) - K \cdot z_{1i}(x)) \frac{l_w}{2} \right\} = 0 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{where } z_{ji}(x) &= z(x) + \theta(x) \cdot X_i + \phi_x(x) \cdot y_j \\ X_i &= l(i - (m+1)/2) \\ l_0 &= (m-1)l + l_b \\ l_0/2 \leq x &\leq L - l_0/2 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 $z_{ji}(x)$ 는 $F_{ji}(x)$ 에 의한 수직방향 변위를 나타낸다. 또한 X_i 는 테이블 중심에서 각 베어링 중심까지의 x 방향 거리, $z(x)$ 는 테이블의 직선운동 오차, $\theta(x)$ 는 테이블의 각운동오차(피치오차), $\phi_x(x)$ 는 롤오차를 나타내며, y_j 는 테이블 중심에서 각 레일의 중심까지의 y 방향 거리를 나타낸다.

2.2.2 단일 레일을 갖는 등가모델

그림 1 의 모델로부터 운동오차를 해석하기 위해서는 두 개의 레일에 대한 정보를 모두 얻어야 할 필요가 있으며, 수정가공의 경우에도 두 레일을 전부 가공대상으로 해야 하는 불편함이 있다.

한편, 두 개의 레일에 의한 운동오차를 고려하면, 그 운동오차는 양 레일간의 상대적인 변화에 의해 발생하므로, 이 특성을 이용하면 한 개의 레일을 갖고 운동오차면에서 등가인 안내면으로 모델링할 수 있다⁴⁾.

먼저, 식(5)에서 두 레일의 i 번째 베어링에서의 수직방향 반력의 합 및 수직변위를 발생시키는 힘

의 합은, 식(3) 및 식(8)의 관계로부터 식(9), (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{1i}(x) + F_{2i}(x) &= \frac{(A_{10} + A_{20})}{2} H(\omega_0) + \sum_{k=1}^{\infty} H(\omega_k) \left\{ (A_{1k} + A_{2k}) \cos \frac{2\pi k}{L} x \right. \\ &\quad \left. + (B_{1k} + B_{2k}) \sin \frac{2\pi k}{L} x \right\} \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K \{z_{1i}(x) + z_{2i}(x)\} &= 2K \{z(x) + \theta(x) \cdot X_i\} + \phi_x(x) \cdot (y_1 + y_2) \\ &= 2K \{z(x) + \theta(x) \cdot X_i\} \quad (10) \end{aligned}$$

식(9)로부터 두 레일의 i 번째 베어링에서의 반력의 합은 두 레일의 형상오차 $e_1(x)$, $e_2(x)$ 의 합으로 나타내어진 등가의 단일 레일상에서 i 번째 베어링내의 반력 $F_i(x)$ 로 치환할 수 있으며, 식(10)으로부터 그 때의 수직변위의 합은 $K_0=2K$ 의 강성을 갖는 등가베어링의 수직변위 $z_{0i}(x)$ 로 치환할 수 있다.

따라서 형상오차 $e(x)$ 를 갖는 한 개의 레일로 구성된 등가모델로 나타낼 수 있으며, 등가모델을 스프링과 질량을 이용하여 나타내면 그림 2 와 같다. 이 때의 힘과 모멘트의 평형조건은 식(11)과 같으며, 그 때의 직선운동오차 및 각운동오차(피치오차)는 식(12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_{i=1}^m \{F_i(x) - K_0 \cdot z_{0i}(x)\} = W \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^m \{F_i(x) - K_0 \cdot z_{0i}(x)\} \left(X_i + \frac{l_0}{2} \right) = W \frac{l_0}{2}$$

$$z(x) = \frac{1}{mK_0} \left(\sum_{i=1}^m F_i(x) - W \right) \quad (12)$$

$$\theta(x) = \frac{12}{mK_0(m^2 - 1)l^2} \sum_{i=1}^m \{F_i(x) \cdot X_i\}$$

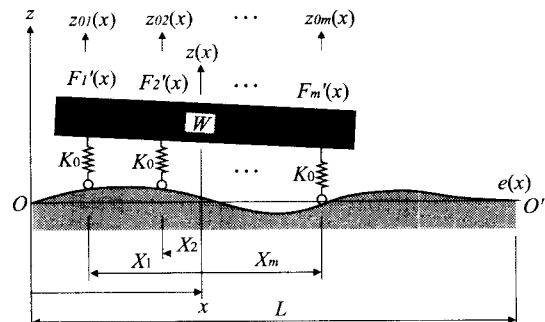


Fig. 2 Equivalent model of LM guide on motion error in vertical direction

이러한 관계는 수평방향에 있어서의 직선운동 오차 및 각운동오차(요 오차)를 구할 경우에도 동일하게 적용할 수 있다.

3. 레일형상오차의 추정

3.1 베어링 반력의 계산

운동오차 측정치로부터 베어링의 반력을 계산하는 과정은 운동오차 해석과정의 역순이 된다. 즉, 식(12)에서 반력 $F_i(x)$ 가 미지수가 되며, 이 경우 방정식은 2 개뿐이므로 베어링이 3 개 이상인 경우에는 반력을 구할 수 없다. 여기에서 베어링이 3 개 이상인 경우에도 각 베어링의 규격이 동일하다는 점을 고려하면, 다수의 베어링의 이동에 따른 반력 변화를 한 개의 베어링이 공간적인 위상차를 갖고 이동함에 따른 반력 변화로 중첩시키는 것에 의해 반력의 변화를 구할 수 있다.

그림 3 에 테이블의 위치에 따른 베어링 반력을 도식화하여 나타내었다. 테이블이 베어링간의 거리 l 만큼 이동한 경우를 1 개의 구간으로 정의하여 총 이동량 S 를 구간 S_1, S_2, \dots, S_r 로 세분한다. 단, 각 구간의 분리점은 베어링의 중심을 기준으로 하며, 구간 S_r 은 잔여구간으로 $S_r < l$ 의 관계를 갖는다. 각 구간에 있어서는 반력 $F_i(x)$ 가 m 개 존재하므로 총 구간에서 반력은 $m \times r$ 개가 된다.

한편, 레일을 베어링간의 거리로 세분하고 레일을 기준으로 각 위치에서의 반력을 $g_k(x')$ 라고 하면, 전 구간에 대한 반력은 $k = m + r - 1$ 개가 된다. 즉, 테이블 기준의 반력을 레일 기준의 반력으로

로 변환하는 것에 의해 중첩된 반력의 수를 제거하게 되어 식(12)에서의 방정식과 미지수인 반력의 수를 일치시킬 수 있다. 이 경우 레일위치기준 반력 $g_k(x')$ 와 반력 $F_i(x)$ 와의 관계는 식(13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_i(x+l(j-1)) = g_k(x'), \quad x' = x + X_k \quad (13)$$

$$k = i + j - 1, \quad i = 1, \dots, m, \quad j = 1, \dots, r$$

구간 S_1, S_2 에 있어서 반력과 운동오차의 관계를 식(12)를 이용하여 행렬식으로 나타내면 식(14)와 같으며, 여기서 $z_j(x), \theta_j(x), j = 1, \dots, r$ 은 각 구간에 대응하는 테이블의 직선 및 각운동오차 측정치를 나타낸다.

$$\{z_{S12}\} + W\{q_{S12}\} = [u_{S12}] \{g_{S12}\} \quad (14)$$

$$\text{where, } [u_{S12}] = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1m} & 0 \\ u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2m} & 0 \\ 0 & u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1m} \\ 0 & u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2m} \end{bmatrix}$$

$$u_{1i} = 1, \quad u_{2i} = X_i$$

$$\{q_{S12}\}^T = \{1 \quad 0 \quad 1 \quad 0\}$$

$$\{z_{S12}\}^T = \{az_1(x) \quad b\theta_1(x) \quad az_2(x) \quad b\theta_2(x)\}$$

$$a = mK_0, \quad b = \frac{mK_0(m^2 - 1)l^2}{12}$$

$$\{g_{S12}\}^T = \{g_1(x') \quad \dots \quad g_{m+1}(x')\}$$

식에서 방정식의 수는 2 개가 증가했지만 미지수인 반력의 수는 1 개만이 증가하게 된다. 이 관계를 구간 S_r 까지 확장하면, 전 구간에 대한 행렬식은 식(15)와 같이 된다.

$$\{Z\} + W\{Q\} = [U] \cdot \{G\} \quad (15)$$

where

$$[U] = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1m} & 0 & \dots & 0 \\ u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2m} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1m} & \dots & 0 \\ 0 & u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2m} & \dots & 0 \\ \vdots & & & & \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1m} \\ 0 & \dots & \dots & \dots & u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2m} \end{bmatrix}$$

$$\{Q\}^T = \{1 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad \dots \quad 1 \quad 0\}$$

$$\{G\}^T = \{g_1(x') \quad \dots \quad g_m(x') \quad \dots \quad g_{m+r-1}(x')\}$$

$$\{Z\}^T = \{az_1(x) \quad b\theta_1(x) \quad \dots \quad az_r(x) \quad b\theta_r(x)\}$$

여기서 $[U]$ 는 $2r \times (m+r-1)$ 의 크기를 갖으며

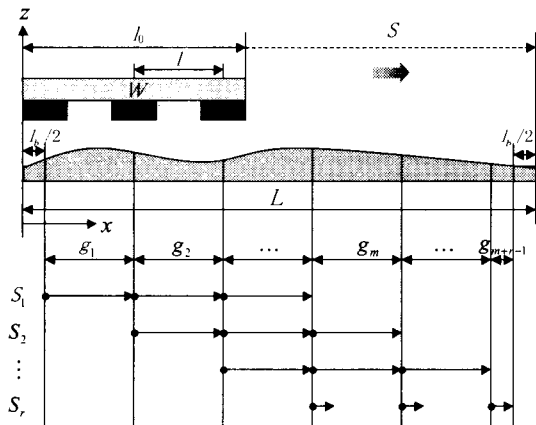


Fig. 3 Relationship between reaction force and rail profile

로, $r = m - 1$ 의 경우 정방행렬이 된다. 따라서 테이블의 이동량이 $(m - 1)l$ 길이만큼 되면 운동오차 측정치로부터 베어링의 반력 $g_k(x')$ 를 얻을 수 있다. 이동량이 이보다 클 경우에는 한 구간씩 이동시켜가면서 반력을 구하면 된다. 한편, 이 계산을 측정데이터의 간격만큼 증가시켜가면서 한 구간당의 운동오차 측정데이터의 수만큼 반복하고 연속적으로 배열하면, 운동오차 측정치에 대응하여 한 개의 베어링이 레일상을 자세변화 없이 이동할 때의 반력 $F(x)$ 를 얻을 수 있다.

3.2 레일 형상오차의 계산

한 개의 베어링이 레일상을 이동할 때의 반력 $F(x)$ 가 구해지면, 식(3)의 관계로부터 전달함수를 이용하여 레일형상오차의 푸리에 계수를 식(16)과 같이 구할 수 있다.

$$\{F\} = [H] \cdot \{C\} \tag{16}$$

$$\text{where, } \{F\} = \{F(x_1) \ F(x_2) \ \dots \ F(x_p)\}^T$$

$$[H] = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{12n+1} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{22n+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{p1} & h_{p2} & \dots & h_{p2n+1} \end{bmatrix}$$

$$h_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{2} H(\omega_0) & j = 1 \\ H(\omega_{j-1}) \cos(\omega_{j-1} x_i) & 1 < j \leq n+1 \\ H(\omega_{j-n-1}) \sin(\omega_{j-n-1} x_i) & n+1 < j \leq 2n+1 \end{cases}$$

$$\{C\} = \{A_0, A_1, \dots, A_n, B_1, B_2, \dots, B_n\}^T$$

여기서 p 는 운동오차 측정치에 대응되어 레일의 전 구간에서 구해진 반력의 개수이며, n 은 계산시에 고려한 최고차 주기성분(이하, 최고계산주기)를 나타낸다.

한편, $[H]$ 는 $(p \times (2n + 1))$ 의 크기를 갖고 있어 일반적으로는 정방행렬이 될 수 없으므로, 행렬 $\{C\}$ 를 구하기 위해서는 식(17)과 같이 최소자승법을 이용한다.

$$\{C\} = ([H]^T [H])^{-1} [H]^T \{F\} \tag{17}$$

레일의 푸리에 계수가 구해지면 식(1)을 이용하여 레일의 형상오차를 구할 수 있다.

4. 알고리즘의 이론적 검증

4.1 전달함수의 특성

알고리즘의 이론적 검증을 위해서는 먼저 전달함수의 특성을 파악할 필요가 있다. 이를 위해 표 1과 같은 제원을 갖는 해석대상 베어링을 선정하고, 베어링의 성능에 영향을 미치는 변수들에 의한 전달함수의 특성변화를 검토하였다. 전달함수는 한 개의 베어링을 대상으로 하므로, 베어링의 유효 길이와 같은 파장을 갖는 공간주파수 ω_b 를 정의하고 이를 기준으로 하여 특성을 검토하였다.

그림 4는 레일형상오차의 진폭과 전달함수의 관계를 파악하기 위해, 오차의 진폭을 $\delta = 0.5, 1.0, 5.0 \mu\text{m}$ 로 변화시켰을 때의 전달함수의 변화를 계산한 결과이며, 전달함수는 2δ 로 나누어 표준화하여 나타내었다. 그림으로부터 표준화된 전달함수의 크기는 진폭에 관계없이 일정함을 보이고 있어 계산된 진폭범위 내에서 레일 형상오차의 진폭과 베어링 반력은 선형적으로 비례함을 알 수 있다.

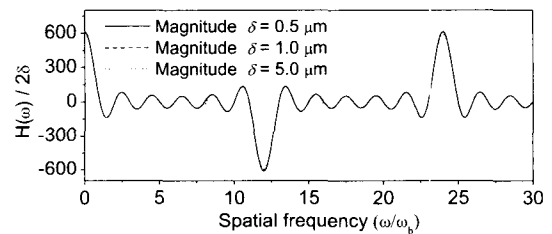


Fig. 4 Relationship between magnitude of rail form error and transfer function

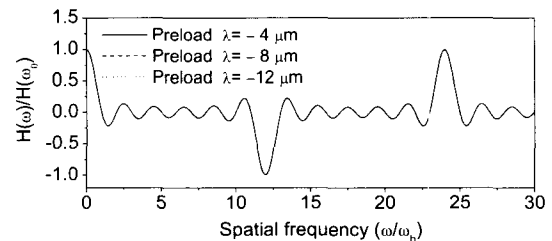


Fig. 5 Relationship between preload on ball and transfer function

Table 1 Specifications of Linear motion guide

LM block	THK HSR 35
Block length	80.4 mm
Effective number of balls	12
Number of blocks	4
Distance between two blocks	140 mm
Distance between two rails	210 mm
Rail length	500 mm

한편, 전달함수는 공간주파수에 따라 크기가 달라지고 있어 공간주파수에 따라 반력에 미치는 영향이 달라지며, 이에 따라 운동오차에 미치는 영향도 달라짐을 알 수 있다. 따라서 이 전달함수는 직선베어링에 있어서 각각의 공간주파수에 따른 정밀도 평균화효과를 정량적으로 나타내게 된다. 이 가운데 전달함수의 크기가 0 에 가까운 공간주파수를 둔감주파수, 피크치에 가까운 공간주파수를 민감주파수로 정의한다. 그림에서 전달함수 값이 양(+), 음(-)으로 변화하는 것은, 기하학적인 관계에 따라 레일형상오차의 변화에 대응하는 베어링반력의 파형의 공간적인 위상이 $0^\circ, 180^\circ$ 로 바뀌는 것을 의미한다. 또한, 베어링내 볼의 개수인 12 의 배수가 되는 주기에 있어서는 표준화된 전달함수가 거의 1 에 가깝게 커짐을 보이고 있어, 볼의 개수와 같은 파장의 레일형상오차를 갖는 경우에는 정밀도 평균화효과를 기대할 수 없음을 알 수 있다.

그림 5 는 볼의 예압에 따른 전달함수의 변화를 베어링의 정강성으로 나누어 무차원화하여 나타낸 것이다. 예압이 $\lambda = -4, -8, -12 \mu\text{m}$ 로 변함에 따라 베어링의 정강성은 증가하게 되지만, 무차원 전달함수는 일정하게 되므로 전달함수는 정강성과 선형적으로 비례함을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 특정한 베어링 규격에 대한 전달함수를 한번만 구해 놓으면, 진폭이나 예압이 변화더라도 선형관계를 이용하여 변화된 조건에 대한 전달함수를 쉽게 구할 수 있음을 알 수 있다.

4.2 레일형상오차의 추정특성

제안한 레일형상오차 추정 알고리즘을 이론적으로 검증하기 위해 먼저 레일형상오차를 가정하고, 표 1 의 베어링이 가정한 레일상에서 운동할 때의 운동오차를 해석한 후, 운동오차 해석결과를 측정치로 가정하여 레일형상오차를 추정한 결과를 원래 가정한 레일형상오차와 비교, 검토하였다.

그림 6 은 가정한 레일형상 및 형상오차의 주파수 성분을, 이해를 쉽게 하기 위해, 레일길이를 기준으로 하는 주파수 ω_R 을 기준으로 나타낸 것이다. 레일길이는 500 mm 이며, 레일길이 기준으로 최고 15 주기 성분까지 구성되어 있다. 레일은 1, 2, 6 주기 성분 이외에도, 고주파 성분의 추정특성을 파악하기 위해 15 주기성분의 크기를 상대적으로

크도록 가정하였다.

이 레일에 대해 알고리즘을 적용하여 추정된 레일형상을 가정한 레일형상과 비교하여 그림 7 에 나타내었다. 추정된 레일형상은 최고계산주기 n 에 의해 영향을 받는 것을 알 수 있다. 그림 7(a)로부터, 실제로 가정한 레일의 최고주기(이하,

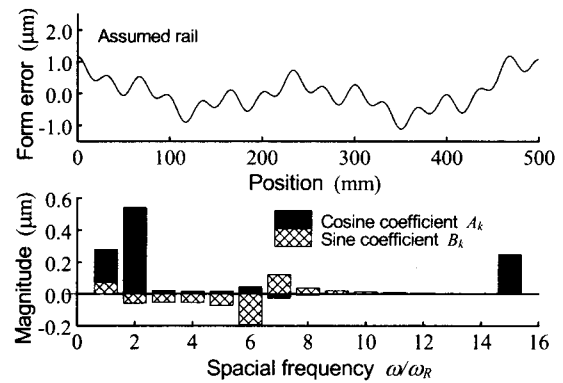


Fig. 6 Assumed rail and its Fourier coefficient

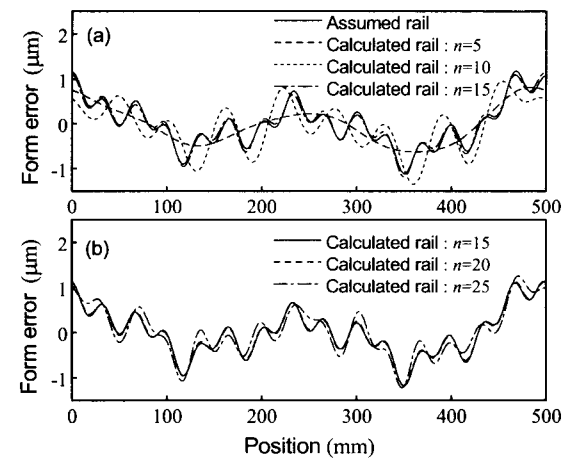


Fig. 7 Comparison of calculated rails with assumed rail

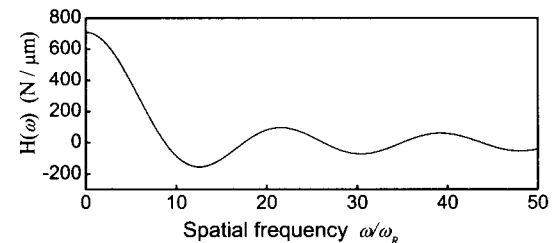


Fig. 8 Transfer function of LM table used in theoretical analysis

실제최고주기)인 15 주기를 최고계산주기로 하는 경우, 추정된 레일형상은 가정한 레일형상과 잘 일치하고 있다. 그러나 최고계산주기를 실제최고주기보다 작게 설정하는 경우에는, 고주파성분을 무시하였으므로 당연히 추정된 레일형상은 가정한 레일형상과 차이를 보이게 된다. 알고리즘상에서는 최소자승법을 이용하므로, 입력값인 운동오차에 대응되는 등가의 레일형상을 얻기 위해 무시한 고주파성분에 해당하는 만큼 계산에 고려된 저주파성분이 변화하게 되며, 이 경우, 전달함수의 크기가 작은 둔감주파수가 가장 크게 변화하게 된다. 그림에서 $n=10$ 의 경우를 보면, 가정한 레일의 15 주기성분이 무시된 대신, 해석대상 직선베어링에 대해 둔감주파수인 약 9 주기성분(그림 8 참조)이 크게 추정되어 나타나고 있다.

한편 실제최고주기보다 최고계산주기를 더 크게 하여 추정한 결과를 그림 7(b)에 나타내었다. $n=20$ 까지는 가정한 레일과 잘 일치하는 결과를 보이고 있으나 $n=25$ 로 더욱 증가시키면, 실제 레일에는 없는 고주파성분을 중심으로 계산상의 누

적오차가 발생하여 추정형상이 다소 달라짐을 보이고 있다.

본 연구에서 제안한 알고리즘은 운동오차 측정치를 입력값으로 수정가공을 수행하므로, 레일형상오차가 갖고 있는 실제최고주기는 알 수 없으며, 따라서 레일형상오차 추정시에 최고계산주기를 너무 작거나 크게 설정하면 레일형상이 정확히 추정되기 어려움을 알 수 있다. 한편, 그림 9 는 그림 7 에서 추정된 레일형상오차를 이용하여 테이블의 운동오차를 계산한 결과를 나타낸 것이다. 최고계산주기를 너무 작게 설정하여 운동오차에 크게 영향을 미치는 주기성분까지 무시한 $n=5$ 의 경우를 제외하면, 어떤 경우에도 추정된 레일형상에 의한 운동오차는 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 다소 차이가 있는 추정결과를 기준으로 수정가공을 수행해도 운동오차면에서는 기대만큼 개선된 결과를 얻을 수 있다. 또한 실제의 경우에 레일면은 대부분 연삭면이므로 고주파의 레일형상오차는 거의 존재하지 않는다. 따라서 측정된 운동오차는 대부분 저주파의 영향이 지배적이므로, 그림 7(b)와 같이 최고계산주기가 실제최고주기보다 일반적으로 커지게 되며, 이에 따라 추정된 레일형상의 차이도 크지 않게 된다. 또한 이상의 추정 경향을 참조로, 최고계산주기를 증감시키거나 레일형상을 추정하여 비교하고, 둔감주파수의 영향을 분석하면 실제 레일형상에 근사한 추정값을 얻을 수 있다.

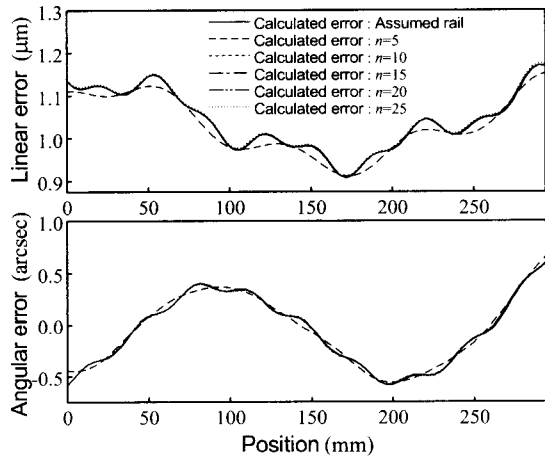


Fig. 9 Comparison of calculated motion errors using calculated rails

Table 2 Specifications of linear motion guide

Drive motor	AC Servomotor (N0703FR)
Ball screw	BNFN2005 (THK) dia.20 mm, pitch 5 mm
LM block	SSR 20XW2UUC1 (THK)
Number of blocks	4
Distance between two blocks	140 mm
Distance between two rails	210 mm
Rail length	500 mm

5. 알고리즘의 실험적 검증

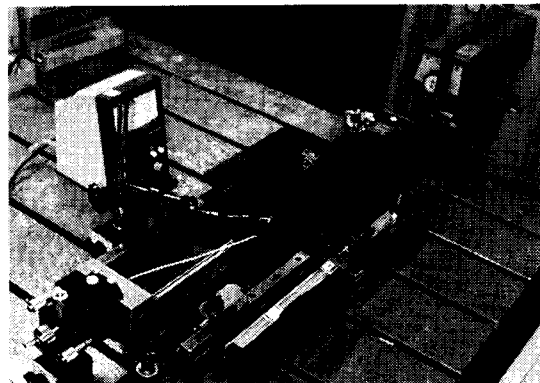


Fig. 10 Experimental setup for verification of corrective machining algorithm

5.1 실험장치 및 실험방법

표 2 는 실험에 사용한 직선안내면의 제원을 나타낸 것이며, 그림 10 은 실험장치의 전경을 나타낸 것이다.

직선안내면은 AC 서보모터와 볼스크류에 의해 구동되며, 볼스크류는 피치 5mm 의 C0 급으로 양단은 고정-고정 방식으로 지지되어 있다. 직선베어링은 SSR 모델(THK)의 UP 급을 사용하였고, 직선안내면은 레일당 2 개의 베어링으로 구성되어 있다. 수정가공은 조립기준면에 대한 가공이 필요 없어 수정이 용이한 수평방향 운동오차를 대상으로 수행하였다. 수정방법으로는 먼저 레일에 체결된 볼트를 풀고, 레일의 수평방향 변위가 수정가공정보와 일치하도록 전기마이크로미터로 변위를 측정하면서 힘을 가한 후 레일을 다시 체결하였다. 한편, 이 때의 수정가공정보는 운동오차 측정값을 입력하여 추정된 레일형상오차가 0 에 근사하게 되는 위치와 수정량(오차량의 역값)을 기준으로

하는 것이 이상적이다. 그러나 실제의 경우에는, 레일의 탄성 때문에 레일전체를 수정가공 정보대로 변형시키는 것은 어려우므로, 가장 개선효과가 크다고 판단되는 한 곳만을 수정하는 방법으로, 운동오차의 측정 및 수정을 반복함으로써 운동오차를 개선되도록 하였다. 또한 직선안내면 레일의 볼트체결 간격보다 파장이 작은 공간주파수에 대한 수정은 실제적으로 불가능하므로, 볼트체결 간격보다 파장이 큰 저주파만을 수정대상으로 하였다. 이 과정에서의 수정에 따른 레일형상의 변화를 분석을 위해서는, 레일형상을 직접 측정하기는 어려우므로, 수정된 레일의 운동오차를 측정 한 후, 레일형상오차 추정 알고리즘을 이용하여 추정하고 수정하기 전의 형상오차와 간접적으로 비교하였다 여기서 새롭게 추정된 레일형상오차는 수정 전의 레일형상오차와의 비교뿐만 아니라, 다음 수정을 위한 수정가공 정보로도 활용된다.

5.2 수정가공 실험결과

그림 11 은 위의 실험방법을 이용하여 직선안내면의 운동정밀도를 향상시킨 결과를 보여주고 있다. 먼저, 처음조립 상태에서의 직선안내면의 운동오차는 직선운동오차 5.97 μm , 각운동오차는 32.78 arcsec 로 측정되었다. 이 측정값을 입력값으로 하여, 그림 12 의 실선과 같은 레일형상오차를 추정하였다. 여기서 추정된 레일형상은 단일 레일을 갖는 등가모델에 의해 얻어진 것이므로, 실제로는 기준면의 오차를 포함한 양 레일의 수평방향 형상오차의 합이 된다. 추정된 형상오차는 1 주기 성분이 지배적이므로 레일이 불과 직접 닿는 홈의 가공오차보다는 레일이 고정되는 기준면의 가공오차나 레일체결시의 설치오차가 지배적이라고 판단된다.

추정된 레일형상을 지배하는 1 주기성분의 가장 큰 진폭은 220mm 부근에서 발생하므로, 수정하고자 하는 한 쪽 레일의 이 위치를 40 μm 정도 변형시킨 후 운동오차를 측정하였으며, 그 결과 그림 11 과 같이 직선운동오차는 5.30 μm , 각운동오차는 23.84 arcsec 가 얻어졌다. 운동오차가 기대만큼 개선되지 않은 원인은, 그림 12 의 1 차 수정후의 레일 형상오차의 추정결과로부터도 알 수 있듯이, 변형시킨 레일을 제대로 고정시키지 않은 채로 체결하여, 볼트를 체결하는 순간 레일이 체자리로 대부분 복원되어 실제로는 거의 변형이 되지

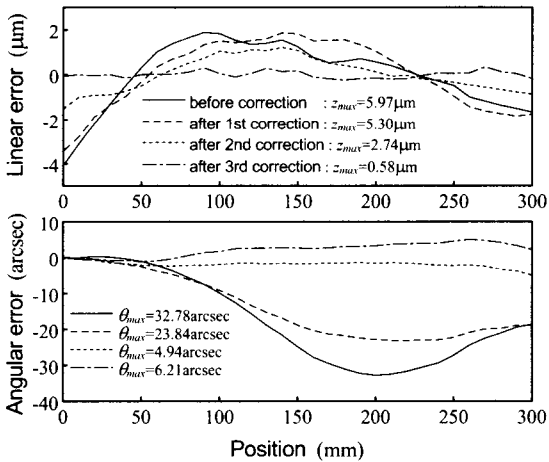


Fig. 11 Motion errors of LM table after iterative correction

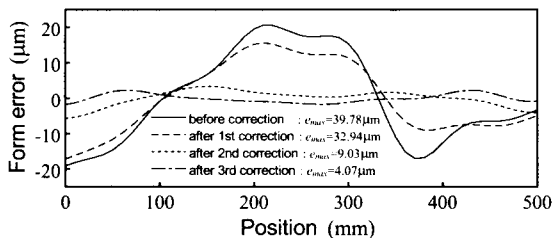


Fig. 12 Calculated form errors of rail after iterative correction

않았기 때문으로 판단된다.

이상의 경험을 바탕으로 2 차 수정이후에는 변형된 레일을 치구를 이용하여 고정시킨 후, 볼트를 체결하고 치구를 해체하는 방법을 사용하였다. 2 차 수정에서는 1 차 수정과 동일한 위치를 약 35 μm 변형시켰으며, 그 결과 직선운동오차는 2.74 μm , 각운동오차는 4.94 arcsec 가 얻어져, 상당히 개선되었음을 알 수 있다.

3 차 수정에서는 2 차수정결과 추정된 레일형상에서 가장 오차가 큰 140 mm 위치를 9 μm 변형시켰으며, 그 결과, 직선운동오차 0.58 μm , 각운동오차 6.21 arcsec 를 얻을 수 있었다. 3 차 수정결과를 2 차 수정결과와 비교하면, 직선운동오차는 크게 향상된 반면 각운동오차는 오히려 약간 증가하였다. 이것은 앞에서 설명했듯이 수정과정의 편의를 위해 한 곳만을 변형시켰기 때문에, 두 운동오차를 동시에 개선시키는 것보다는 추정된 레일의 가장 큰 진폭을 중점적으로 개선했기 때문으로 추정된다. 레일 전체를 대상으로 효과적인 수정을 가할 수 있는 치구를 개발하여 이용하거나, 베드면과 같은 기준면을 가공하는 방법으로 수정을 하는 경우에는 양 운동오차가 같이 개선될 수 있는 수정가공정보를 산출하고, 동시에 여러 곳을 수정가공함에 의해 보다 향상된 결과를 기대할 수 있을 것으로 추정된다.

한편, 본 실험은 항온환경을 갖추지 않은 곳에서 수행되었으므로, 측정장치로 사용된 레이저간섭계의 환경에 따른 측정오차를 고려할 때 이 이상의 운동오차 개선은 어렵다고 판단되어 4 차 수정은 시도하지 않았다.

이상의 3 회에 걸친 수정 후의 운동오차 측정결과를 수정 전의 운동오차와 비교하면, 3 회의 수정으로 직선운동오차는 10 배, 각운동오차는 5 배 이상 향상되었음을 알 수 있으며, 이로부터 본 논문에서 제안한 전달함수를 이용한 수정가공 알고리즘이 직선베어링 안내면의 운동오차 향상에 매우 유용함을 확인할 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 전달함수와 운동오차 측정치를 이용하여 직선안내면의 운동정밀도를 향상시킬 수 있는 수정가공 알고리즘을 제안하고 그에 따른 이론적 특성을 고찰하였으며, 실험장치에 알고리즘

을 적용하여 알고리즘의 유용성도 검토하였다.

이론적으로 수정가공 알고리즘에 의해 추정되는 레일형상오차는 계산에 고려하는 최고계산주기의 설정에 의해 다소 차이가 있으나, 어떤 경우에도 추정된 레일형상에 의한 운동오차는 등가이며, 실제로 레일면은 연삭가공되므로 고주파 성분이 거의 없음을 감안하면, 다소 차이가 있는 추정결과를 기준으로 수정가공을 수행해도 운동오차면에서는 기대만큼 개선된 결과를 얻을 수 있다. 실제로 300mm 의 이송거리를 갖는 직선안내면을 시험 제작하여 수정가공을 수행한 결과, 직선운동오차는 5.97 μm 에서 0.58 μm 로, 각운동오차는 32.78 arcsec 에서 6.21 arcsec 로 운동정밀도가 향상되어 본 논문에서 제시한 방법이 매우 유용함을 확인하였다.

후기

본 연구는 과학기술부에서 지원하는 “국가지정 연구실사업”의 “초정밀 위치결정기술개발” 과제로 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 김경호 외, “직선베어링 이송계의 운동정밀도 분석,” 한국정밀공학회 2000 년도 추계학술대회 논문집, p. 179, 2000.
2. 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, p. 1573, 1998.
3. 삼익공업주식회사, “삼익 LM 가이드의 특성과 사용방법,” LM SYSTEM 기술자료 9502.
4. 박천홍 외, “FEM 을 이용한 유정압 테이블의 운동정밀도 해석 (2. 양면지지형 테이블의 해석 및 실험적 검증),” 한국정밀공학회지, Vol. 19 No. 1, p. 65, 2002.