

## 유정압테이블의 정밀도향상을 위한 수정가공 알고리즘

박천홍\*, 이찬홍\*, 이후상\*

### Corrective Machining Algorithm for Improving the Motion Accuracy of Hydrostatic Table

Chun Hong Park\*, Chan Hong Lee\* and Husang Lee\*

#### ABSTRACT

For improving the motion accuracy of hydrostatic table, corrective machining algorithm is proposed in this paper. The algorithm consists of three main processes. Reverse analysis is performed firstly to estimate rail profile from measured linear and angular motion error, in the algorithm. For the next step, corrective machining information is decided as referring to the estimating rail profile. Finally, motion errors on correctively machined rail are analyzed by using motion error analysis method proposed in the previous paper. These processes can be iterated until the analyzed motion errors are satisfied with target accuracy. In order to verify the validity of the algorithm theoretically, motion errors by the estimated rail, after corrective machining, are compared with motion errors by true rail assumed as the measured value. Estimated motion errors show good agreement with assumed values, and it is confirmed that the algorithm is effective to acquire the corrective machining information to improve the accuracy of hydrostatic table.

**Key Words** : Hydrostatic table(유정압테이블), Corrective machining algorithm(수정가공알고리즘), Transfer function(전달함수), Motion error analysis(운동오차해석), Reverse analysis(역해석)

#### 1. 서론

저자들은 노-하우에 의존하는 초정밀 유정압테이블의 마무리가공공정을 이론적으로 체계화하기 위해, 레일의 형상오차와 유정압테이블의 설계치수를 이용하여 직선 및 각운동오차를 예측할 수 있는 알고리즘인 전달함수법을 제안하고, 이론, 실험적으로 그 타당성을 확인한 바 있다.<sup>1),2)</sup>

이 알고리즘을 이용하면, 예측된 운동오차가 목표정밀도를 만족하지 않는 경우에도, 레일에 대한 수정가공을 이론적으로 반복하는 것에 의해 정

밀도향상에 필요한 수정가공정보를 얻을 수 있다. 단, 이 경우에는 레일 형상오차의 측정을 반드시 필요로 하게 되므로, 레일형상의 측정이 어려운 경우에는 적용이 불가능하게 된다.

한편, 운동오차(직선 및 각운동오차)는 레일 형상오차, 테이블내 패드의 유막반력 및 각 패드간의 기하학적 관계에 의해 결정되는 테이블의 자세오차의 연속적인 상태변화를 나타내므로, 테이블과 레일간의 상대특성에 관한 정보가 포함되어 있다. 이 관계를 이용하여 운동오차로부터 레일 형상오차를 추정하면, 레일 형상오차에 관한 초기정

2001년 11월 30일 접수

\* 한국기계연구원 자동화연구부 공작기계그룹

보가 없어도 수정가공정보를 얻을 수 있다. 특히 양면지지형 테이블에 있어서는, 양쪽 레일이 대칭적이 되면 운동오차가 0 이 되는 특성을 이용하는 것에 의해, 양쪽 레일 형상에 대한 정보가 전혀 없어도 수정가공정보를 얻을 수 있다.

본 논문에서는, 일반적으로 복수의 패드로 구성된 유정압테이블에 있어서 각 패드의 형상은 동일하고, 그 동일 형상의 패드가 레일상의 같은 부분을 중첩하여 운동하는 과정에서 테이블의 운동오차가 결정되는 것에 착안하여, 테이블의 운동오차로부터 레일 형상오차를 추정하는 역해석법을 제안하였다. 또한 이 역해석법과 기계안한 운동오차해석 알고리즘<sup>1)</sup>을 조합하는 것에 의해, 운동오차 측정치만으로 수정가공정보를 산출해낼 수 있는 수정가공 알고리즘을 제안하였다. 형상오차를 미리 알고있는 레일(이하, 참 레일)의 운동오차를 운동오차 측정치로 가정하여 수정가공알고리즘을 적용하였으며, 얻어진 수정가공정보를 기준으로 레일 형상오차 추정치와 참 레일형상오차에 수정가공을 실시하는 경우의 양 레일에 의한 운동오차 해석결과를 비교하는 것에 의해 제안한 알고리즘의 타당성을 이론적으로 검증하였다.

## 2. 수정가공 알고리즘의 개요

그림 1 에 수정가공 알고리즘의 흐름도를 나타내었다.

먼저 역해석법을 이용하여 패드의 유막반력의 변화를 산출하고 레일의 형상오차를 추정하며, 레일 형상오차 추정치로부터 수정가공정보를 결정함으로써 수정된 레일형상 추정치를 산출한다. 운동오차 예측 알고리즘을 이용하여 수정된 레일형상에 의한 운동오차를 해석하고, 목표정밀도가 예측

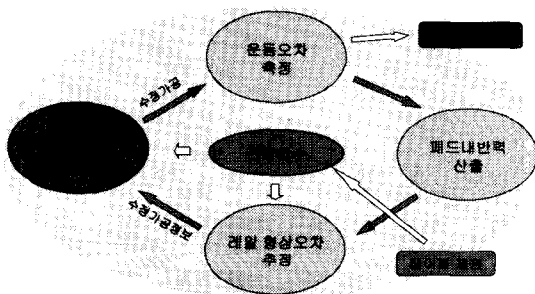


Fig. 1 Diagram of corrective remachining algorithm

될 경우 수정가공정보대로 가공을 수행한다. 실제에 있어서 수정가공정보 그대로의 가공은 어려우므로, 수정가공후 조립된 유정압테이블의 운동정밀도는 예측치와 차이가 있을 수 있다. 이 경우에는 목표정밀도를 만족할 때 까지 이 과정을 반복하게 된다.

## 3. 역해석법

운동오차 측정치로부터 레일 형상오차를 추정하는 과정은 운동오차해석의 경우와 역순서로 진행되므로 역해석법이라고 명명하였으며, 수정가공 알고리즘의 가장 핵심이 되는 알고리즘이다. 한편, 해석과정은 단면지지형 테이블을 중심으로 하고 있으며, 양면지지형 테이블의 경우에는 운동오차 해석의 경우와 마찬가지로, 양쪽 레일의 차를 단면지지형 테이블의 레일로 가상하는 것에 의해 동일하게 산출하게 된다.

### 3.1 유정압테이블의 모델링

그림 2 는 유정압테이블의 정적 평형상태를 모델링한 것으로, 패드의 수직방향변위 영역내에서 패드강성이 일정함을 가정하면 힘과 모멘트의 평형조건에 의해 식(1), (2)가 성립한다.

$$\sum_{i=1}^m \{f_{ei}(x) - K_0 z_i(x)\} = 0 \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^m \{f_{ei}(x) - K_0 z_i(x)\} \left( X_{ci} + \frac{ml}{2} \right) = 0 \quad (2)$$

$$x = \frac{ml}{2}, \dots, L - \frac{ml}{2}$$

여기서  $m$  은 테이블을 구성하는 패드의 수

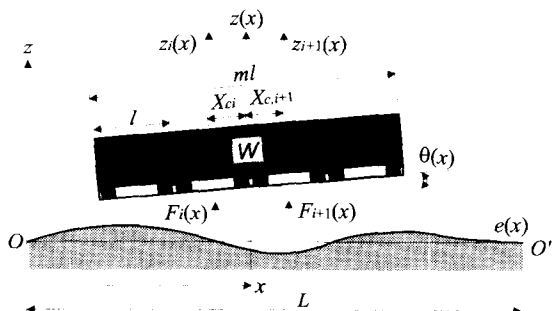


Fig. 2 Static equilibrium state of force in single side table

$X_{ci}$  는 테이블 중심으로부터 각 패드 중심까지의 거리,  $L$  은 레일 길이,  $l$  은 패드 길이,  $F_i(x), z_i(x)$  는 테이블 중심의 좌표가  $x$  일 경우의  $i$  번째 패드에서의 유막반력 및 수직방향 변위,  $\theta(x)$  는 테이블의 경사각을 각각 나타낸다. 또한  $f_{ei}(x)$  는 레일형상오차  $e(x)$  에 상응하여 추가로 발생한 유막반력의 변화분을,  $K_0$  는 패드의 유막강성을 나타낸다.

### 3.2 전달함수

레일 형상오차를 구성하는 각 공간주파수성분에 의한 패드내 유막반력의 변화를 전달함수로 정의하면 식(3)과 같이 나타낼 수 있다. 전달함수의 정의에 대한 타당성, 산출방법 및 특성에 대해서는 이미 제안한 운동오차해석법에 관한 논문<sup>1)</sup>에 설명되어 있으므로 자세한 설명은 생략한다.

$$K(\omega) = \frac{f_e(\omega)}{e(\omega)} \quad (3)$$

### 3.3 유막반력의 산출

식(1), (2)에 있어서 운동오차값이 기지이고 유막반력의 변화(이하, 유막반력)가 미지수인 경우  $m$  원연립방정식이 되므로, 패드수  $m$  이 3 개 이상이면 유막반력에 대한 정해를 얻을 수 없게 된다. 따라서, 패드수를 감소시키거나 방정식수를 증가시키기위한 새로운 관계의 설정이 필요하다. 이를 위해 그림 3 에 테이블의 위치와 유막반력의

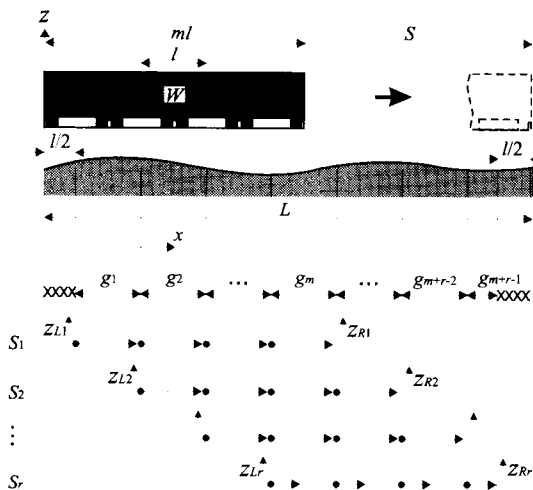


Fig. 3 Relationship between film force and rail profile

관계를 도식화하여 나타내었다. 레일위치를 기준으로 하여 유막반력을 생각하면, 테이블이 이동됨에 따라 형상이 동일하고 기하학적인 관계(즉 패드의 순서)만 다른 패드가 동일한 레일위치에 중첩하여 위치하게 된다. 이러한 중첩관계를 이용하면 유막반력에 대한 미지수를 감소시킬 수 있다.

그림에서 테이블이 한 패드의 길이만큼 이동한 경우를 1 개의 구간으로 정의하여 총 이동량  $S$  를 구간  $S_1, S_2, \dots, S_r$  로 세분하면, 각 구간에 있어서는 유막반력  $f_{ei}(x)$  가  $m$  개 존재하므로 총 구간에서 유막반력은  $m \times r$  개가 된다. 단, 각 구간의 분리점은 패드의 중심점을 기준으로 한다. 한편, 레일을 각 구간에 대응시켜 패드길이를 세분하고, 레일상의 위치를 기준으로한 유막반력을  $g_k(x)$  라고 하면, 전 구간에 대한 유막반력은  $k = m + r - 1$  개로 감소하게 되며, 각 구간에 있어서는 유막반력  $f_{ei}(x)$  와는 식(4)의 관계를 갖는다.

$$f_{ei}(x) = g_k(x + X_{ci}) \quad (4)$$

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

식(4)를 식(1), (2)에 대입하고 정리하면, 구간  $S_1, S_2$  에 있어서 유막반력과 운동오차의 관계를 식(5)와 같이 얻을 수 있으며, 여기서  $z_{Lj}(x), z_{Rj}(x)$  는 구간  $j$  에서의 직선 및 각운동오차를 테이블 좌, 우 끝단의 수직방향 변위량으로 환산한 값이다.

$$[u] \{g_{S1}\} = K_0 m(m-1) \begin{Bmatrix} z_{L1}(x) \\ z_{R1}(x) \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$[u] \{g_{S2}\} = K_0 m(m-1) \begin{Bmatrix} z_{L2}(x) \\ z_{R2}(x) \end{Bmatrix}$$

$$[u] = \begin{bmatrix} u_{11} & \dots & u_{1m} \\ u_{21} & \dots & u_{2m} \end{bmatrix}, \quad u_{1i} = 4m^2 + 3m - 1 - 6mi$$

$$u_{2i} = 6mi - 2m^2 - 3m - 1$$

$$\{g_{S1}\}^T = \{g_1(x), \dots, g_m(x)\}, \quad \{g_{S2}\}^T = \{g_2(x), \dots, g_{m+1}(x)\}$$

식(5)의 두 행렬식을 합성하면 식(6)와 같이 되며, 두 식을 비교하면 방정식의 수는 2 개가 증가했지만 유막반력의 수는 1 개만이 증가하게 된다.

$$[u_{S12}] \{g_{S12}\} = K_0 m(m-1) \{z_{S12}\} \quad (6)$$

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

$$\{g_{S12}\}^T = \{g_1(x), \dots, g_{m+1}(x)\},$$

$$\{z_{S12}\}^T = \{z_{L1}(x), z_{R1}(x), z_{L2}(x), z_{R2}(x)\}$$

이 관계를 구간  $S_r$  까지 확장하면, 전 구간에 대한 행렬식은 식(7)과 같이 된다.

$$[U][G] = K_0 m(m^2 - 1) \{Z\} \quad (7)$$

$$[U] = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1m} & 0 & \cdots & 0 \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2m} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & u_{11} & \cdots & u_{1,m-1} & u_{1m} & \cdots & 0 \\ 0 & u_{21} & \cdots & u_{2,m-1} & u_{2m} & \cdots & 0 \\ \vdots & & & \vdots & & & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & u_{1,m-r+1} & u_{1,m-r+2} & \cdots & u_{1m} \\ 0 & \cdots & \cdots & u_{2,m-r+1} & u_{2,m-r+2} & \cdots & u_{2m} \end{bmatrix}$$

$$\{G\}^T = \{g_1(x), \cdots, g_m(x), \cdots, g_{m+r-1}(x)\}$$

$$\{Z\}^T = \{z_{L1}(x), z_{R1}(x), z_{L2}(x), z_{R2}(x), \cdots, z_{Lr}(x), z_{Rr}(x)\}$$

여기서 행렬  $[U]$ 는  $2r \times (m+r-1)$ 의 크기를 갖으므로,  $r = m-1$ 의 경우 정방행렬이 된다. 따라서 테이블의 이동량이  $(m-1)l$ , 즉 테이블길이에서 한 패드의 길이를 뺀 길이만큼 되면 운동오차 측정치로부터 유막반력을 얻을 수 있다. 이동량이 이 보다 클 경우에는 한 구간씩 이동시켜가면서 미지수인 유막반력을 구하면 된다.

이상으로부터 구한 레일기준 유막반력  $g_k(x)$ 는, 식(8)과 같이 한 개의 패드가 연속적으로 레일상을 이동할 때의 유막반력  $f_e(x)$ 로 변환할 수 있다.

$$f_e(x) = g_k(x), \quad \left\{ \frac{1}{2} + (k-1)l \leq x < \left\{ \frac{1}{2} + k \right\} l \right. \quad (8)$$

$$k = 1, \cdots, m+r-1$$

이상에서 계산된 유막반력은 각 구간마다 1개의 운동오차 측정데이터에 대응하는 것이므로 각 구간, 즉 한 패드분에 해당하는 운동오차 측정개수만큼 반복계산하면 전 측정데이터에 대응하는 유막반력을 구할 수 있다.

### 3.4 레일 형상오차의 추정

산출된 유막반력과 식(3)의 전달함수를 이용하면 레일 형상오차를 구성하는 각 공간주파수성분의 크기를 구할 수 있으므로 레일의 형상오차를 계산할 수 있다. 그러나 실제 테이블의 운동을 고려하면(그림 3 참조), 테이블의 이동거리는 테이블의 좌, 우단이 레일의 좌, 우단과 일치할 때 까지가 한계이므로, 테이블이 레일 좌, 우단의 반개의 패드길이만큼 이동할 경우의 정보를 얻을 수 없다.

따라서 본 논문에서는 유막반력의 산출이 가

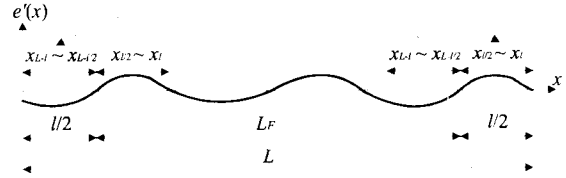


Fig. 4 Estimated periodic profile of rail

능한 레일 범위를 유효레일길이  $L_f$ 로 정의하고, 이 유효길이내에서 유막반력은 주기적임을 가정하여 레일 형상오차를 추정한다. 이에 따라 레일 양단의 반 패드분에 대한 레일형상은 그림 4와 같이 얻어지게 되어 참 레일형상을 얻는 것은 불가능하게 된다. 그러나 운동오차면에서 보면, 계산되어진 유막반력에는 이미 운동오차정보가 모두 포함되어 있다. 따라서 레일 양단의 반 패드분을 임의로 가정하여 레일 형상오차를 계산해도, 그 레일로부터 얻어지는 운동오차는 참 레일형상에 의해 얻어지는 운동오차와 같게 된다. 결과적으로, 역해석법에 의해 얻어지는 레일형상정보는 참 레일형상과는 다르지만, 수정가공을 통해 운동오차를 감소시키기에는 충분한 정보가 된다.

유효레일길이와 같은 파장을 갖는 공간주파수를  $\omega_f$ 로 정의하면, 유효 레일길이범위에서 레일 형상오차를 구성하는 공간주파수성분의 크기는 전달함수로부터 식(9)와 같이 얻을 수 있으며, 레일 형상오차 추정치는 식(10)과 같이 된다.

$$e(\omega_f) = f_e(\omega_f) / K(\omega_f) \quad (9)$$

$$e'(x) = \sum_{k=1}^{p/2} \left\{ a_k \cos \frac{2k\pi}{L_f} \left( x - \frac{l}{2} \right) + b_k \sin \frac{2k\pi}{L_f} \left( x - \frac{l}{2} \right) \right\} + \frac{a_0}{2}, \quad x = 0, \cdots, L \quad (10)$$

식(9)에 있어, 운동오차에 영향을 거의 주지않는 공간주파수성분인 둔감주파수와 고주파성분의 경우에는 전달함수가 0에 근사하게 되므로<sup>1)</sup>, 그 주파수의 레일 형상오차는 계산과정에서의 라운드 오프오차에 의해 과대평가된다.

한편, 일반적으로 유정압테이블용 레일은 연삭가공되므로 상대적으로 고주파의 형상오차는 매우 작으며, 그 형상오차가 운동오차에 미치는 영향도 매우 작다. 또한 고주파의 형상오차 및 둔감주파수가 수정가공에 미치는 영향을 고려하면, 그 주파수들을 무시하고 얻은 형상오차 추정치를 기준

으로 수정가공을 해도, 결과적으로 얻어지는 운동 오차는 고주파성분과 둔감주파수성분에 의한 영향 만큼만 달라진다. 따라서, 레일 형상오차에 있어 둔감주파수 및 고주파성분이 다른 주파수성분에 비해 월등히 크지 않는 한, 그 주파수성분들을 무시하고 수정가공을 수행해도, 운동오차면에서는 충분히 근사한 값을 얻을 수 있다.

이상으로부터, 본 해석법에서는 미리 컷오프치를 설정하고, 전달함수의 절대값이 이보다 작은 공간주파수에 대해서는 레일 형상오차의 크기가 0 임을 가정하고 레일 형상오차를 추정하였다.

#### 4. 수정가공정보의 산출

전절에서 계산된 레일 형상오차를 가공가능한 형상으로 수정해가면서 운동오차 예측을 반복하여, 목표정밀도를 만족하는 운동정밀도가 얻어질 때의 레일형상 추정치에서 최초 입력한 레일형상 추정치를 빼면 수정가공정보를 얻을 수 있다.

한편, 양면지지형 테이블의 경우에는, 임의의 한쪽 레일을 기준으로 하여 다른 쪽 레일의 형상을 뺀 양쪽 레일의 차를 대상으로 하므로, 산출된 수정가공정보대로, 기준으로 설정한 레일만을 가공하면 된다. 따라서 운동오차가 0 에 근사하게 되면 양쪽 레일은 서로 대칭에 가까운 형상이 된다.

#### 5. 수정가공 알고리즘의 이론적 검증

##### 5.1 검증방법과 그를 위한 변수의 설정

알고리즘의 이론적 검증을 위해서, 먼저, 레일 형상오차  $e(x)$  를 가정하고, 운동오차해석법을 이용하여 유막반력의 변화  $f_e(x)$ , 직선운동오차  $z(x)$  및 각운동오차  $\theta(x)$  를 구하였다. 이 운동오

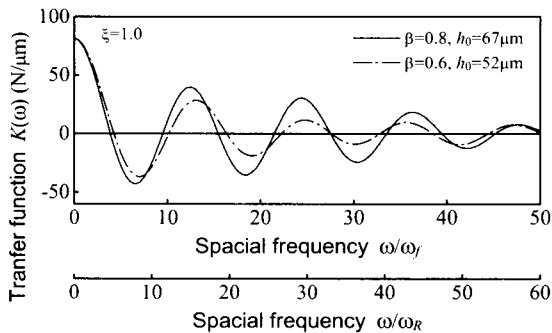


Fig. 5 Transfer function of assumed feed table

차를 운동오차 측정치로 가정하고 역해석법을 적용하여 유막반력  $f_e'(x)$  와 레일 형상오차 추정치  $e'(x)$  를 산출하였으며, 이를 초기의 가정값들과 비교하여 역해석에 따른 특성을 검토하였다. 또한  $e'(x)$  에 운동오차해석법을 적용하여 형상오차 추정치에 의한 운동오차  $z'(x)$  와  $\theta'(x)$  를 구하고, 이 값을 가정한 운동오차 측정치와 비교하여 역해석법의 타당성을 이론적으로 검증하였다.

수정가공에 있어서는, 먼저 산출된 수정가공정보를, 레일 형상오차 가정치(이하, 참 형상오차)  $e(x)$  와 형상오차 추정치  $e'(x)$  에 각각 적용하여 수정가공후 레일형상  $e_c(x)$ ,  $e_c'(x)$  를 구한다. 다음으로, 이 레일형상들에 대한 운동오차를 이론적으로 해석한 결과인  $z_c(x)$ ,  $\theta_c(x)$  와  $z_c'(x)$ ,  $\theta_c'(x)$  를 비교함으로써 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

이론적 검증을 위해 설정한 레일과 테이블의 제원을 표 1 에 나타내었다.

Table 1 Parameters value used in analysis

Rail length	$L$	600 mm
Number of pad	$m$	3
Table length	$ml$	300 mm
Table width	$l_y$	100 mm
Bearing clearance	$h_0$	52, 67 $\mu\text{m}$
Pocket width ratio	$\beta$	0.6, 0.8
Weight applied to table	$W$	300 N
Feeding parameter	$\xi$	1.0

그림 5 는 설정한 패드형상에 대한 전달함수를 구한 것이다. 전달함수는 레일 유효길이 기준주파수  $\omega_f$  및 레일 전체길이 기준주파수  $\omega_R$  로 환산하여 나타내었으며, 그림으로부터 포켓비  $\beta=0.8$  의 경우  $\omega/\omega_f=4, 10, 16, 22$  주기 등의 성분에 대한 전달함수의 크기가 0 에 근사하여, 그에 해당하는 주파수가 둔감주파수가 된다. 레일 형상은 그림 6 과 같이 레일 A, B 의 두 가지 형상을 가정하였다. 레일 A 는 1 주기성분만으로 구성된 형상이며, 레일 B 는 30 주기성분까지를 포함하고 있는 형상으로 각 공간주파수의 크기를 그림 7 에 나타내었다. 레일 B 의 경우 일반적인 고정밀 유정압 테이블에 대한 적용 가능성을 검토할 수 있도록 형상오차를 작게 설정하였다.

한편, 표 1 의 테이블이 그림 6 의 레일 A, B 상

에서 운동할 때의 운동오차를 계산하여 역해석의 입력값인 운동오차 측정치로 가정하였으며, 그림 12 와 그림 14 에서 추정 형상오차와 비교시에 나타내었다.

**5.2 유막반력 계산결과의 검토**

그림 8 은 두 레일에 있어서 가정한 운동오차에 역해석법을 적용하여 구한 유막반력  $f_e'(x)$  를, 운동오차해석으로부터 얻은 유막반력  $f_e(x)$  와 비교한 것이다. 유막반력의 경우, 식(7)에 의해 정해가 얻어지므로, 레일 A, B 의 어느 경우에도 양쪽 계산결과는 정확히 일치하고 있다.

**5.3 레일 형상오차 추정결과의 검토**

레일 A 에 대한 형상오차 추정결과를 그림 9 에 나타내었다. 여기에서  $n_f$  는 계산시 고려한 최고의 주기를 나타내며, 이후 이론적 검증에 있어서 공간주파수의 주기는 레일 유효길이에 대한 공간주파수  $\omega_f$  를 기준으로 나타낸다.

그림으로부터,  $n_f = 30$  주기까지를 고려하면, 형상오차 추정치는 1 주기성분위에 4 주기성분이 실린 파형이 된다. 이러한 현상은  $n_f = 4$  주기에서도 동일하게 나타난다. 이것은 둔감주파수인 4 주기성분에 있어 추정 형상오차가 확대되기 때문이

다(그림 5 참조). 이 추정결과를 기준으로 수정가공을 수행해도 둔감주파수에 의한 오차는 작으므로 운동오차는 개선될 수 있으나, 수정가공량이 과다하게 될 우려가 있다.

다음으로  $n_f = 3$  으로 설정한 경우를 보면, 추정된 형상오차는 참 형상오차와 유효길이 범위에 잘 일치한다. 따라서 가장 저주파의 둔감주파수보다 높은 주파수를 모두 무시하면 참 형상오차에 근사한 레일 형상을 추정할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 이렇게 하면 고려해야할 주파수성분까지 무시할 우려가 있다.

이러한 단점을 보완하기 위해, 둔감주파수의 전달함수 가운데 가장 크기가 큰 값을 컷오프치로 설정하여, 그보다 작은 둔감주파수와 고주파성분을 무시하고 계산한 결과를 그림 10 에 나타내었다.  $n_f = 30$  까지를 고려했지만 그림 9 에 비해 참 형상오차와 잘 일치함을 보이고 있다.

그림 11 은 참 형상오차와 추정 형상오차를 이용하여 운동오차를 해석한 결과를 비교한 것으로 잘 일치함을 보이고 있으며, 두 결과간의 미소한 차는, 위에서 설명했듯이, 무시한 주파수성분들에

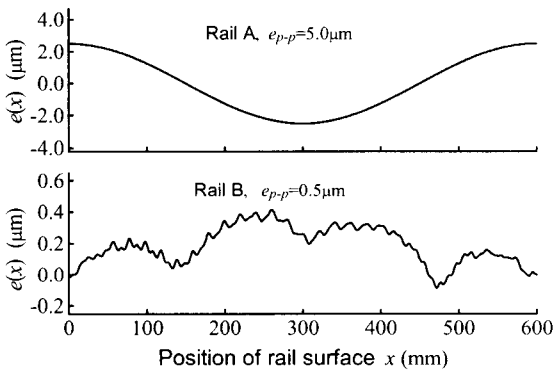


Fig. 6 Assumed rail profiles for simulation

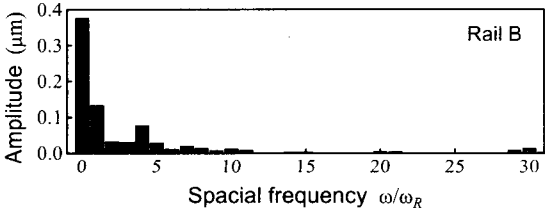


Fig. 7 Frequency components of rail B

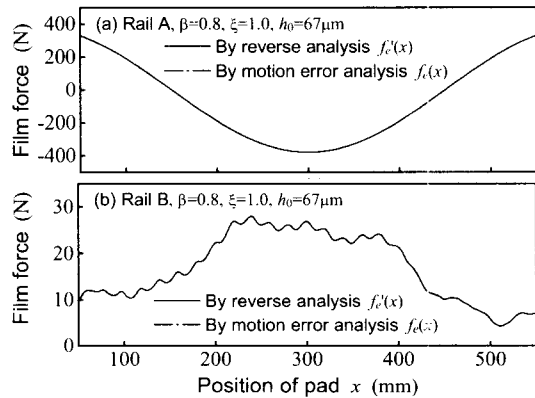


Fig. 8 Comparison of calculated forces exerted by rail form errors

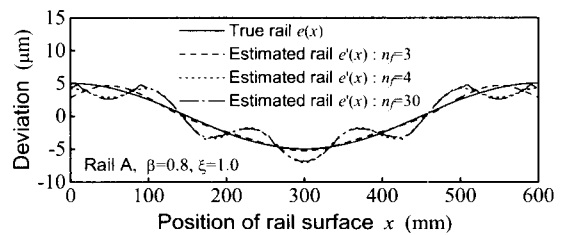


Fig. 9 Relationship between cut-off frequency and estimated rail

의한 레일형상의 차이에 의한 것이다. 또한 레일 형상오차의 추정을 위해 레일 양단 반 패드분을 임의로 가정했지만 그에 의한 운동오차 파형의 차이는 없음을 확인할 수 있다.

그림 12 는 레일 B 에 대한 레일 형상오차를 추정하여 참 형상오차와 비교한 것으로, 무시한 주파수성분의 영향으로 정확히 일치하지는 않으나 유효레일길이 범위에서 매우 근사하게 추정됨을 보이고 있다. 그림 13 은 두 형상오차에 대한 운동오차를 계산한 결과를 나타낸 것으로, 레일 형상은 다소 차이가 있으나, 그에 의한 운동오차는 거의 일치함을 보이고 있다.

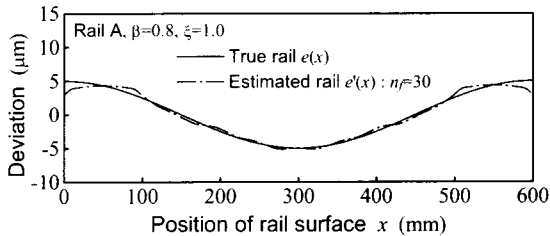


Fig. 10 Estimated profile by disregarding insensitive frequencies and high frequencies

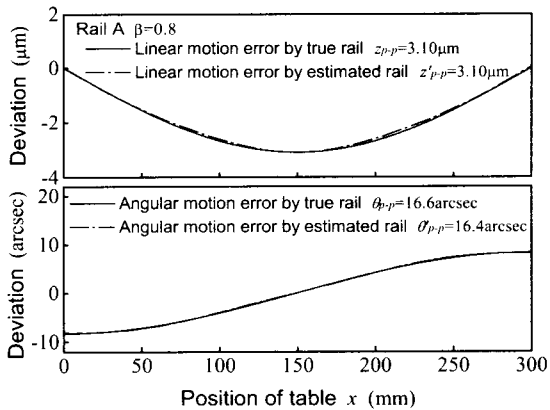


Fig. 11 Comparison of motion error by estimated rail with motion error by true rail in rail A

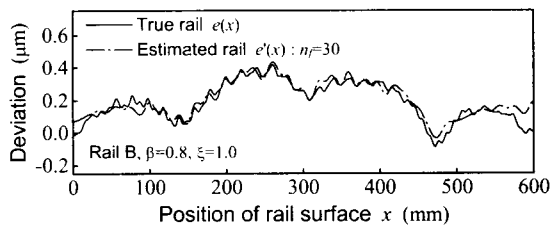


Fig. 12 Comparison of estimated rail with true rail in rail B

### 5.4 수정가공결과의 검토

그림 14 는, 수정가공의 수단으로 래핑작업을 수행하는 것을 전제로 하여, 레일 B 에 대해 추정된 레일 형상오차가 0 이 되도록 수정가공정보를 결정하고 래핑했을 경우(이론적으로 수정가공정보를 뺀 경우)의 참 형상오차의 변화와 그에 따른 운동오차를 구한 결과를 나타낸 것이다.

그림 14(a)는 참 형상오차의 변화를 나타낸 것으로, 당연히 추정 형상오차와 참 형상오차의 차

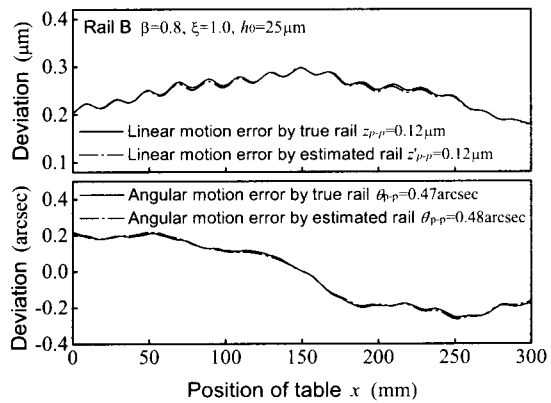


Fig. 13 Comparison of motion error by estimated rail with motion error by true rail in rail B

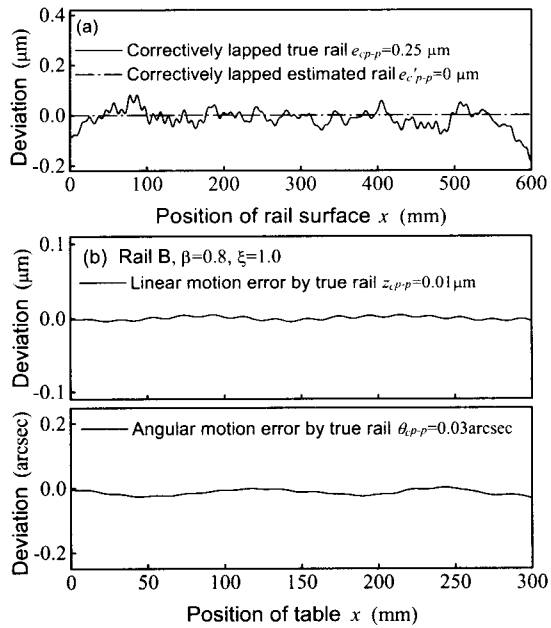


Fig. 14 Variation of rail profile and motion errors after completely removing estimated profile

가 수정가공후의 형상오차로 존재하게 된다. 그림 14(b)는 수정가공후의 참 형상오차에 의한 운동오차 계산결과로, 추정된 형상오차가 참 형상오차가 일치할 경우에는 0 이 되어야 하지만, 무시한 주파수성분들의 영향으로 다소 운동오차가 남는 결과를 보이고 있다. 그러나, 그 값은 충분히 미소하며, 수정가공전의 운동오차에 비해 직선, 각운동오차 모두 1/10 이상으로 향상되는 결과를 보이고 있다.

그림 15는 레일 B를 대상으로, 추정된 형상오차로부터 일부분만 가공하도록 수정가공정보를 결정했을 경우(그림 15(a)), 수정가공된 양 레일에 의한 운동오차해석결과를 비교한 것이다(그림 15(b)). 직선, 각운동오차 모두 미소한 차이는 보이고 있으나 실용적인 면에서는 충분히 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

이상의 이론적 검증 결과로부터, 제안한 수정가공 알고리즘은 유정압테이블의 운동정밀도 향상에 충분히 유효한 수단으로 사용될 수 있음을 확인하였다.

### 6. 결론

본 논문에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과

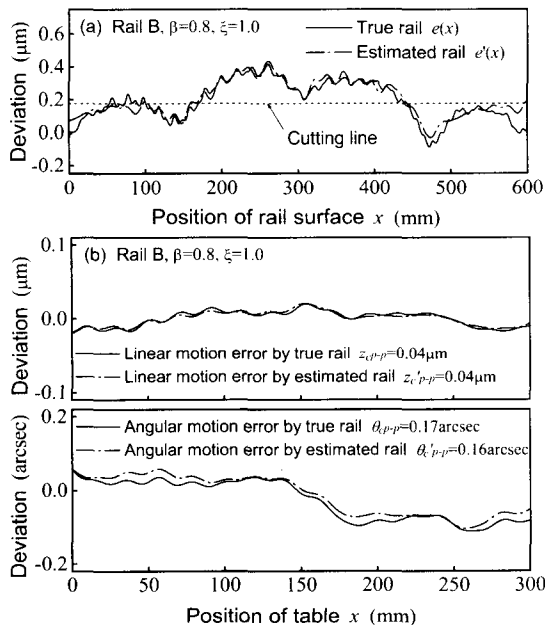


Fig. 15 Variation of motion errors after partly removing estimated profile

같다.

- 1) 운동오차 측정치를 이용하여, 3 개이상의 멀티패드를 갖는 테이블에 대해서도 유막반력의 변화를 산출할 수 있는 모델링기법을 제안하였으며, 계산결과의 검토로부터 유막반력의 정해가 얻어짐을 확인하였다.
- 2) 유막반력 계산결과로부터 레일 형상오차를 추정하는 경우, 둔감주파수성분 및 고주파성분을 무시함에 따라 참 레일의 형상오차와는 다소 차이가 있는 결과를 나타내지만, 양 레일에 의한 운동오차는 잘 일치하는 결과를 보여 수정가공을 위한 역해석법의 유효성을 확인할 수 있었다.
- 3) 추정된 형상오차의 일부를 수정가공량으로 결정하고 수정가공을 실시해도, 그에 따른 운동오차는 예측한 운동오차와 잘 일치하는 결과를 나타내었으며, 이에 따라 목표정밀도에 맞추어 수정가공정보를 결정하는 것이 충분히 가능함을 확인하였다.

이상으로 수정가공알고리즘의 타당성을 이론적으로 검증하였으며, 본 알고리즘을 실제 가공에 적용했을 때에 발생하는 문제점 및 그에 대한 대책을 포함한 실험적 검증 연구도 계속해서 수행할 예정이다.

### 후 기

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

### 참고문헌

1. 박천홍, 오윤진, 이찬홍, 홍준희, “전달함수를 이용한 유정압테이블 운동정밀도 해석법의 제안 및 이론적 검증,” 한국정밀공학회지, 제 19 권, 제 5 호, pp. 56-63, 2002.
2. 오윤진, 박천홍, 이찬홍, 홍준희, “전달함수를 이용한 유정압테이블 운동정밀도 해석법의 실험적 검증,” 한국정밀공학회지, 제 19 권, 제 5 호, pp. 64-71, 2002.
3. 兒玉愼三, 須田信英, “制御理論,” 日本計測自動制御學會, 1981.