

유정압테이블의 정밀도향상을 위한 수정가공 알고리즘

박천홍*, 이찬홍, 이후상(한국기계연구원 공작기계그룹)

Corrective machining Algorithm for Improving the Motion Accuracy of Hydrostatic Table

Chun Hong Park, Chan Hong Lee, Husang Lee(Machine Tools Group, KIMM)

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 if the analyzed motion errors are worse than 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

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 기제안한 운동오차해석 알고리즘^{1,2)}을 조합하는 것에 의해, 운동오차 측정치만으로 수정가공정보를 산출해낼 수 있는 수정가공 알고리즘을 제안하였다. 형상오차를 미리 알고 있는 레일(이하 참 레일)의 운동오차를 운동오차측정치로 가정하여 수정가공 알고리즘을 적용하고, 얻어진 수정가공정보를 기준으로 추정 레일과 참 레일에 수정가공을 실시할 경우의 양 레일에 의한 운동오차해석 결과를 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. 이 레일에 운동오차 해석법을 적용하여 운동오차를 구하고, 목표정밀도를 만족할 경우 수정가공을 수행한다. 실제에 있어서 수정가공정보 그대로의 가공은 어려우므로, 수정가공후 조립된 유정압테이블의 운동정밀도는 예측치와 차이가 있을 수 있다. 이

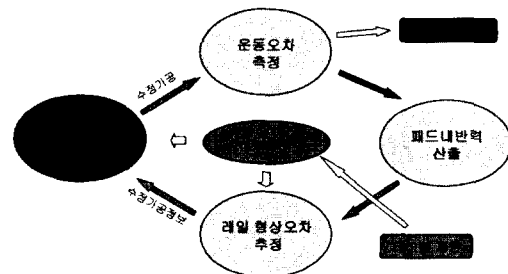


Fig. 1 Diagram of corrective remachining algorithm

경우에는 목표정밀도를 만족할 때 까지 이 과정을 반복하게 된다.

3. 역해석법

3.1 유정압테이블의 모델링

그림 2 는 해석을 위해 유정압테이블의 정적 평형상태를 모델링한 것으로, 운동오차해석의 경우와 동일하다. 여기서 각 패드내 유막반력의 변화와 패드의 수직방향변위를 선형적으로 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 테이블내 패드수, X_{ci} 는 테이블 중심에서 각 패드중심까지의 거리, L 은 레일 길이, l 은 패드 길이, $F_i(x), z_i(x)$ 는 테이블 중심좌표가 x 일 경우의 i 번째 패드의 유막반력 및 수직방향 변위, $\theta(x)$ 는 테이블 경사각, $f_{ei}(x)$ 는 레일형상오차 $e(x)$ 에 의한 유막반력의 변화분, K_0 는 패드의 유막강성을 나타낸다.

3.2 유막반력의 산출

식(1), (2)는, 운동오차값이 기지이고 유막반력이 미지수인 경우 m 원연립방정식이 되므로 패드수 m 이 3 개이상이면 유막반력에 대한 정해를 얻을 수 없게 된다.

한편, 그림 3 과 같이 테이블 위치와 유막반력변화(이하, 유막반력)의 관계를 도식화하면, 각 패드형상이 동일할 경우, 각 패드는 운동시에 기하학적인 관계만 달리하며 동일 레일상에 중첩하여 위치한다. 이러한 중첩관계를 이용하면 유막반력에 대한 미지수를 감소시킬 수 있다.

그림에서 테이블이 한 패드의 길이만큼 이동한

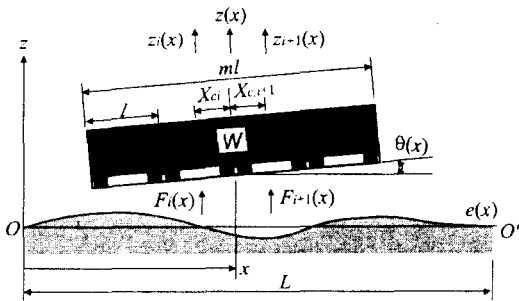


Fig. 2 Static equilibrium state of force in single side table

경우를 1 개의 구간으로 정의하여 총이동량 S 를 구간 S_1, S_2, \dots, S_r 로 세분하고, 레일상의 위치를 기준으로한 유막반력을 $g_k(x)$ 라고 하면, 식(3)의 관계를 식(1), (2)에 적용함으로써 유막반력과 운동오차의 관계를 식(4)과 같이 얻을 수 있다. 여기서 $z_{Lj}(x), z_{Rj}(x)$ 는 구간 j 에서의 직선 및 각운동오차를 테이블 좌, 우 끝단의 수직방향 변위량으로 환산한 값이다.

$$f_c(x) = g_k(x), \quad \left\{ \frac{1}{2} + (k-1)l \right\} \leq x < \left\{ \frac{1}{2} + k \right\} l \quad (3)$$

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

$$[U] \{G\} = K_0 m(m^2 - 1) \{Z\} \quad (4)$$

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

$$u_{1i} = 4m^2 + 3m - 1 - 6mi$$

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

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

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

여기서 행렬 $[U]$ 는 $2r \times (m+r-1)$ 의 크기를 갖으므로, $r = m-1$ 의 경우 정방행렬이 된다. 따라서 테이블의 이동량이 $(m-1)l$ 이상이면 운동오차 측정치로부터 유막반력을 얻을 수 있다.

3.3 레일 형상오차의 추정

산출된 유막반력과 전달함수¹⁾를 이용하면 레일 형상오차를 구성하는 각 공간주파수성분의 크기를 구할 수 있으므로 레일의 형상오차를 계산할 수 있

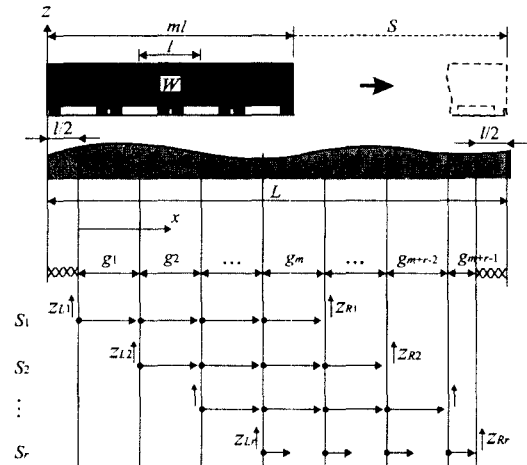


Fig. 3 Relationship between film force and rail profile

다. 그러나 실제 테이블의 운동거리는, 그림 3에 나타냈듯이, 항상 테이블의 좌, 우단이 레일의 좌, 우단과 일치할 때 까지가 한계이므로, 테이블이 레일 좌, 우단의 반개의 패드길이만큼 이동할 경우의 정보를 얻을 수 없다.

본 논문에서는 유막반력의 산출이 가능한 레일 범위를 유효레일길이 L_f 로 정의하고, 이 유효길이 내에서 유막반력은 주기적임을 가정하여 레일 형상 오차를 추정한다. 이에 따라 레일 양단의 반 패드 분에 대한 레일형상은 그림 4와 같이 얻어지게 되어 참 레일형상을 얻는 것은 불가능하게 된다. 그러나 계산되어진 유막반력에는 이미 운동오차정보가 모두 포함되어 있으므로, 레일 양단의 반 패드 분을 임의로 가정하여 레일 형상오차를 계산해도, 그 레일로부터 얻어지는 운동오차는 참 레일형상에 의해 얻어지는 운동오차와 같게 된다. 유효레일길이와 같은 파장을 갖는 공간주파수를 ω_f 로 정의하면, 유효 레일길이범위에서 레일형상오차를 구성하는 공간주파수성분의 크기는 전달함수로부터 식(5)와 같이 얻을 수 있다.

$$e(\omega_f) = f_c(\omega_f) / K(\omega_f) \quad (5)$$

한편, 운동오차에 영향을 거의 주지않는 공간주파수성분인 둔감주파수와 고주파성분의 경우에는 전달함수가 0에 근사하게 되므로, 식(5)로부터 얻어지는 해당주파수의 레일 형상오차는 계산과정에서의 라운드오프오차에 의해 과대평가된다.

여기서 고주파의 형상오차 및 둔감주파수가 수정가공에 미치는 영향을 고려하면, 그 주파수성분들이 운동오차에 미치는 영향은 매우 작으므로, 그 주파수성분들을 무시하고 얻은 형상오차 추정치를 이용하여 수정가공을 수행해도, 충분히 향상된 정밀도를 얻을 수 있다고 기대된다. 따라서, 본 해석법에서는 미리 컷오프치를 설정하고, 전달함수의 절대값이 이보다 작은 공간주파수에 대해서는 레일 형상오차의 크기가 0임을 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 레일의 형상을 제한 양쪽 레일의 차를 대상으로 하므로, 산출된 수정가공정보대로, 기준으로 설정한 레일만을 가공하면

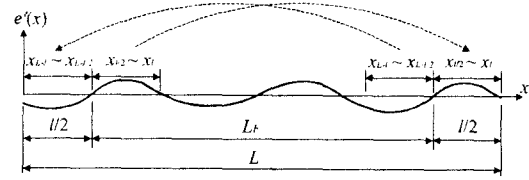


Fig. 4 Estimated periodic profile of rail

된다. 따라서 운동오차가 0에 근사하게 되면 양쪽 레일은 서로 대칭에 근사한 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 $f_c(x)$, 직선운동오차 $z(x)$ 및 각운동오차 $\theta(x)$ 를 구하였다. 이 운동오차를 운동오차 측정치로 가정하고 역해석법을 적용하여 유막반력 $f_c'(x)$ 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, 이값을 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 1에 나타내었다.

Table 1 Parameters value used in analysis

Parameter	Symbol	Value
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 μm
Pocket width ratio	β	0.6, 0.8
Weight applied to table	W	300 N
Feeding parameter	ξ	1.0

그림 5는 설정한 패드형상에 대한 전달함수를 구한 것이다. 전달함수는 레일 유효길이 기준주파수 ω_f 및 레일 전체길이 기준주파수 ω_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 같은 레일 형상을 가정하였다.

한편, 표 1 의 테이블이 그림 6 의 레일 A, B 상에서 운동할 때의 운동오차를 계산하여 역해석의 입력값인 운동오차 측정치로 가정하였다..

5.2 유막반력 계산결과와의 검토

그림 7 은 측정된 값으로 가정한 운동오차에 역해석법을 적용하여 구한 유막반력 $f_e'(x)$ 를, 운동오차해석으로부터 얻은 유막반력 $f_e(x)$ 와 비교한 것이다. 유막반력의 경우, 식(4)에 의해 정해가 얻어지므로, 양 계산결과는 정확히 일치하고 있다.

5.3 레일 형상오차 추정결과와의 검토

둔감주파수의 전달함수 가운데 가장 크기가 큰 값을 컷오프치로 설정하여, 그보다 작은 둔감주파수와 고주파성분을 무시하고 레일 형상오차를 추정한 결과를 그림 8 에 나타내었다. 무시한 주파수성분의 영향으로 정확히 일치하지는 않으나 유효레일 길이 범위에서 매우 근사하게 추정됨을 보이고 있다. 여기에서 n_f 는 계산시 고려한 최고의 주기를 나타내며, 이후 이론적 검증에 있어서 공간주파수의 주기는 레일 유효길이에 대한 공간주파수 ω_f 를 기준으로 나타낸다.

그림 9 는 두 형상오차에 대한 운동오차를 계산한 결과를 나타낸 것으로, 역시 레일 형상에는 다소 차이가 있으나, 그에 의한 운동오차는 거의 잘 일치함을 보이고 있다.

5.4 수정가공결과와의 검토

그림 10 은, 추정한 레일 형상오차가 0 이 되도록 수정가공정보를 결정하고 래핑했을 경우의 참 형상오차의 변화와 그에 따른 운동오차를 구한 결과를 나타낸 것이다. 그림 10(a)는 참 형상오차의 변화를 나타낸 것으로, 당연히 추정 형상오차와 참 형상오차의 차가 수정가공후의 형상오차로 존재하게 된다. 그림 10(b)는 수정가공후의 참 형상오차에 의한 운동오차 계산결과로, 추정한 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, 각 운동오차 모두 1/10 이상으로 향상되는 결과를 보이고 있다.

그림 11 은, 추정된 형상오차로부터 일부분만 가공하도록 수정가공정보를 결정했을 경우(그림 11(a)), 수정가공된 양 레일에 의한 운동오차해석결

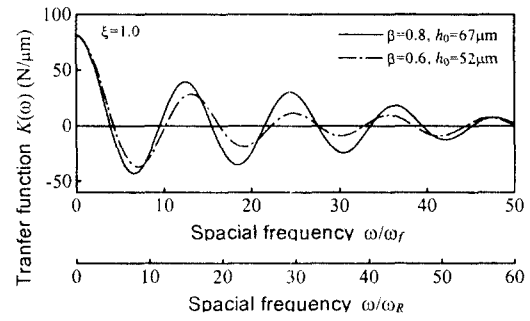


Fig. 5 Transfer function of assumed feed table

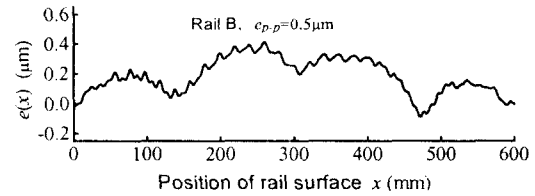


Fig. 6 Assumed rail profiles for simulation

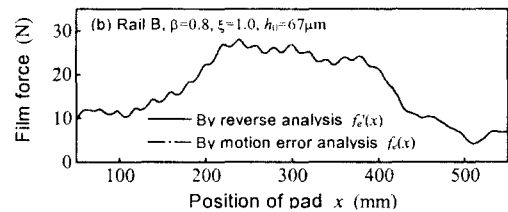


Fig. 7 Comparison of calculated forces exerted by rail form errors

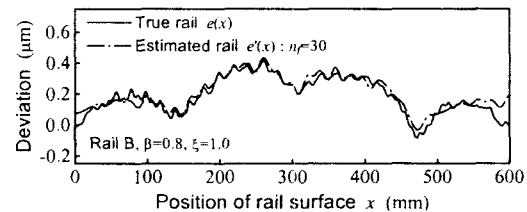


Fig. 8 Comparison of estimated rail with true rail in rail B

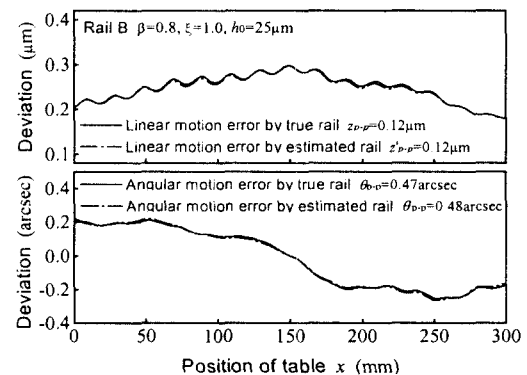


Fig. 9 Comparison of motion error by estimated rail with motion error by true rail

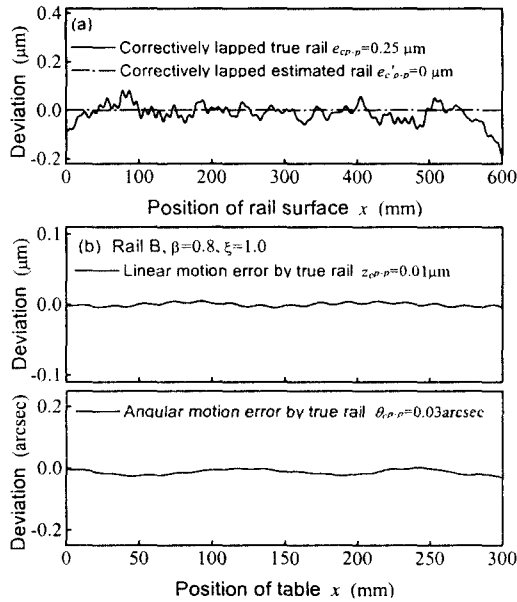


Fig. 10 Variation of rail profile and motion errors after completely removing estimated profile

과를 비교한 것이다(그림 11(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 논문에서는 레일 형상오차를 알지 못하는 경우에도, 운동오차 측정치로부터 레일의 형상오차를 추정하고 그를 토대로 수정가공정보를 산출할 수 있는 수정가공알고리즘을 제안하고 이론적으로 그 타당성을 검토하였다. 그로부터 얻어진 결과를 요약하면 다음과 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, 둔감주파수 성분 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 결정

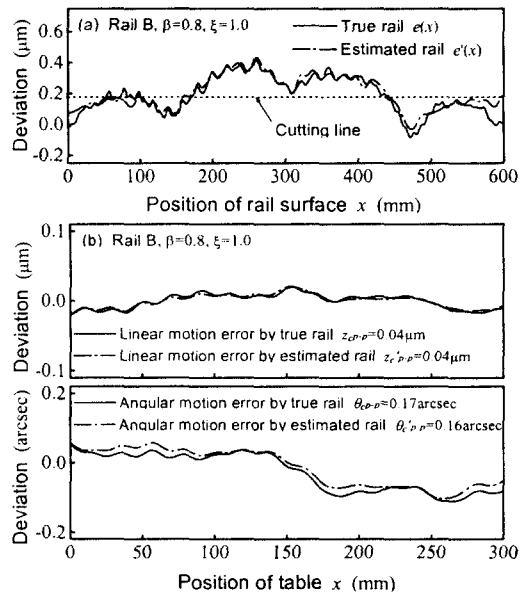


Fig. 11 Variation of motion errors after partly removing estimated profile

하고 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. 오윤진, 박천홍, 이후상, 홍준희, “전달함수를 이용한 유정압테이블 운동정밀도 해석법의 제안 및 이론적 검증,” 한국공작기계학회춘계학술대회논문집, pp9-14, 2001.
2. 박천홍, 이후상, 오윤진, 홍준희, “전달함수를 이용한 유정압테이블 운동정밀도 해석법의 실험적 검증,” 한국정밀공학학회춘계학술대회논문집, pp454-458, 2001.