

## 유정압테이블 수정가공 알고리즘의 실험적 검증

박천홍\*, 이찬홍, 이후상(한국기계연구원 공작기계그룹)

### Experimental Verification on Corrective machining Algorithm of Hydrostatic Table

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

#### ABSTRACT

Effectiveness of corrective machining algorithm is verified experimentally in this paper by performing corrective lapping work to single side and double sides hydrostatic tables. Lapping is applied as machining method. Machining information is calculated from measured motion errors by applying the algorithm, without information on rail profile. It is possible to acquire 0.13 $\mu$ m of linear motion error, 1.40arcsec of angular motion error in the case of single side table, and 0.07 $\mu$ m of linear motion error, 1.42arcsec of angular motion error in the case of double sides table. The experiment is performed by the unskilled person after he experienced a little of preliminary machining. Experimental results show that corrective machining algorithm is very effective, and anyone can improve the accuracy of hydrostatic table by using the algorithm.

**Key Words** : Hydrostatic table(유정압테이블), Corrective machining algorithm(수정가공알고리즘), Transfer function(전달함수), Experimental verification(실험적 검증)

#### 1. 서론

지자등은 테이블의 운동오차로부터 레일 형상오차를 추정하는 역해석법 및 레일 형상으로부터 운동오차를 해석하는 운동오차해석법<sup>1), 2)</sup>을 조합한 수정가공 알고리즘을 제안하였으며, 이론적으로 알고리즘의 유용성을 검증한 바 있다<sup>3)</sup>.

본 논문에서는 전편에서의 이론적 검토결과를 바탕으로, 실제의 유정압테이블을 대상으로 수정가공을 실시하여 알고리즘의 실용성을 실험적으로 검증하였다. 수정가공수단으로는 래핑가공을 사용하였으며, 전혀 래핑작업의 경험이 없는 초보자가 가공을 수행함으로써 실용화의 가능성을 검토하였다. 또한 단면지지형 테이블과 양면지지형 테이블의 두 경우에 대해 모두 실험을 수행하여 양면지지형에의 적용에 대한 타당성도 확인하였다.

#### 2. 실험장치 및 실험방법

##### 2.1 실험장치의 구성

실험 장치의 개략도를 그림 1에 나타내었다. 유정압 테이블의 수직 방향은 3개의 패드를 갖는 단면지지형 테이블로 되어 있으며, 수평방향(측면)은 역시 3개의 대향 패드를 갖는 양면지지형 테이블로 되어 있다. 표 1에 실험용 유정압테이블의 제원을 나타내었다. 운동오차는 레이저간섭계(HP5528A)로 측정하였다.

실험에 사용된 레일의 형상오차를 그림 2에 나타내었다. 그림 2(a)는 수직방향 레일의 형상오차이며, 그림 2(b)와 (c)는 수평방향 좌, 우 레일의 형상을 나타내고 있다. 수평방향의 실험에서는 그림 2(b)와 그림 2(c)의 차인 그림 2(d)의 형상오차에 대해 수정가공정보를 구하게 된다. 레일의 길이는

250mm이며, 레일 형상오차는 자체 개발한 측정장치(측정정밀도  $0.04\mu\text{m}$ )<sup>4)</sup>를 이용하여 측정하였다.

## 2.2 실험방법

레이저간섭계를 이용하여 측정된 직선 및 각운동오차에 수정가공 알고리즘을 적용하여 수정가공 정보를 산출하고, 그 정보대로 수정가공을 실행한다. 이 때, 알고리즘상에서는 레일의 참 형상이 미지임을 가정하고 있으므로, 수정가공시에는 1 회의 래핑으로 가공되는 연마량을 실험적으로 미리 구해, 그 연마량을 기준으로 가공위치에 따른 수정가공횟수를 결정한다.

실험에 이용한 레일은 S45C 를 고주파열처리한 것으로 HRC50~55 의 경도를 가지고 있으며, 이에 따라 직사각형의 연마석( $10\times 2\times 150\text{mm}$ , #800, Bellstone VH-800, Yonjisa)과 물을 이용하여 수정가공을 실시하였다. 이 연마석에 의한 연마량은 예비 실험결과, 약  $0.1\mu\text{m}/10$  회였다.

그러나 실제가공에 있어서는 수정가공정보대로의 정확한 가공은 어렵다. 따라서 실험에서는 충분히 향상된 운동오차가 얻어질 때 까지 운동오차의 측정→수정가공정보의 산출→수정가공의 순서를 반

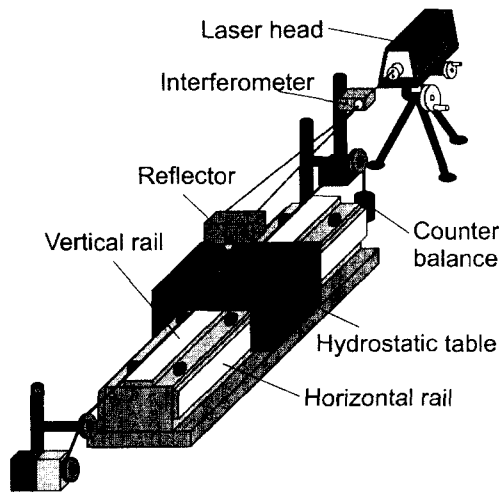


Fig. 1 Experimental setup for corrective machining

Table 1 Specifications of hydrostatic table and rail

Rail length, width	$L, B$	250, 30 mm
Table length, width	$l_0$	105 mm
Pad length, width	$l, l_y$	30, 20 mm
Number of pad	$m$	3
Pocket ratio	$\beta$	0.70
Feeding parameter	$\xi$	1.0
Designed film clearance	$h_0$	$45\mu\text{m}$
Supply pressure	$p_s$	1 MPa

복하여 이에 따른 운동오차의 개선효과 및 고정도화와의 수렴성에 대해 검증하였다.

실험에 있어 수정가공정보는, 가공된 추정 형상오차에 의한 운동오차  $z_c'(x), \theta_c'(x)$ 가 0 이 되도록, 즉 추정 형상오차량 그대로를 수정가공량으로 결정하였다. 수정가공시마다 그 효과를 분석하기 위해서 가공된 레일에 의한 운동오차  $z_c(x), \theta_c(x)$ 를, 가공전에 측정해놓은 레일에 수정가공정보대로 이론적으로 수정가공을 실시했을 때 예측되는 운동오차  $z_r(x), \theta_r(x)$ 와 비교하였다. 또한, 그 때의 가공된 레일의 형상오차  $e_c(x)$ 를, 가공전 레일에서 수정가공정보를 이론적으로 빼주어 계산한 레일 형상오차  $e_r(x)$ 와 비교해가면서 실험오차의 원인을 고찰하였다.

실험결과는 편의상, 레일길이기준 공간주파수  $\omega_R$ 를 기준으로 고찰하였다.

## 3. 알고리즘의 실험적 검증

### 3.1 단면지지형 테이블의 수정가공

단면지지형 테이블용 수직방향 레일(그림 2(a))에 대한 운동오차 측정결과를 그림 3에 나타내었다. 이 운동오차를 입력값으로 하여 얻어진 레일 형상오차 추정치를 그림 4에 나타내었다. 계산상에서 무시되는 전달함수의 크기(컷오프치)를 작게 설정하여 무시되지 않은 약 8 주기성분이 실제 형상(그림 2(a))에 비해 크게 나타나고 있다.

이 추정치를 이용하여 1 차 수정가공한 후 운동오차를 측정하였으며, 그 결과 운동오차는 크게 향상되었으나 이론적 예측치만큼은 감소되지 않았다.

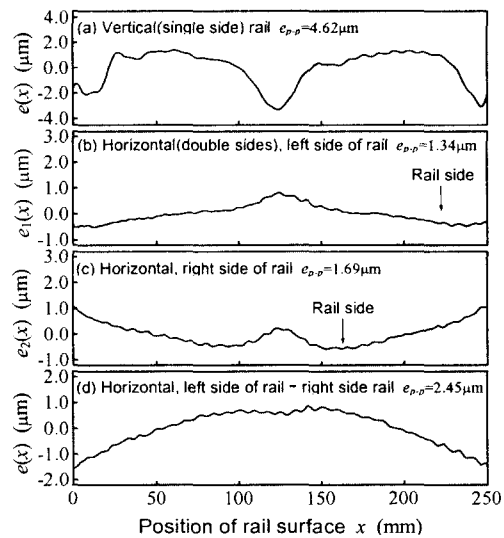


Fig. 2 Profiles of rails used in experiment

레일형상의 비교로부터, 수정가공시에 연마석의 마도와 눈막현상에 의해 가공량이 감소하여 전체적으로 수정가공량이 목표치에 비해 작았기 때문으로 판단되었다.

1 차 수정가공후의 운동오차 측정치를 입력값으로 하고 수정가공정보를 산출하여 2 차 수정가공을 실시하였다. 그 결과, 수정가공에 의해 레일 형상이 크게 변화하였으나 일부분이 과다하게 가공되어 운동오차는 1 차 수정가공후의 운동오차에 비해 별로 변화하지 않았다.

2 차 수정가공후의 운동오차를 입력치로 하여 3 차 수정가공을 실시하고 그 결과를 그림 5 와 그림 6 에 나타내었다. 그림 5 로부터 3 차 수정가공후 운동오차는 수정가공을 시작하기전 운동오차인 그림 3 에 비해 1/10 이하로 감소하여 145mm 의 이송량에 대해 0.13 $\mu\text{m}$  및 1.40arcsec 의 운동오차를 나타내고 있다. 한편, 그림 6 에 있어서 3 차 수정가공후의 레일형상을 보면, 수정가공실시 회수의 증가에 따라 가공해야할 형상은 고주파성분이 많아져 가공이 곤란한 형상이 되어감을 알 수 있다. 따라서 보다 향상된 운동정밀도를 얻기 위해서는 가능한한 수정가공 실시회수를 줄일 필요가 있음을 알 수 있다.

### 3.2 양면지지형 테이블의 수정가공

양면지지형 테이블에 있어서는, 그림 2(d)와 같이 좌측 레일형상에서 우측 레일형상을 뺀 가상 레

일형상을 기준으로 수정가공을 실시한다. 따라서 가공은 좌측 레일을 대상으로 하였다.

한편, 가공에 있어서는 단면지지형 테이블에서의 경험을 토대로, 연마석의 상태를 수시로 점검하고 교환하여 1 회당 연마량이 크게 변하지 않도록 하였다.

그림 2 의 레일에 대한 운동오차 측정치를 그림 7 에 나타내었으며, 레일에 대해 이론적으로 계산한 운동오차 해석치도 참고로 같이 나타내었다. 이 측정치를 이용하여 산출한 수정가공정보를 그림 8 에 나타내었으며, 그를 토대로 수정가공된 레일에 의한 운동오차 측정결과를 그림 9 에, 그때의 좌측 레일형상의 측정결과를 그림 10 에 각각 나타내었다.

그림 9 의 운동오차를 수정가공전인 그림 7 과 비교하면, 직선운동오차가 0.32 $\mu\text{m}$  에서 0.07 $\mu\text{m}$  로, 각운동오차가 4.14arcsec 에서 1.42arcsec 까지 감소되어 1 차례의 수정가공으로 매우 높은 운동정밀도를 달성하였다. 또한 그림 10 의 레일 형상오차를 예측치와 비교하면, 상대적으로 고주파성분에서 다소 차이가 있지만 저주파성분을 중심으로는 매우 잘 일치함을 보이고 있다. 한편, 수정가공전인 그림 2(b)와 레일 형상을 비교하면, 1.34 $\mu\text{m}$  에서 1.08 $\mu\text{m}$  로 감소하고 있어 레일 형상오차 자체가 대폭 향상된 것은 아님을 알 수 있다. 양면지지형 테이블의 실험에서는 연마석의 상태를 수시로 점검하고 교환하는 것에 의해 1 회당 연마량을 일정하게 유지함으로써 정확한 수정가공이 실현될 수 있음을 확인

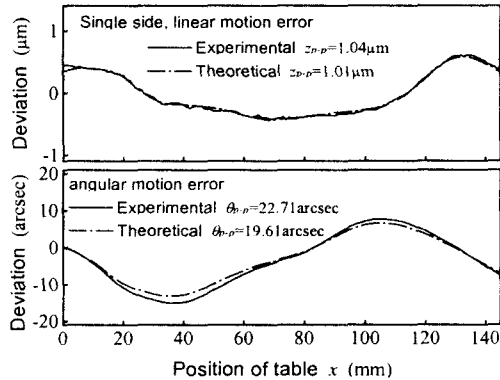


Fig. 3 Motion errors of single side table

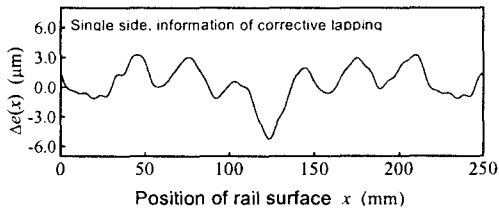


Fig. 4 Information of corrective lapping calculated from estimated rail

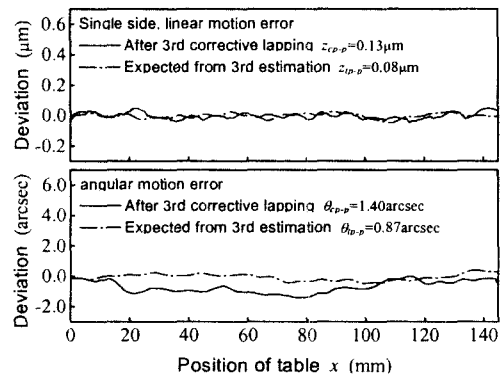


Fig. 5 Motion errors after 3rd corrective lapping

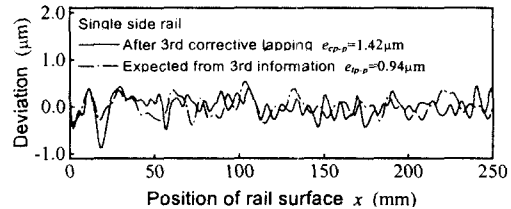


Fig. 6 Rail form errors after 3rd corrective lapping

하였다.

이상으로부터, 수정가공 알고리즘은 양면지지형 테이블의 운동정밀도 향상에도 매우 유효함을 확인할 수 있다.

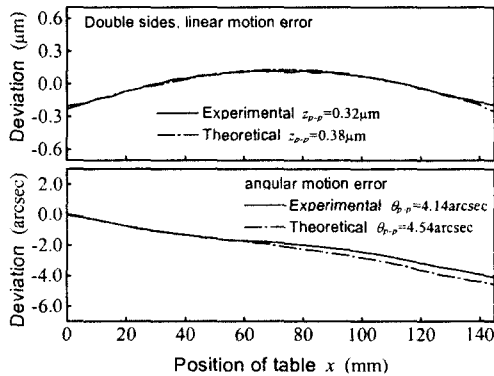


Fig. 7 Motion errors of double sides table

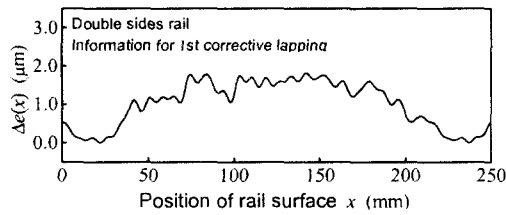


Fig. 8 Information of corrective lapping calculated from estimated rail

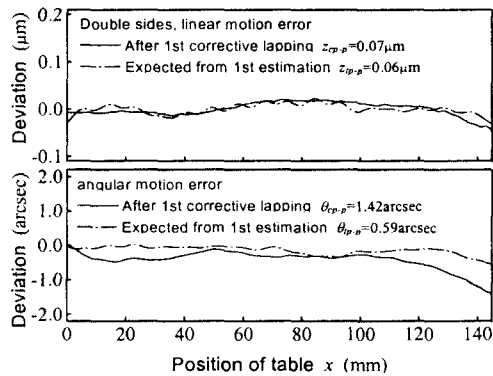


Fig. 9 Motion errors after 1st corrective lapping

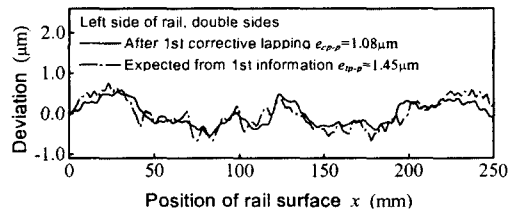


Fig. 10 Rail form errors after 1st corrective lapping

## 6. 결론

본 논문에서는 단면지지형 및 양면지지형 유정압테이블을 대상으로 수정가공을 실시하여 알고리즘의 실용성을 실험적으로 검증하였다. 유정압테이블에 대한 수정가공실험의 결과로부터, 레일 형상을 알지 못하는 경우에도 운동오차 측정치에 수정가공 알고리즘을 적용하는 것에 의해 단면지지형 테이블의 경우  $0.13\mu\text{m}$ 의 직선운동오차 및  $1.40\text{arcsec}$ 의 각운동오차까지를, 양면지지형 테이블의 경우  $0.07\mu\text{m}$ 의 직선운동오차 및  $1.42\text{arcsec}$ 까지의 각운동오차를 달성할 수 있었다. 또한, 본 실험은 전혀 래핑작업의 경험이 없는 미숙련자가 약간의 예비실험후에 행한 것으로, 알고리즘의 적용에 의해 미숙련자도 테이블의 운동정밀도를 대폭적으로 향상할 수 있음을 확인하였다.

## 후 기

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

## 참고문헌

- 오윤진, 박천홍, 이후상, 홍준희, “전달함수를 이용한 유정압테이블 운동정밀도 해석법의 제안 및 이론적 검증,” 한국공작기계학회춘계학술대회논문집, pp9-14, 2001.
- 박천홍, 이후상, 오윤진, 홍준희, “전달함수를 이용한 유정압테이블 운동정밀도 해석법의 실험적 검증,” 한국정밀공학학회춘계학술대회논문집, pp454-458, 2001.
- 박천홍, 이찬홍, 이후상, “유정압테이블 운동정밀도 향상을 위한 수정가공 알고리즘,” 한국정밀공학학회추계학술대회논문집, 발표예정, 2001.
- 박천홍, 정재훈, 이후상, 김수태, “서브미크론 가공진직도측정장치개발,” 한국정밀공학회지, 제 17 권, 제 5 호, pp124-130, 2000.