

## 유정압테이블 수정가공 알고리즘의 실험적 검증

박천홍\*, 이찬홍\*, 이후상\*

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

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

#### ABSTRACT

Effectiveness of corrective machining algorithm is verified experimentally in this paper by performing corrective machining work practically 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 an unskilled person after he experienced a little of preliminary machining training. 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

일반적으로 복수의 패드로 구성된 유정압테이블에 있어서 각 패드의 형상은 동일하고, 그 동일 형상의 패드가 레일상의 같은 부분을 중첩하여 운동하는 과정에서 테이블의 운동오차가 결정된다. 저자들은 이러한 점에 착안하여, 테이블의 운동오차로부터 레일 형상오차를 추정하는 역해석법 및 레일 형상으로부터 운동오차를 해석하는 운동오차 해석법<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

.. 2001년 11월 30일 접수

\* 한국기계연구원 자동화연구부 공작기계그룹

### 2.1 실험장치의 구성

실험장치의 개략도를 그림 1 에 나타내었다. 유정압 테이블의 수직 방향은 3 개의 패드를 갖는 단면지지형 테이블로 되어 있으며, 수평방향(측면)은 역시 3 개의 대향 패드를 갖는 양면지지형 테이블로 되어 있다. 표 1 에 실험용 유정압테이블의 제원을 나타내었다. 테이블의 총이송량은 145mm 이고, 와이어로프와 스테핑모터를 이용하여 구동하였으며, 와이어의 장력을 일정하게 유지하기 위해 모터의 반대측에는 카운터밸런스를 설치하였다. 운동오차 측정시에 이송속도로 인한 동압효과가 발생하지 않도록 이송속도는 1mm/s 의 저속으로 하였으며, 이 때의 운동오차를 레이저 간섭계(HP5528A)로 측정하였다.

실험에 사용된 레일의 형상오차를 그림 2 에

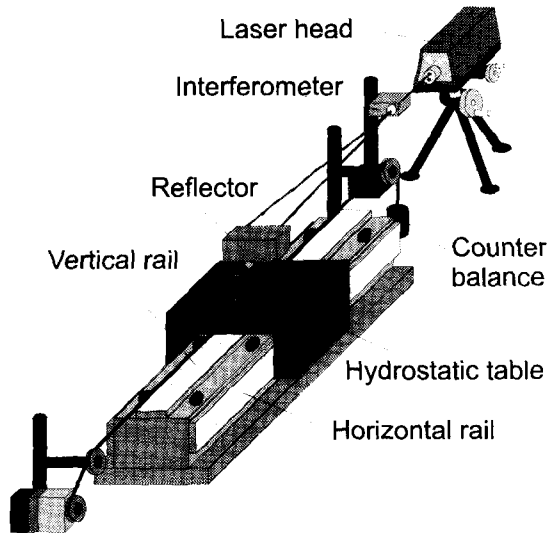


Fig. 1 Experimental setup for corrective machining

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 $\text{Mpa}$

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

### 2.2 실험방법

레이저간섭계를 이용하여 측정한 직선 및 각 운동오차에 수정가공 알고리즘을 적용하여 수정가공정보를 산출하고, 그 정보대로 수정가공을 실행한다. 이 때, 알고리즘상에서는 레일의 참 형상이 미지임을 가정하고 있으므로, 수정가공시에는 1 회 의 래핑으로 가공되는 연마량을 실험적으로 미리 구해, 그 연마량을 기준으로 가공위치에 따른 수정가공횟수를 결정한다.

실험에 이용한 레일은 S45C 를 고주파열처리한 것으로  $H_R C50\sim 55$  의 경도를 가지고 있으며, 이에 따라 직사각형의 연마석(10 $\times$ 2 $\times$ 150mm, #800, Bellstone VH-800, Yonjisa)과 물을 이용하여 수정가공을 실시하였다. 이 연마석에 의한 연마량은 예비실험결과, 약 0.1 $\mu\text{m}/10$  회였다. 그러나 작업자의 가압력, 가공부의 접촉면적, 연마석의 마모상태 등

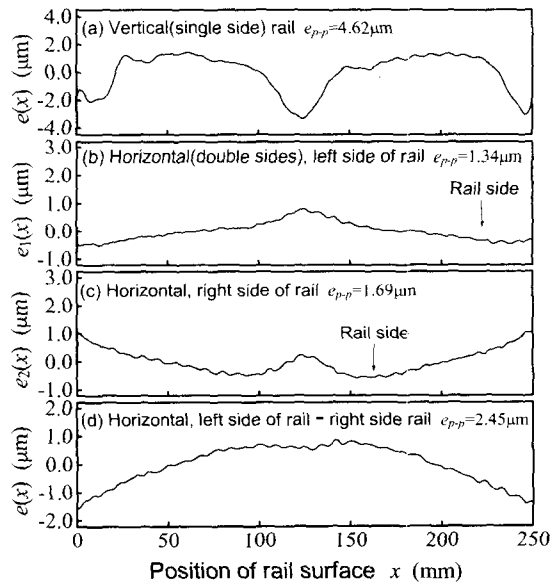


Fig. 2 Profiles of rails used in experiment

에 따라 실제 연마량은 달라질 수 있다. 본 실험에서는 가능한 한 일정한 연마량을 유지하기 위해, 연마석의 방향을 항상 일정하게 하고 레일의 폭방향으로 30mm 의 일정한 스트로크로 왕복운동을 하였다. 한편, 연마석의 폭은 10mm 이므로 레일을 10mm 구간으로 나누어 각 구간에 대한 연마횟수를 결정하였으며, 이에 따라 10mm 이하의 주기를 갖는 성분은 계산시에 고려하지 않았다.

앞에서 언급했듯이 예비실험을 통한 연마량을 기준으로 연마횟수를 결정하므로, 수정가공에 있어서는 수정가공정보대로의 가공이 곤란하다. 따라서 실험에서는 충분히 향상된 운동오차가 얻어질 때 까지 운동오차의 측정→수정가공정보의 산출→수정가공의 순서를 반복하여 이에 따른 운동오차의 개선효과 및 고정도화와의 수렴성에 대해 검증하였다.

실험에 있어 수정가공정보는, 가공된 추정형상오차에 의한 운동오차  $z_c'(x)$ ,  $\theta_c'(x)$ 가 0 이 되도록, 즉 추정형상오차량 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  $z_t(x)$ ,  $\theta_t(x)$ 와 비교하였다. 또한, 그 때의 가공된 레일의 형상오차  $e_c(x)$ 를, 가공전 레일에서 수정가공정보를 이론적으로 빼주어 계산한 레일 형상오차  $e_t(x)$ 와 비교해가면서 실험오차의 원인을 고찰하였다.

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

### 2.3 주기함수화를 위한 이론적 보정

수정가공 알고리즘의 모든 계산과정에 있어 파형은 모두 주기함수임을 가정하고 있다. 그러나 실제의 경우에는 두 가지의 불연속적인 특성을 고려해야만 한다.

먼저, 실험에 있어서 레이저간섭계를 이용하여 측정된 운동오차는, 그림 3 에 나타난 바와 같이, 설치에 따른 평행오차를 제거하는 과정에서 초기값을 잃어버린 형태로 측정된다. 즉 직선운동오차는 기울기가 변하며, 각운동오차는 초기값이 0 이 되도록 상하방향으로 쉬프트된다. 따라서 측정된 이 두 값을 이용하여 유막반력을 계산하면 불연속적인 유막반력 파형이 얻어지게 된다. 이러한 현

상을 보정하기 위해서는, 먼저 직선운동오차를 고정시키고 각운동오차를 상하방향으로 평행이동시켜가며, 그 값을 이용하여 추정된 레일형상에 의한 운동오차가 주어진 운동오차와 일치할 때 까지 반복계산을 수행할 필요가 있다.

한편, 수정가공 알고리즘에 있어 유막반력은 유효 레일길이  $L_f$ 를 기준으로 주기함수가 되어야 하나, 실제 측정된 운동오차는 유효 레일길이에 대해 주기적이지 아니므로 계산된 유막반력도 주기적이지 않는다. 이를 보정하기 위해서는 그림 3(b)에서와 같이 각운동오차를  $\alpha$ 만큼 평행이동시키고 그에 해당하는 직선운동오차의 경사각을 동시에 변화시켜가며 유막반력 계산치의 양단이 일치할 때 까지 반복계산을 수행할 필요가 있다.

## 3. 알고리즘의 실험적 검증

### 3.1 단면지지형 테이블의 수정가공

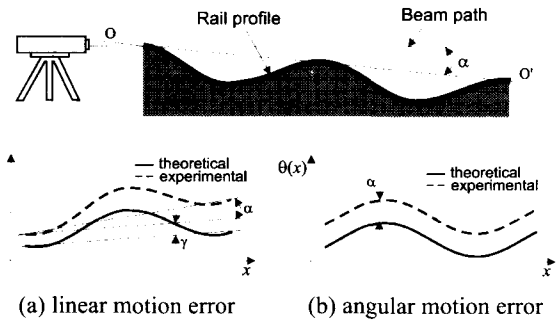


Fig. 3 Relationship between theoretical data and experimental data by laser interferometer

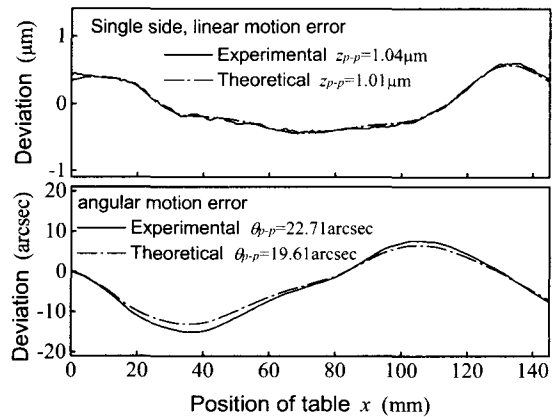


Fig. 4 Motion errors of single side table

단면지형형 테이블용 수직방향 레일(그림 2(a))에 대한 운동오차 측정결과를 그림 4에 나타내었다.  $\omega/\omega_R=2$  주기성분의 영향으로 각운동오차가 특히 크게 나타나고 있다. 이 운동오차를 입력값으로 하여 얻어진 레일 형상오차 추정치를 그림 5에 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 추정치와 예비실험에서 얻어진 연마량을 이용하여 계산한 수정가공횟수를 그림 6에 나타내었으며, 수정가공을 실제로 실시한 후 측정된 운동오차를, 수정가공전 레일에 수정가공정보를 이론적으로 적용하여 예측한 운동오차와 함께 그림 7에 나타내었다. 수정가공전인 그림 4에 비해 운동오차는 크게 향상되었으나, 예측치만큼은 감소되지 않았음을 알 수 있다.

그림 8은 수정가공후의 레일형상의 측정치와 수정가공전의 레일로부터 수정가공량을 이론적으로 제한 레일형상 예측치를 나타낸 것이다. 실제가공된 레일은 수정가공정보와는 달리 약 8 주기성분이 크게 나타나지 않았으며, 전체적으로 연마량이 목표치에 비해 작았음을 보이고 있다. 이것은, 1회당 연마량을 결정하기위한 예비실험시에는 새 연마석을 사용했으나, 실제 수정가공시에는 연마석의 마모와 눈막힘현상에 의해 가공량이 감소했기 때문으로 판단된다. 가공결과와 예측치에 큰 차이는 있었으나 주로 저주파의 레일 형상오차가 크게 감소하여 직선운동오차를  $1.04\mu\text{m}$ 에서  $0.31\mu\text{m}$ 로, 각운동오차를  $22.71\text{arcsec}$ 에서  $3.77\text{arcsec}$ 로 감소시킬 수 있었다.

다음으로, 그림 7의 운동오차 추정치를 입력값으로 하고 수정가공정보를 산출하여 2차 수정가공을 실시하였으며, 그 결과를 그림 9 및 그림

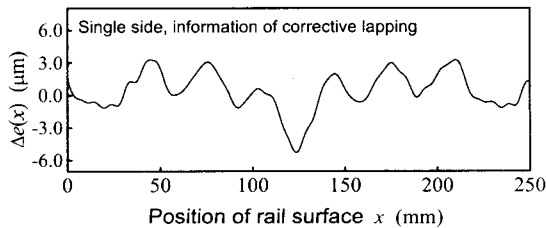


Fig. 5 Information of corrective lapping calculated from estimated rail

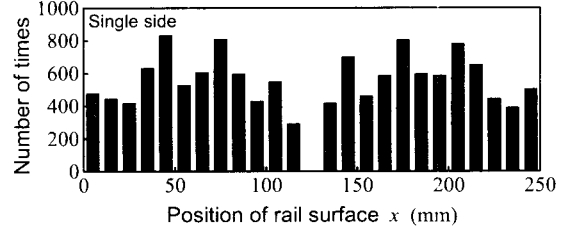


Fig. 6 Calculated amounts to be machined by 1st corrective lapping

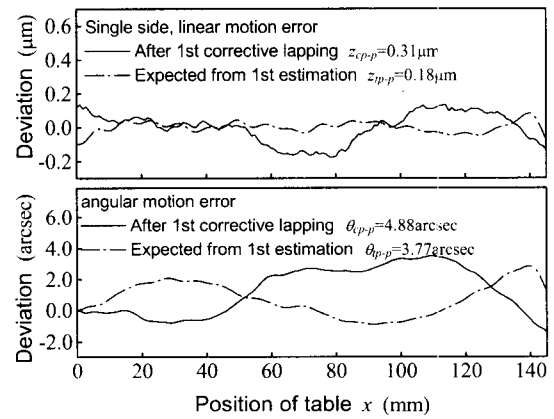


Fig. 7 Motion errors after 1st corrective lapping

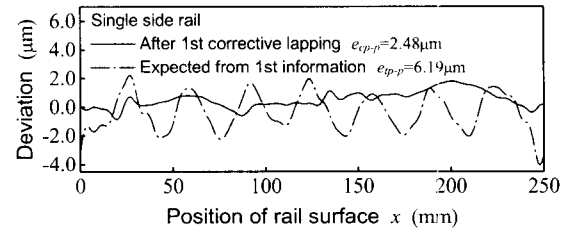


Fig. 8 Rail form errors after 1st corrective lapping

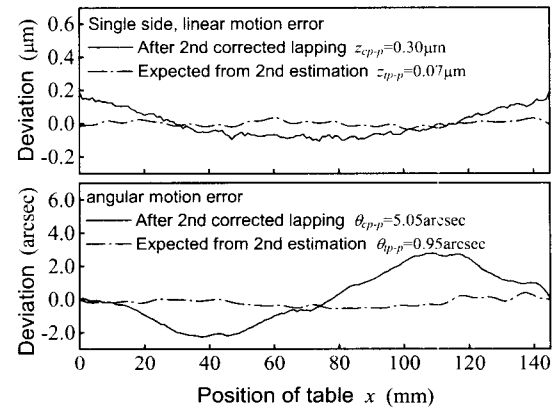


Fig. 9 Motion errors after 2nd corrective lapping

10에 나타내었다. 그림 10에서 알 수 있듯이, 수정가공에 의해 레일 형상이 크게 변화하여 2.48  $\mu\text{m}$ 에서 1.27 $\mu\text{m}$ 로 감소되었다. 그러나 그림 9의 운동오차는 그림 7의 운동오차 입력치에 비해 별로 변화하지 않았다. 그림 10을 보면, 가공후의 레일형상은 예측형상과 근사하고 있지만, 중앙부( $x=110\sim 140\text{mm}$ )의 가공량이 과다했음을 보이고 있으며 이것이 운동오차가 향상되지 않은 주요 원인으로 판단된다.

그림 9의 운동오차를 입력치로 하여 3차 수정가공을 실시하고 그 결과를 그림 11 및 그림 12에 나타내었다. 그림 11로부터 수정가공후 운동오차는 수정가공을 시작하기전 운동오차인 그림 4에 비해 1/10 이하로 감소하여 145mm의 이송량에 대해 0.13 $\mu\text{m}$  및 1.40arcsec의 운동오차를 나타내고 있다. 한편, 그림 12에 있어서 3차 수정가공에 의해 예측되는 레일형상을 1, 2차에서 예측되는 레일형상(그림 8, 10)과 비교해보면, 수정가공 실시 회수의 증가에 따라 가공량은 감소했지만 가공해야할 형상은 고주파성분이 많아져 가공이 곤란한 형상이 되어감을 알 수 있다. 따라서 보다

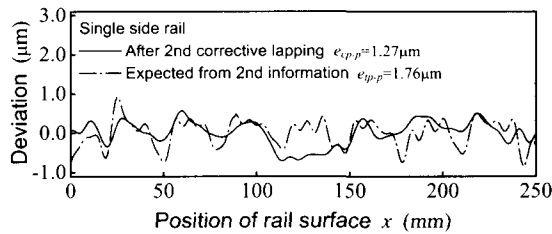


Fig. 10 Rail form errors after 2nd corrective lapping

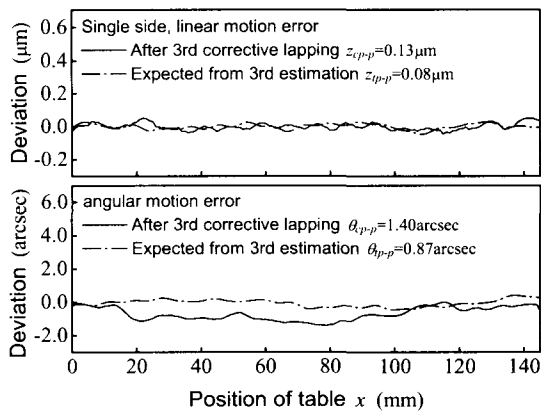


Fig. 11 Motion errors after 3rd corrective lapping

향상된 운동정밀도를 얻기 위해서는 가능한한 수정가공 실시회수를 줄일 필요가 있음을 알 수 있다.

그림 13은 수정가공전인 그림 2(a)의 레일형상과 3차 수정가공후인 그림 12의 레일형상을 주파수분석한 결과이다.

이상으로부터 단면지지형 테이블의 운동오차 측정치에 대해 수정가공 알고리즘을 적용하는 것에 의해, 레일 형상측정 가능여부에 관계없이, 운동오차를 대폭 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

### 3.2 양면지지형 테이블의 수정가공

양면지지형 테이블에 있어서는, 그림 2(d)와 같이 좌측 레일형상에서 우측 레일형상을 뺀 가상 레일형상을 기준으로 수정가공을 실시한다. 따라서 가공은 좌측 레일을 대상으로 하게 되며, 이상적으로 가공이 될 경우 좌측 레일형상이 우측 레일형상과 대칭적이 되면서 운동오차는 0에 근접하게 될 것이다.

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

그림 2의 레일에 대한 운동오차 측정치를 그림 14에 나타내었으며, 레일에 대해 이론적으로 계산한 운동오차 해석치도 참고로 같이 나타내었

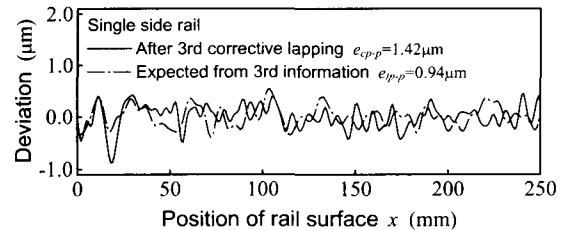


Fig. 12 Rail form errors after 3rd corrective lapping

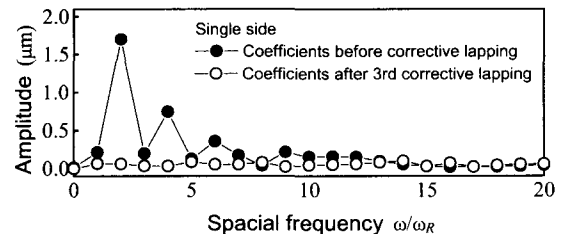


Fig. 13 Frequency components of rail form errors before and after lapping

다. 이 측정치를 이용하여 산출한 수정가공정보를 그림 15 에 나타내었으며, 그를 토대로 수정가공된 레일에 의한 운동오차 측정결과를 그림 16 에, 그때의 좌측 레일형상의 측정결과를 그림 17 에 각각 나타내었다.

그림 16 에서 운동오차 측정치는 예측치와 잘 일치하는 결과를 보이고 있으며, 각운동오차에서의 다소간의 차이는, 그림 14 에서도 볼 수 있듯이, 운동오차해석법에서의 이론치와 실험치간의 차에 의한 영향으로 추정된다. 또한 운동오차 측정치를 수정가공전인 그림 14 와 비교하면, 직선운동오차가  $0.32\mu\text{m}$  에서  $0.07\mu\text{m}$  로, 각운동오차가  $4.14\text{arcsec}$  에서  $1.42\text{arcsec}$  까지 감소되어 1 차례의 수정가공으로 매우 높은 운동정밀도를 달성하였다. 또한 그림 17 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 아

님을 알 수 있다. 양면지지형 테이블의 실험에서는 연마석의 상태를 수시로 점검하고 교환하는 것에 의해 1 회당 연마량을 일정하게 유지함으로써 정확한 수정가공이 실현될 수 있음을 확인하였다.

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

#### 4. 결론

본 논문에서는 단면지지형 및 양면지지형 유정압테이블을 대상으로 수정가공을 실시하여 알고리즘의 실용성을 실험적으로 검증하였다. 유정압 테이블에 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

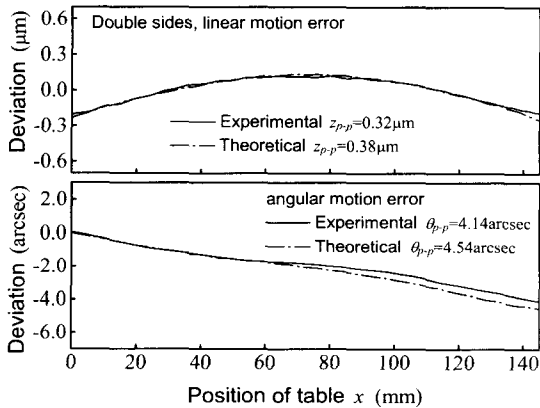


Fig. 14 Motion errors of double sides table

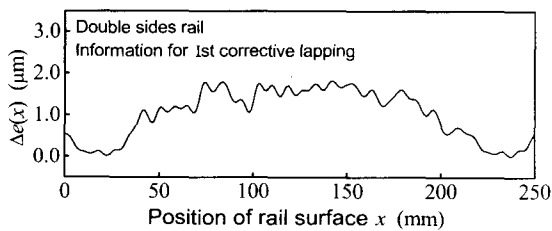


Fig. 15 Information of corrective lapping calculated from estimated rail

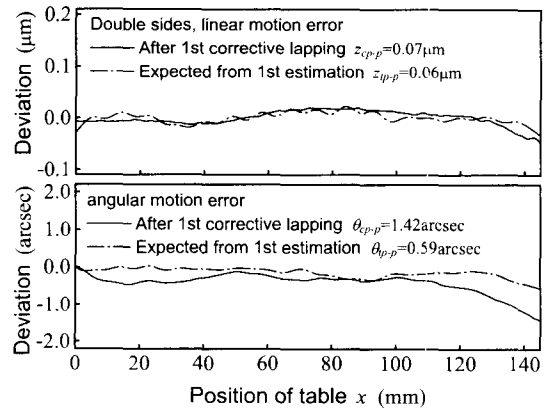


Fig. 16 Motion errors after 1st corrective lapping

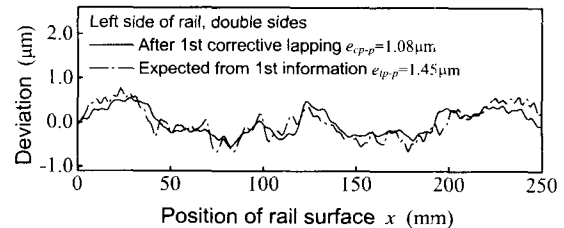


Fig. 17 Rail form errors after 1st corrective lapping

약간의 예비실험후에 행한 것으로, 알고리즘의 적용에 의해 미숙련자도 테이블의 운동정밀도를 대폭적으로 향상할 수 있음을 확인하였다.

한편, 수정가공시에 가공오차가 발생해도 알고리즘의 반복적용을 통해 운동정밀도를 향상시킬 수 있으나, 수정가공 실시회수가 증가할수록 고주파성분이 증가하여 가공이 어려워지므로, 실용적인 면에서 보다 향상된 운동정밀도를 얻기 위해서는, 가능한한 수정가공 실시회수를 줄일 필요가 있음을 알 수 있다.

## 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. 박천홍, 이찬홍, 이후상, “유정압테이블 운동정밀도 향상을 위한 수정가공 알고리즘,” 한국정밀공학회지, 제 19 권, 제 6 호, pp. 62-69, 2002.
4. 박천홍, 정재훈, 이후상, 김수태, “서브미크론 가공진직도측정장치개발,” 한국정밀공학회지, 제 17 권, 제 5 호, pp. 124-130, 2000.