

전달함수를 이용한 유정압테이블 운동정밀도 해석법의 실험적 검증

오윤진*, 박천홍**, 이찬홍**, 홍준희***

Experimental Verification on Motion Error Analysis Method of Hydrostatic Tables Using Transfer Function

Yoon Jin Oh*, Chun Hong Park**, Chan Hong Lee** and Joon Hee Hong***

ABSTRACT

A new model utilizing a transfer function was proposed in the previous paper for analyzing motion errors of hydrostatic tables. Validity of the proposed method was theoretically verified as the calculated motion errors were compared with the results by conventional multi pad method. In this paper, relationship between form error of rail and motion errors of hydrostatic table is analyzed theoretically in order to comprehend so-called 'averaging effect of oil film'. Experiments on the motion errors of hydrostatic table is conducted with 3 different rails, and the results are compared with the results calculated by Transfer Function Method. The results show good agreement. From the results, it is verified that TFM is very effective to analyze the motion errors of hydrostatic table.

Key Words : Hydrostatic table(유정압테이블), Motion error(운동오차), Transfer function of motion error(운동오차 전달함수), averaging effect of oil film(유막의 평균화효과)

1. 서론

저자들은 유정압테이블의 운동오차를 효율적으로 해석하기 위한 새로운 방법으로, 한 개의 패드에 있어서 형상오차의 각 공간주파수성분에 대한 유막반력의 변화특성으로부터 전달함수를 구하고, 이것을 이용하여 베어링간극, 패드수, 레일형상오차등이 변경되는 경우에도 간단히 테이블의 운동오차를 해석할 수 있는 전달함수법(Transfer Function Method)을 제안하였다. 또한 테이블 전체를 모델링하여 운동오차를 해석하는 복수패드법

^{1),2)}과의 계산결과 비교를 통해 전달함수법의 유용성을 이론적으로 검증하였다³⁾.

본 논문에서는 먼저, 유정압테이블에 있어서의 유막의 평균화효과를 이해하기 위해, 전달함수를 매개로한 레일 형상오차와 테이블 운동오차의 관계를 이론적으로 파악하였다. 또한 3 개의 서로 다른 곡형을 갖는 레일에 대한 운동오차 측정결과를 전달함수법에 의한 해석결과와 비교하는 것에 의해 전달함수법을 실험적으로 검증하였다. 실험은 단면지지형 및 양면지지형 테이블에 대해 이루어졌으며, 복수패드법에 의한 해석결과도 같이 비교

... 2001년 10월 19일 접수
* 충남대학교 대학원
** 한국기계연구원 자동화연구부 공작기계그룹
*** 충남대학교 기계공학과

하였다.

2. 레일 형상오차와 테이블 운동오차의 관계

패드가 1 개인 경우, 전달함수만으로 레일 형상오차와 패드의 변위간의 관계가 이해될 수 있다. 그러나 복수개의 패드를 갖는 경우의 테이블의 운동오차는, 전달함수와 각 패드간의 기하학적인 관계가 복합되어 결정되므로 그들 관계를 이해할 필요가 있다. 이를 위해 식(1)과 같이 공간주파수영역에 있어서 레일 형상오차 $e(\omega)$ 를 입력으로 하고 테이블 직선운동오차 $z(\omega)$ 및 각운동오차 $\theta(\omega)$ 를 출력으로하는 운동오차전달함수를 도입한다. 또한 1 개의 패드에 있어서 유막의 평균화효과와 비교하기위해 식(2)와 같이 한계운동오차를 도입한다.

$$Z(\omega) = \frac{z(\omega)}{e(\omega)}, \quad \Theta(\omega) = \frac{\theta(\omega)}{e(\omega)} \quad (1)$$

$$Z'(\omega) = \frac{K(\omega)}{K_0}, \quad \Theta'(\omega) = \frac{2|K(\omega)|}{K_0(m-1)l} \quad (2)$$

여기서 $K(\omega)$ 는 전달함수, K_0 는 패드의 정강성, m 은 패드수, l 은 패드길이를 나타낸다.

$Z(\omega), \Theta(\omega)$ 는 단위진폭의 각 공간주파수성분에 대한 테이블 운동오차이므로, 복수패드로 구성된 테이블에 있어서 각 주파수성분의 유막의 평균화효과를 나타내게 된다. 또한 $Z'(\omega), \Theta'(\omega)$ 는 단일패드의 전달함수에 비례하며, 단위진폭의 형상오차에 의해 발생할 수 있는 최대 직선운동오차 및 최대 각운동오차를 나타낸다.

그림 1(a), (b), (c) 는 동일 치수의 테이블이 각각 2, 3, 4 개의 패드수로 구성되었을 경우의 운동오차전달함수를 구한 것이다. 전달함수로부터 계산된 한계운동오차도 비교를 위해 점선으로 표시하였으며 ω_R 은 레일길이를 기준으로하는 공간주파수를 의미한다. 테이블과 레일의 길이비는 1/2 이며 테이블의 유막강성은 동일하게 설정되어 있다. 먼저, $m=2$ 인 그림 1(a) 를 보면, 짝수 주기의 경우에 직선운동오차와 각운동오차 가운데 하나는 0 에 근접하게 된다. 구체적으로는 2 의 짝수배의 경우에는 직선운동오차가, 2 의 홀수배의 경우에는 각운동오차가 0 에 근접하게 된다. 또한 그 때, 다른 운동오차는 한계운동오차와 같아진다.

한편, $m=3$ 인 그림 1(b) 를 보면, 마찬가지로 2 의 배수에서는 직선운동오차가 0 에 근접하게 되나, 그 가운데 3 의 짝수배, 즉 6 의 배수에서는 각운동오차가 0 에 근접하고 직선운동오차는 한계운동오차와 같아진다. 여기에서 그림 1(a), (b)의 관계를 종합해보면, 테이블내에 정수개의 공간주파수

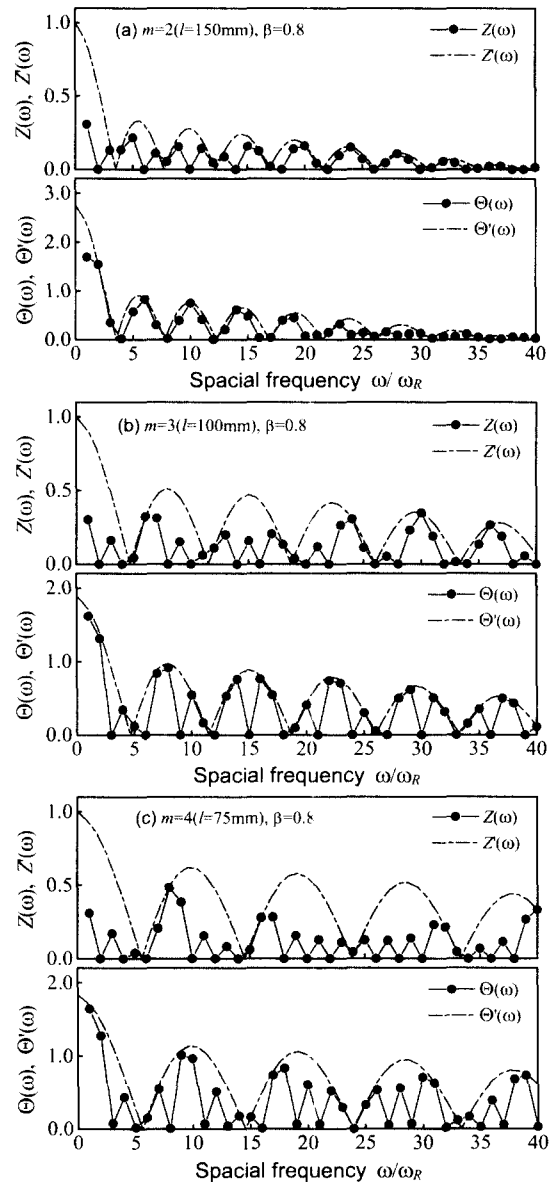


Fig. 1 Relationship between transfer function and motion error

성분이 존재하면 직선운동오차는 0 에 근접하고 각운동오차는 한계운동오차와 같아진다. 그러나 그 가운데 패드수의 배수가 되는 공간주파수에서는, 역으로, 각운동오차가 0 에 근접하고 직선운동 오차가 한계운동오차와 같아지게 된다. 이러한 관계는 $m=4$ 인 그림 1(c)에서도 확인할 수 있다. 이것은 정수의 공간주파수에 있어서는 테이블내에 위치하는 레일 형상오차의 적분값이 일정하게 되어 테이블의 수직방향 변화는 거의 없고 경사방향 변화만이 발생하기 때문이나, 패드수의 배수인 경우에는 각 패드에 위치하는 레일형상이 어느패드에서도 동일하게 되어 경사방향 변화가 발생하기 어려워지므로 수직방향 변위만이 발생하기 때문이다.

이상의 특성을 이용하면 효율적으로 운동정밀도를 향상시킬 수 있는 수단을 생각할 수 있다. 식(1)을 이용하여 운동오차전달함수를 구하고, 여기에 레일 형상오차의 각 주파수성분의 크기를 곱하면 각 주파수성분이 운동오차에 미치는 영향을 정량적으로 파악할 수 있다. 그림 2(b), (c)는 예로써, 테이블과 레일의 길이비 1/2, 포켓폭비 0.8 인 테이블이, 그림 2(a)의 주파수성분들을 갖는 레일상을 운동할 경우의 각 주파수성분이 운동오차에 미치는 영향을 구한 것이다. 직선운동오차의 경우 1, 6, 7 주기성분의 순으로, 각운동오차의 경우 1, 2, 8 주기 성분의 순으로 영향을 미치고 있어 이들 주파수성분을 기준으로 레일의 형상을 개선하면 운동정밀도를 효율적으로 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

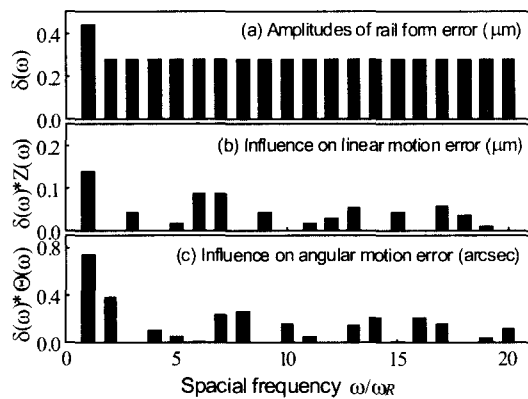


Fig. 2 Influence of rail spatial frequencies on motion error

3. 실험장치 및 실험방법

실험 장치의 개략도를 그림 3 에 나타내었다. 유정압 테이블의 수직 방향에는, 단면 지지형 테이블에 대한 실험을 위해 3 개의 패드를 길이 방향으로 설치하였다. 테이블의 측면(수평방향)에는 양면 지지형 테이블에 대한 실험을 위해 좌우 3 개씩의 패드를 대향하여 설치하였다.

테이블의 총이송량은 145mm 이며 와이어로프와 스테핑모터를 이용하여 구동하였다. 표 1 에 실험용 유정압테이블의 제원을 나타내었다.

운동오차 측정시에 이송속도로 인한 동압효과가 발생하지 않도록 이송속도는 1mm/s 의 저속으로 하였으며, 이 때의 운동오차를 레이저 간섭계(HP5528A)로 측정하였다.

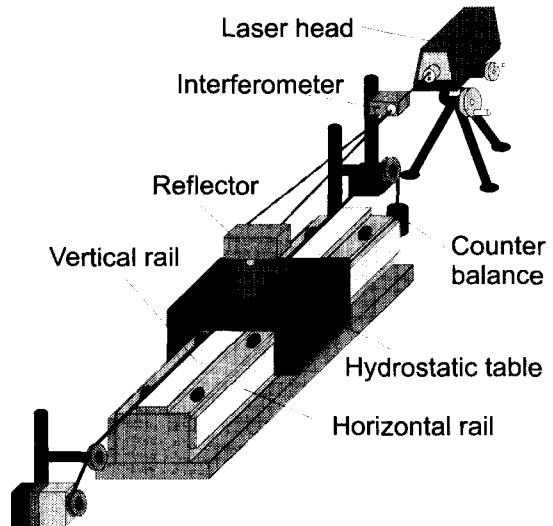


Fig. 3 Experimental setup for verification of motion error analysis method

Table 1 Specifications of hydrostatic table and rail

Rail length, width	L, B	250, 30 mm
Table length, width	l_0, l_t	105, 105 mm
Pad length, width	l_x, l_y	30, 20 mm
Number of pad	n	3
Pocket ratio	β	0.70
Feeding parameter	ξ	1.0
Designed film clearance	h_0	45 μm
Supply pressure	p_s	1 Mpa

실험용 레일로는, 서로 다른 형상오차를 갖는 레일 A, B, C 의 3 개의 레일을 이용하였으며, 레일 형상오차는 자체 개발한 진직도 측정장치(측정정밀도 $0.04\mu\text{m}$)⁴⁾를 이용하여 측정하였다.

그림 4 와 그림 5 는 실험에 이용된 레일 A 의 수직방향, 수평방향의 형상오차 및 형상오차의 주파수분석 결과를 나타낸 것이다. 수직방향의 형상오차는 $\omega/\omega_R=1$ 의 주기 성분이 지배적인 파형이고, 그 외에 주로 낮은 주기의 파형들이 미소하게 포함되어 있다. 그림 5 에 있어 수평방향의 레일의 경우에는 양측 레일 파형의 차(그림 4(d))에 대한 주파수분석결과로, $\omega/\omega_R=1 \sim 4$ 주기 성분이 지배적임을 보이고 있다.

그림 6 과 그림 7 은 레일 B 의 수직방향, 수평방향의 형상오차 및 형상오차의 주파수분석 결과를 나타낸 것이다. 수직방향의 경우는 레일 A 와

비교하여 2 주기 성분이 크며, 1 주기와 2 주기 성분이 지배적으로 되고 있다. 수평방향의 경우는 레일 A 와 비교하여 3 ~ 6 주기 성분이 작고, 역시 1 주기와 2 주기 성분이 지배적이다.

그림 8 과 그림 9 는 레일 C 의 수직방향 및 수평방향의 형상오차와, 형상오차의 주파수분석 결과를 나타낸 것이다. 수직방향은 레일 A 와 레일 B 에 비해 상대적으로 높은 3, 4, 5 주기 성분이 지배적이다. 수평 방향에 있어서는 좌, 우측 레일 모두 3, 4, 5 주기 성분이 지배적이지만, 양 레일은 대칭적으로, 양 레일의 차로 구성되는 파형에 대해 지배적인 주기는 그림 9 에서와 같이 1, 2 주기 성분이 되고 있다.

그림 10 은 실험용 유정압 테이블의 수직방향에 대한 운동오차전달함수와 한계운동오차를 30 주기 성분까지 계산한 결과로, 이해를 위해 테이

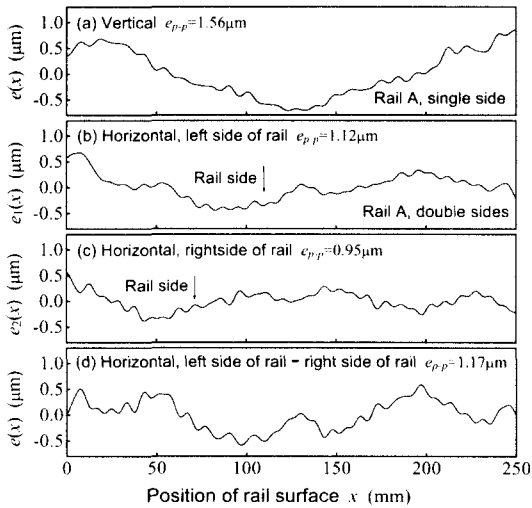


Fig. 4 Vertical and horizontal profiles of rail A

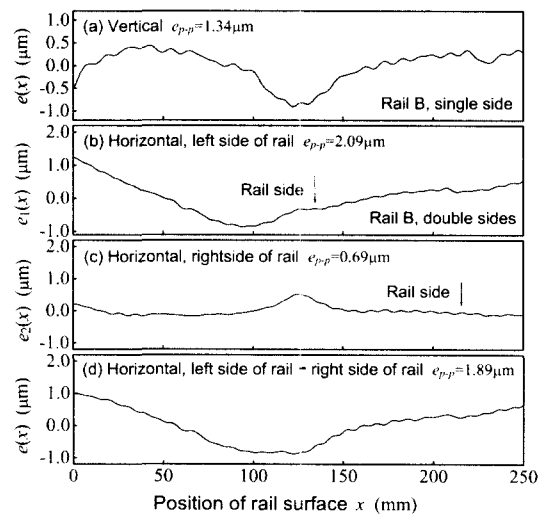


Fig. 6 Vertical and horizontal profiles of rail B

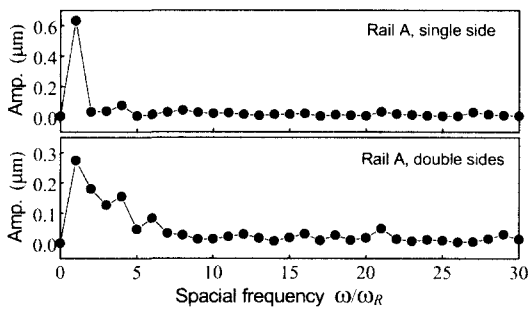


Fig. 5 Frequency components in vertical and horizontal profiles of rail A

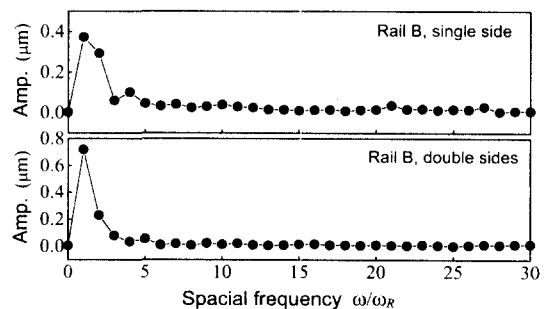


Fig. 7 Frequency components in vertical and horizontal profiles of rail B

불길이 기준 주기 ω/ω_T 로 환산한 주기도 함께 나타내고 있다. 그림으로부터 알 수 있듯이, 대체로 저주기의 형상오차가 운동오차에 영향을 주기 쉬우며, 직선운동오차의 경우에는 1, 2, 3, 4, 6 주기 성분이 운동오차에 큰 영향을 미친다. 단, 2 주기보다 낮은 주파수에서는, 테이블의 이동구간이 레일 형상오차의 1 주기보다 짧아지게 되어, 운동오차에 미치는 영향은 운동오차전달함수보다 작아진다. 예로, 1 주기 성분에 대한 운동오차 전달함수는 약 0.75 로 되고 있지만, 실제 이동구간을 고려한다면 약 0.45 가 된다. 한편, $Z(\omega)$ 와 $Z'(\omega)$ 를 비교하면, 3 개의 패드 사이의 유막반력이 서로 상쇄되어, 각 패드에 대한 유막의 평균화효과 이상으로 평균화 효과가 얻어지는 것을 볼 수 있다. 또

한, 14, 21, 22 주기 성분 등도 상대적으로 크게 나타나고 있으나, 실제의 경우, 일반적으로 이와 같은 높은 주기 성분의 형상오차는 매우 작기 때문에 이러한 고주파 성분이 운동오차에 주는 영향은 거의 없다.

또한, 양면지지형인 수평방향의 경우, 패드의 치수와 기하학적인 형상은 수직 방향과 동일하므로, 레일 형상오차와 테이블 운동오차간의 전달특성은 그림 10 과 같게 된다.

4 실험결과 및 고찰

4.1 단면 지지형 테이블의 경우

그림 11 ~ 그림 13 은, 단면지지형(수직방향) 테이블이 레일 A, B, C 상에서 이동하는 경우의 운동오차 측정결과를 이론해석결과와 비교한 것으로, 복수패드법(MPM)에 의한 해석결과도 참고로 함께 나타내고 있다.

각 그림으로부터 3 개의 레일에 있어서 측정치와 이론치는 모두 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 측정치와 이론치간의 미소한 차이는, 실험에 있어 테이블을 구동하는 와이어의 설치오차에 의한 것으로 추정된다. 또한, 이론치는 테이블의 중심 위치에서 오차를 구한 것이나, 측정치의 경우 테이블 위에 놓여진 측정용 반사경과 고정용 지그형상의 비대칭에 의한 편하중과 이송방향으로의 설치 위치오차에 의한 측정오차가 존재하며 이러한 요인이 측정오차로 작용했음을 추정할 수 있다. 이

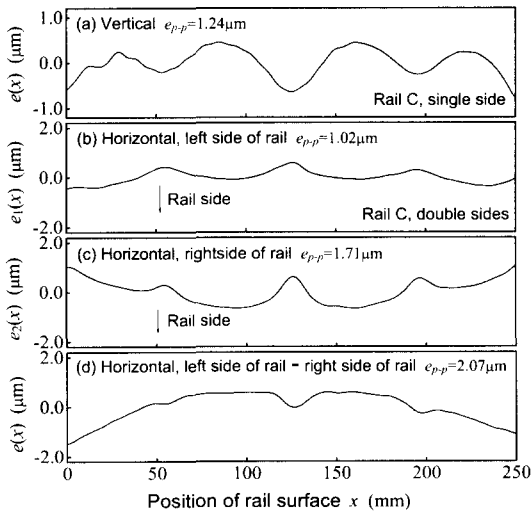


Fig. 8 Vertical and horizontal profiles of rail C

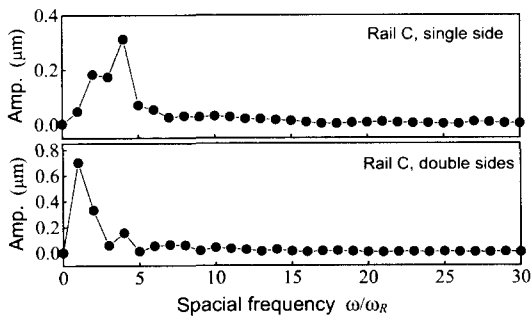


Fig. 9 Frequency components in vertical and horizontal profiles of rail C

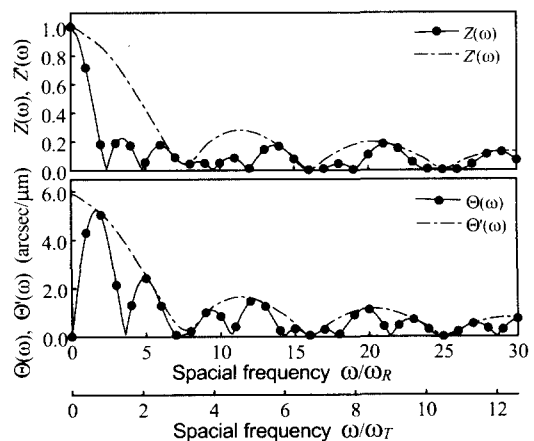


Fig. 10 Transfer function of table and limit of motion error on vertical table

경우, 편하중은 직선운동오차와 각운동오차의 양쪽에, 이송방향에서의 설치위치오차는 각운동오차만에 영향을 미치게 된다. 또한, 이론해석에 있어서 고려하지 않았던 레일의 폭 방향 형상오차의 영향도 원인의 하나로서 추정된다.

한편, 그림 11 과 그림 12 에서 레일 A, B 에 대한 실험 결과를 비교하면, 직선운동오차는 유사한 파형을 보이고 있으나 각운동오차는 전혀 다른 파형을 보이고 있다. 또한, 양 레일의 형상오차의 비를 생각하면 약 0.85 로, 레일 B 가 우수한 정밀도를 갖고 있으나, 레일상에서의 직선운동오차의 측정결과는 거의 동일하게 나타나며, 각운동오차의 경우에는 오히려 레일 A 보다 나빠지는 경향을 보이고 있다. 이것은 그림 5, 그림 7 및 그림 10 으로부터 알 수 있듯이, 레일 A 의 경우 1 주기 성분만이 지배적이나 레일 B 의 경우 직선운동오차에 크게 영향을 미치는 1 주기 성분 및 각운동오

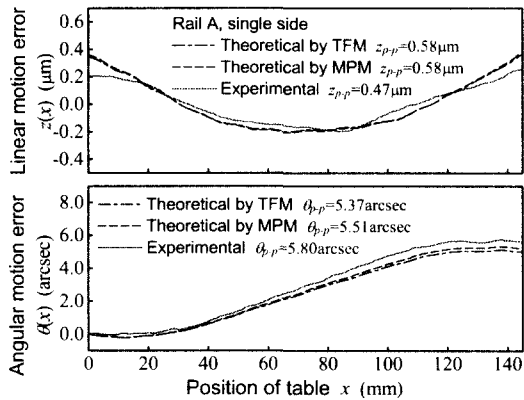


Fig. 11 Motion error in vertical direction with rail A

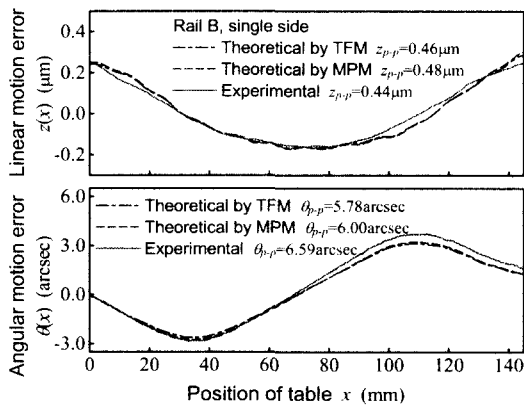


Fig. 12 Motion error in vertical direction with rail B

차에 크게 영향을 미치는 2 주기 성분이 지배적인 파형으로 구성되어 있기 때문이다.

그림 13 의 레일 C 에 대한 운동오차를 레일 A 와 레일 B 의 운동오차와 비교하면, 1 주기 성분이 상대적으로 작으므로 유막의 평균화 효과는 크게 나타나며, 직선운동과 각운동오차 모두 형상오차의 비에 비해 상당히 개선된 정밀도를 보이고 있다.

이상의 결과로부터 전달함수를 이용한 해석법은 단면지지형 유정압테이블의 운동오차해석에 유효함을 확인할 수 있다.

4.2 양면 지지형 테이블의 경우

그림 14 ~ 그림 16 은 양면지지형(수평방향) 테이블이 레일 A, B, C 상에서 이동하는 경우의 운동오차 측정결과를 이론해석결과와 함께 나타낸 것이다. 여기서 양면지지형 테이블의 이론치는 양레일의 형상오차의 차이를 등가의 단면지지형 테이블에 대한 레일 형상오차로 모델링하여 해석한 결과이다.

그림들에 있어서 측정치를 이론치와 비교하면, 각운동오차에 있어 다소 차이는 있지만 양 결과는 전체적으로 잘 일치하고 있어 전달함수를 이용한 해석법은 양면지지형 테이블의 운동오차 해석에도 매우 유효함을 확인할 수 있다. 여기서의 측정치와 해석치간의 차이도, 단면지지형 테이블의 경우와 동일한 원인에 의한 것으로 추정된다.

한편, 그림으로부터 레일 형상오차의 비와 공간주파수의 구성을 비교하면, 3 개의 레일 모두 1 주기와 2 주기 성분이 크지만, 특히 1 주기와 2 주

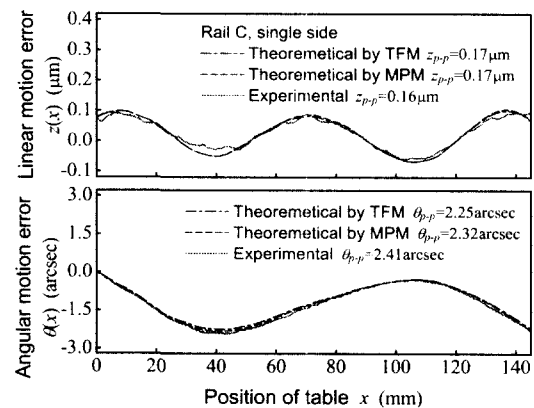


Fig. 13 Motion error in vertical direction with rail C

기성분이 지배적인 파형으로 구성된 레일 B 의 경우가 형상오차의 비에 비해 운동오차가 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

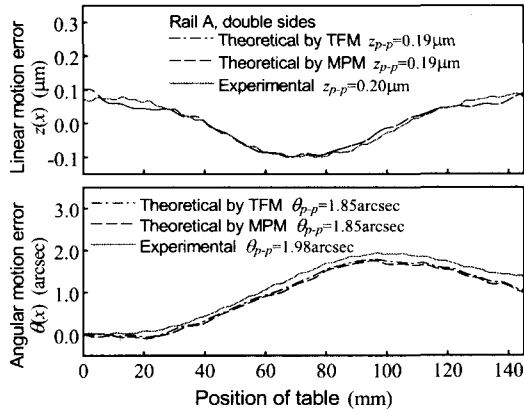


Fig. 14 Motion error in horizontal direction with rail A

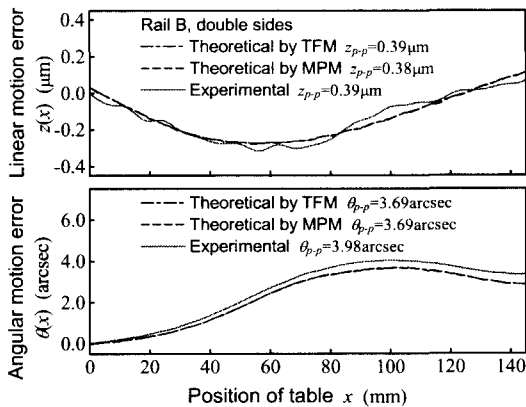


Fig. 15 Motion error in horizontal direction with rail B

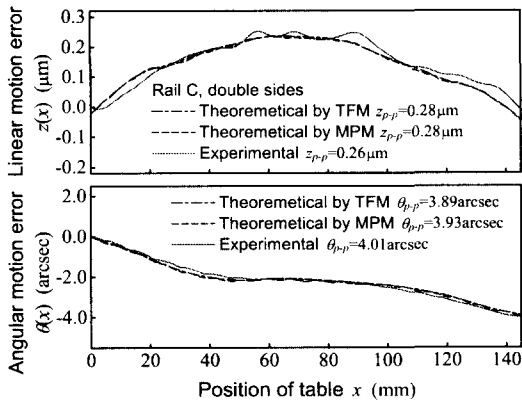


Fig. 16 Motion error in horizontal direction with rail C

이상의 실험결과로부터, 본 논문에서 제안한 전달함수법에 의한 해석법은 단면지지형 및 양면지지형 유정압테이블의 운동오차해석에 매우 효과적임을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는, 전편에서 제안한, 전달함수를 이용한 유정압테이블 운동오차 해석법을 이용하여 테이블에서의 유막의 평균화효과를 정량적으로 파악하고, 운동오차에 대한 타당성을 실험적으로 검증하고자 하였다.

단위진폭의 공간주파수에 대한 테이블의 운동오차전달함수를 구하는 것에 의해, 해석하고자 하는 테이블에 대해 레일 형상오차의 각 공간주파수가 미치는 유막의 평균화효과를 정량적으로 파악할 수 있음을 확인하였다. 또한 단면지지형과 양면지지형 유정압 테이블에 대한 실험결과, 전달함수법에 의한 이론치와 실험치는 잘 일치하고 있어, 제안한 전달함수 해석법에 의해 유정압테이블의 운동오차를 정량적으로도 정도높게 해석할 수 있음을 확인하였다.

향후, 본 방법을 토대로 예측된 운동오차를 이용하여 유정압테이블의 운동정밀도를 향상시킬 수 있는 수정가공알고리즘을 제안하고 실험적으로도 검증할 예정이다.

후 기

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

참고문헌

1. 박천홍, 정재훈, 이후상, 김수태, "FEM 을 이용한 유정압테이블의 운동정밀도해석(1. 단면지지형 테이블의 해석 및 실험적 검증)," 한국정밀공학회지, 제 17 권, 제 12 호, pp. 137-144, 2000.
2. 박천홍, 이후상, 김태형, 김민기, "FEM 을 이용한 유정압테이블의 운동정밀도해석(2. 양면지지형 테이블의 해석 및 실험적 검증)," 한국정밀공학회지, 제 19 권, 제 1 호, pp. 65-70, 2002.
3. 박천홍, 오윤진, 이찬홍, 홍준희, "전달함수를 이

용한 유정압테이블 운동정밀도 해석법의 제안
및 이론적 검증," 한국정밀공학회지, 제 19 권 제
5 호, pp. 56-63, 2002.

4. 박천홍, 정재훈, 이후상, 김수태, "서브미크론
가공진직도 측정장치 개발," 한국정밀공학회지,
제 17 권 제 5 호, pp. 124-130, 2000.