

## FEM 을 이용한 유정압테이블의 운동정밀도 해석 (2. 양면지지형 테이블의 해석 및 실험적 검증)

박천홍\*, 이후상\*, 김태형\*\*, 김민기\*\*

### Finite Element Analysis on the Motion Accuracy of Hydrostatic Table (2<sup>nd</sup>. Analysis and Experimental Verification on Double Sides Table)

Chun Hong Park\*, Husang Lee\*, Tae Hyoung Kim\*\* and Min Gi Kim\*\*

#### ABSTRACT

An analysis method for calculating motion accuracy of double sides hydrostatic table is proposed in this paper. In this method, profiles of each rails are assumed as periodic function, therefore it is represented as the sum of spacial frequencies. Bearing clearance at any position rail is depended on the variation of linear, angular motion error of table and the form errors of both sides of a rail. Finite element method is applied to calculate pressure distributions in bearing clearance. In order to simplify the analyzing process, double sides table model is converted into equivalent single side table model. Results calculated by the proposed modeling method agree well with the results directly calculated by double sides modeling method, and also agree well with experimental results. From the theoretical and experimental analysis, it is verified that the proposed analysis method is very effective to analyze the motion accuracy of double sides hydrostatic table.

**Key Words** : Hydrostatic table(유정압테이블), Motion accuracy(운동정밀도), Finite element analysis(유한요소해석)  
Double sides table(양면지지형 테이블), Equivalent single side table(등가 단면지지형 테이블)

#### 1. 서론

유정압테이블의 운동정밀도를 향상시키기 위한 수단으로는, 테이블의 운동정밀도를 좌우하는 가이드용 레일의 가공오차를, 래핑과 같은 수작업에 의해 보정하는 방법이 가장 보편적으로 사용되고 있다. 이러한 방법에 의하면 가장 안정적인 운동정밀도를 확보할 수 있으나 숙련자에 의한 마무리 작업후 테이블과 레일의 가조립상태에서 테이블의

운동정밀도를 측정하여 목표정도에의 도달여부를 확인하는 과정을 반복할 필요가 있다. 이러한 반복과정은 생산성과 정밀도의 재현성면에서 문제점을 주게 되며, 이러한 수작업과정이 고정밀 가공기의 생산능력 여부를 결정하는 노하우로 작용하게 된다.

이와 같이 숙련자의 경험에 의존하는 제작공정을 이론적으로 체계화하기 위한 한 가지 방법으로, 저자들은 단면지지형 유정압테이블을 대상으

2001년 3월 30일 접수

\* 한국기계연구원 자동화연구부 공작기계그룹

\*\* 대우종합기계(주) 공작기계연구소

로, 유한요소법을 이용하여 가공된 레일의 형상오차와 테이블의 설계조건으로부터 테이블의 운동정밀도를 해석할 수 있는 알고리즘을 제안한 바 있다<sup>1)</sup>. 그로부터 레일 형상오차의 각 공간주파수 성분은 운동정밀도에 미치는 영향을 산출하여 '유막의 평균화효과'를 정량적으로 파악함으로써 레일 형상오차와 테이블의 운동정밀도간의 관계를 규명하고, 베어링강성, 포켓크기, 외형치수 등 테이블 설계변수가 운동정밀도에 미치는 영향을 파악하였다. 또한 서로 다른 형상오차를 갖는 3 개의 레일에 대한 유정압테이블의 운동특성을 실험적으로 해석하고 이론치와의 비교를 통해 해석알고리즘의 타당성 검증도 수행한 바 있다.

본 논문에서는 이상의 결과를 기본으로하여, 실용상 많이 사용되는 양면지지형 유정압테이블에 대한 운동정밀도 해석방법을 제안하는 것을 목적으로 하고 있다. 해석에 있어서는 계산효율을 높이기 위해 양면지지형 테이블을 등가의 단면지지형 테이블로 모델링하고, 그에 의한 해석결과를 양면지지형 테이블에 대한 직접해석결과와 비교함으로써 제안한 해석모델의 타당성을 이론적으로 검증하였다. 또한 시험제작한 양면지지형 테이블에 대한 운동정밀도실험결과와, 등가의 단면지지형 테이블 모델에 대한 이론해석결과를 비교하는 것을 통해 실험적인 검증도 수행하였다.

2. 정적 평형상태의 모델링

단면지지형에서와 마찬가지로 해석을 위해 다음과 같이 세 가지의 조건을 가정한다.

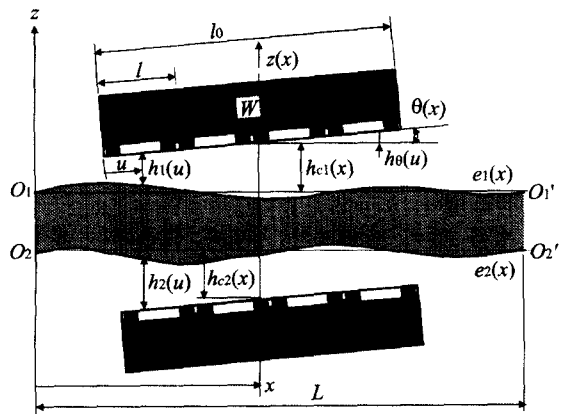


Fig. 1 Analysis model of double sides hydrostatic table

- ① 테이블측 형상오차에 의한 영향은 무시한다.(따라서 이하에서의 형상오차는 레일의 형상오차를 의미한다.)
- ② 레일의 형상오차는 주기함수로 나타낼 수 있다.
- ③ 레일의 폭방향 형상오차는 일정하다.

이상의 가정을 고려하면 유정압테이블이 레일상의 임의의 위치에서 정적 평형을 이룰 경우의 상태를 그림 1 과 같이 나타낼 수 있으며, 여기서 W는 테이블의 자중을 포함한 외부 하중, l<sub>0</sub>는 테이블의 길이, x는 테이블 중심의 레일상의 좌표, z(x) 및 θ(x)는 좌표 x에서의 테이블의 수직방향 직선변위 및 각변위를 각각 나타낸다. 한편 아래첨자 1, 2는 각각 상, 하부테이블에 관련된 변수임을 나타낸다.

상, 하부 레일의 형상오차 e<sub>1</sub>(x), e<sub>2</sub>(x)는 주기함수를 가정하였으므로 푸리에계수를 이용하여 식 (1), (2)와 같이 나타낼 수 있다. 단, 여기서 상부 레일은 윗방향, 하부 레일은 아래방향을 양의 값으로 하며, k는 레일의 길이 L에 대한 공간주파수 성분의 주기를 나타내며, n은 해석시에 고려되는 최대 주기이다.

$$e_1(x) = a_{10} + \sum_{k=0}^n \left( a_{1k} \cos \frac{2k\pi}{L}x + b_{1k} \sin \frac{2k\pi}{L}x \right) \quad (1)$$

$$e_2(x) = a_{20} + \sum_{k=0}^n \left( a_{2k} \cos \frac{2k\pi}{L}x + b_{2k} \sin \frac{2k\pi}{L}x \right) \quad (2)$$

이 때 테이블 선단을 기준으로한 상대좌표를 u로 하고, 상,하 레일기준선 O<sub>1</sub>-O<sub>1</sub>' 및 O<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>'에 대한 테이블 중심의 간극을 h<sub>c1</sub>(x), h<sub>c2</sub>(x)라고 하면, 테이블내 임의의 위치에 있어서의 간극 h<sub>1</sub>(u), h<sub>2</sub>(u)는 식(3)과 같이 각각 수직변위 h<sub>c1</sub>(x), h<sub>c2</sub>(x), 각변위 h<sub>θ</sub>(u) 및 레일형상오차에 의한 간극변화 e<sub>1</sub>(u), e<sub>2</sub>(u)의 합으로 나타낼 수 있다. 또한 이 때의 각 간극과 변위와의 관계는 식(4)와 같다. 여기서 z(x) 및 θ(x)는 x에서의 직선운동오차 및 각운동오차, h<sub>0</sub>는 오차를 고려하지 않은 설계간극, ε는 편심율로 하중에 의한 변위를 설계간극에 대한 비로 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} h_1(u) &= h_{c1}(x) - e_1(u) + h_{\theta}(u) \\ h_2(u) &= h_{c2}(x) - e_2(u) - h_{\theta}(u) \end{aligned} \quad (3)$$

$$x - \frac{l_0}{2} \leq u \leq x + \frac{l_0}{2}$$

$$\begin{aligned}
 h_{c1}(x) &= (1-\varepsilon)h_0 + z(x) \\
 h_{c2}(x) &= (1+\varepsilon)h_0 - z(x) \\
 h_{\theta}(u) &= \left(u - \frac{l_0}{2}\right)\theta(x)
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

### 3. 운동정밀도 해석

#### 3.1 양면지지형에 대한 직접 해석법

그림 2 에 양면지지형 유정압테이블의 운동정밀도를 직접 해석하기 위한 흐름도를 나타내었다. 먼저 임의의 점  $x$  에서의 직선운동오차와 각운동오차를 가정하고, 식(3)과 식(4)로부터 그 때의 베어링간극의 변화를 구해 양쪽 테이블의 압력분포를 구한다. 압력분포로부터 얻어진 유막반력의 차와 모멘트의 중심이 테이블의 하중조건과 실제 모멘트중심과 일치할 때까지 직선 및 각운동오차의 가정값을 변화시켜가며 반복하여 계산한다. 이때 양쪽 테이블에서의 압력분포는 유한요소법을 이용하여 계산하였으며 그에 따른 계산과정은 전편<sup>1)</sup>에 자세히 소개되어 있으므로 본 논문에서는 생략하였다.

#### 3.2 등가 단면지지형 모델에 의한 해석법

앞절에서의 직접해석법을 적용하는 경우, 양쪽 테이블에 대해 각각 압력분포를 구해야 하므로 계산시간은 단면지지형 테이블에 비해 두 배로 증가

하게 된다. 유막반력과 모멘트가 일치할 때까지의 반복계산에 있어서도 단면지지형에 비해 수렴에 필요한 계산회수는 일반적으로 증가하므로 많은 계산시간을 필요로 하게 된다. 또한 양쪽 레일의 다양한 형상변화에 따른 특성을 체계적으로 이해하기 어려운 단점도 있다.

한편, 양면지지형 테이블에 있어서의 운동정밀도를 고려하면, 그림 3(a)와 같이 양쪽 레일이 모두 형상오차를 갖지 않는 경우에 테이블의 운동정밀도는 이상적으로 0 이 된다. 또 다른 경우로는 그림 3(b)과 같이 양 레일이 모두 형상오차를 갖고 있어도 그 형상이 서로 대칭이면 그에 의한 테이블의 운동정밀도는 0 이 된다. 즉 테이블의 운동정밀도는 양 레일의 형상오차의 차에 의해 영향을 받는 것을 알 수 있다. 이를 이용하여 양면지지형 테이블을, 등가의 운동정밀도를 얻을 수 있는 단면지지형 테이블로 가정하여 정적 평형상태를 모델링하면 그림 4 와 같이 나타낼 수 있으며, 이를 위해 테이블의 수직방향 변위영역내에서 유막강성은 일정함을 가정한다. 이 가정에 의해 레일 형상오차에 의한 유막반력의 변화는 유막강성에 비례하게 되므로, 등가 단면지지형 모델에서의 레일의 형상오차  $e(x)$ , 베어링간극  $h$ , 유막강성  $K$  는 각

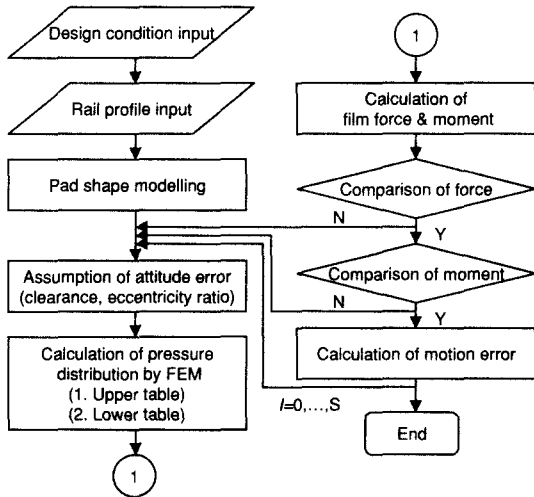


Fig. 2 Flow chart for calculating the motion error of double sides table

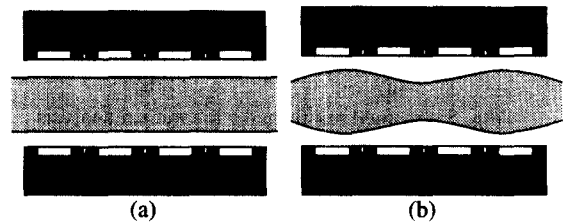


Fig. 3 Rail shapes for vanishing the motion error in double sides hydrostatic table

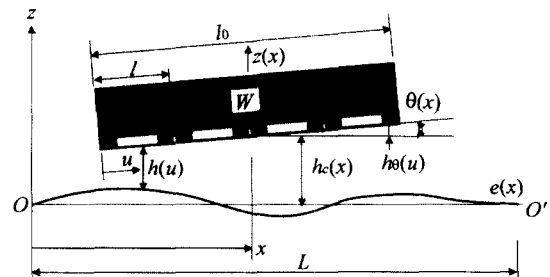


Fig. 4 Converted equivalent single side model of double side table

각 식(5)와 같이 나타낼 수 있다. 한편 정적평형상태에서 베어링간극  $h$  를 유지하기 위한 하중  $W$  는, 모세관 보상요소(restrictor)의 경우, 단면지지형 테이블에 있어서의 하중과 유막강성의 관계로부터 식(6)과 같이 나타낼 수 있다<sup>2)</sup>. 또한 양면지지형에서의 편심에 따른 양쪽 간극의 변화는 레일 형상오차에 있어서의 0 주기성분의 크기의 변화로 변환하여 나타낼 수 있으나, 실제로 이 성분은 테이블의 전체적인 높이의 변화에만 영향을 미치며 운동오차의 프로파일에는 영향을 주지 않으므로 계산시에는 무시할 수 있다. 여기서  $K_d$  는 양면지지형 테이블의 유막강성을 나타내며  $\bar{P}$  는 공급압력에 대한 포켓압력의 비를 나타낸다.

$$\begin{aligned} e(x) &= \{e_1(x) - e_2(x)\} / 2 \\ h(u) &= h_c(x) - e(u) + hg(u) \\ h_c(x) &= h_0 + z(x) \\ K &= K_d \\ W &= \frac{K_d h_0}{3(1 - \bar{P})} \end{aligned} \quad (5)$$

$$W = \frac{K_d h_0}{3(1 - \bar{P})} \quad (6)$$

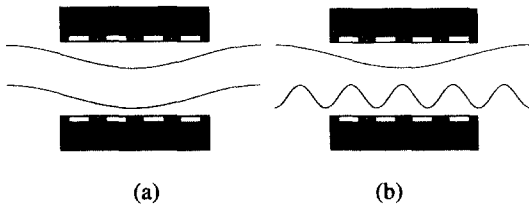


Fig. 5 Assumed rail form for theoretical analysis

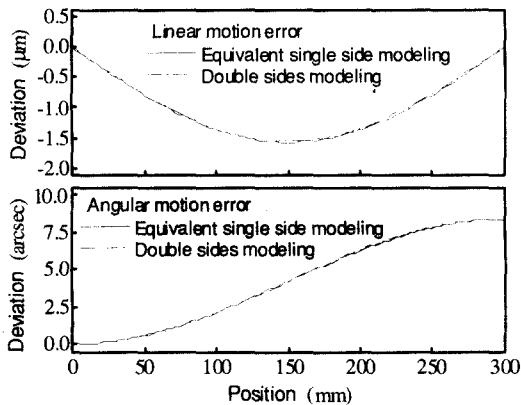


Fig. 6 Comparison of motion accuracies calculated by both analysis methods(1 period of rail profile)

### 3.3 해석법에 따른 이론해석 결과의 비교

해석법에 따른 결과를 비교하기 위해, 길이 300mm 의 양면지지형 테이블이, 길이 600mm 에 대해 양쪽 모두 같은 방향으로 1 주기성분만의 형상을 갖는 레일(그림 5(a)) 및 양쪽에 각각 1 주기와 5 주기의 형상을 갖는 레일(그림 5(b))위를 이동했을 때의 운동정밀도를 구해 비교하였다. 그림 6 은 1 주기의 형상오차만을 갖는 경우에 대한 운동정밀도를 해석한 결과를 나타낸 것으로, 양 결과는 잘 일치하고 있다.

그림 7 은 상측 레일이 1 주기의 형상오차를, 하측 레일이 5 주기의 형상오차를 각각 갖을 때의 운동정밀도를 계산하여 비교한 것이다. 양 레일의 형상오차가 서로 다를 경우에도 양 해석법에 의한 결과는 잘 일치하고 있다. 한편, 그림 6 및 그림 7 은 일반적인 유정압테이블용 레일의 가공오차수준인 진폭 2.5µm 의 레일에 대한 해석결과로, 이 범위 내에 있어 유막강성이 일정하다고 가정함에 따른 해석오차는 거의 없음을 알 수 있다. 따라서 등가의 단면지지형 테이블로 모델링하여 운동정밀도를 해석해도 양면지지형 테이블을 직접 해석한 것과 거의 동일한 운동정밀도를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

## 4. 실험적 검증

### 4.1 실험장치 및 실험방법

실험장치의 개략도를 그림 8 에 나타내었다. 테이블의 수평방향은 길이방향으로 3 개의 패드가

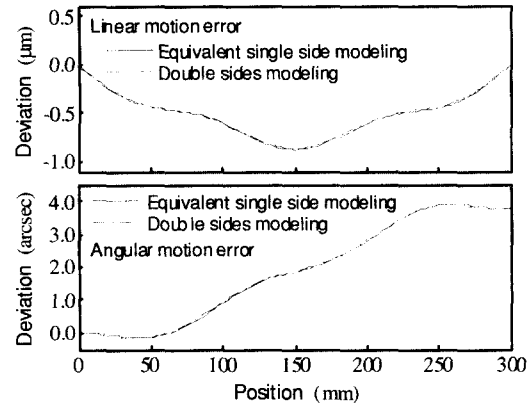


Fig. 7 Comparison of motion accuracies calculated by both analysis methods(1 and 5 periods of rail profile)

설치된 양면지지형 테이블로 되어 있으며, 수직방향은 테이블과 레일의 접촉이 없도록 역시 길이방향으로 3 개의 패드를 갖는 단면지지형 유정압테이블로 구성되어 있다. 테이블의 총 이송량은 145mm 이며 와이어로프와 스테핑모터를 이용하여 구동하였다. 표 1 에 실험용 유정압테이블의 제원을 나타내었다.

실험용 레일로는 서로 다른 형상오차를 갖는 레일 A 및 레일 B 를 사용하였으며, 진직도 측정장치(측정정밀도  $0.04\mu\text{m}$ )<sup>3)</sup>를 이용하여 측정된 결과를 그림 9 와 그림 10 에 나타내었다. 각 그림에는 등가 단면지지형 모델 해석에 사용된 양 레일의 차도 함께 나타내었다. 그림 11 은 레일 형상오차에 따른 운동오차를 분석하기 위해 레일 A, B 의 형상오차를, 레일길이를 기준으로하는 공간주파수별로 분석하여 30 주기 성분까지를 나타낸 것

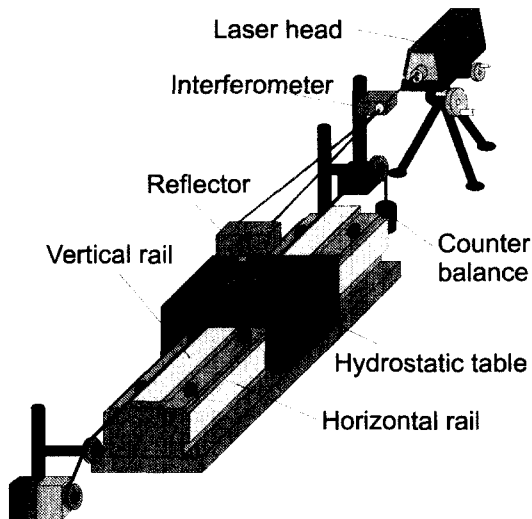


Fig. 8 Schematic diagram of experimental setup

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	$\beta$	0.70
Feeding parameter	$\xi$	1.0
Designed film clearance	$h_0$	$45 \mu\text{m}$
Supply pressure	$p_s$	1 Mpa

이다.

운동오차 측정시에 이송속도에 인한 동압효과가 발생하지 않도록 이송속도는  $1\text{mm/s}$  의 저속으로 하였으며, 이 때의 테이블의 운동오차는 레이저간섭계(HP5528A)를 이용하여 측정하였다.

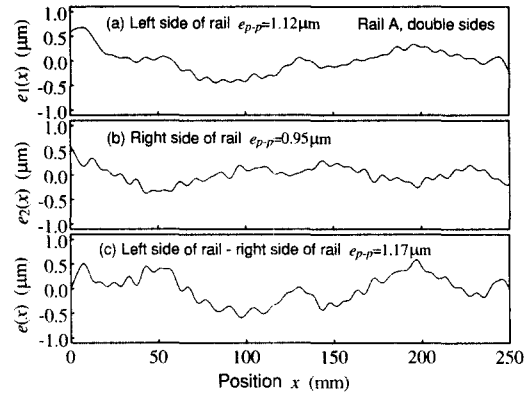


Fig. 9 Form errors of rail A

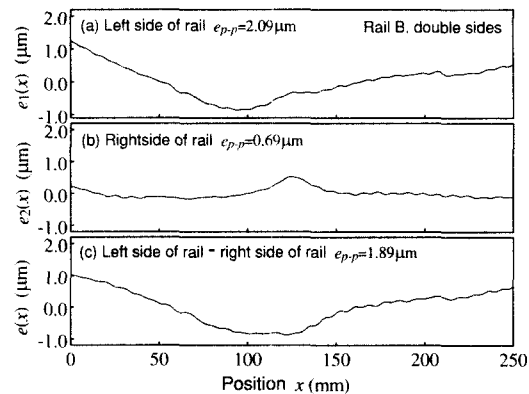


Fig. 10 Form errors of rail B

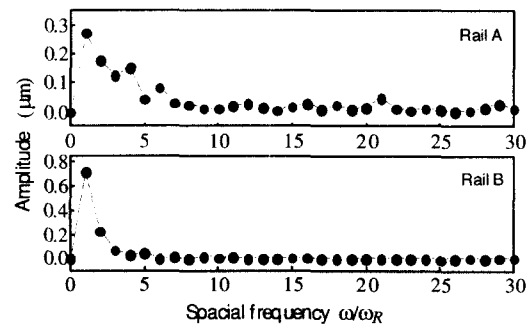


Fig. 11 Frequency components of rails

#### 4.2 실험결과 및 고찰

그림 12와 그림 13은 각각 레일 A, B에 대한 운동정밀도 실험결과를, 단면지지형으로 등가모델화하여 이론적으로 구한 해석결과와 함께 나타낸 것이다. 양 그림 모두에서 해석결과와 실험결과는 전체적으로 잘 일치함을 알 수 있다. 각운동오차에 있어 양 결과간의 미소한 차이는, 측정시 레이저간섭계 반사경의 전후방향 위치 및 와이어로프의 구동력 등에 의해 발생하는 초기모멘트, 구동점과 측정점의 위치차이에 의한 아베옵셋오차 등이 주요 원인으로 추정된다.

한편 양 그림의 운동오차 해석치를 비교하면, 양 레일 형상오차의 비(1.17/1.89)에 비해 직선운동오차의 비(0.19/0.38) 및 각운동오차의 비(1.85/3.69)

가 작아지고 있어 레일 A가 레일 B에 비해 우수한 정도 평균화효과를 가지고 있음을 나타내고 있으며, 실험결과도 같은 경향을 보이고 있다. 이것은 그림 11에서 알 수 있듯이, 레일 B의 경우 레일형상오차가 직선 및 각운동오차에 상대적으로 크게 영향을 미치는 1, 2주기 성분을 중심으로 구성되어 있는 데 반해, 레일 A의 경우에는 형상오차가 1~6주기 성분까지 다양하게 이루어져 있어 유막의 평균화효과가 커지기 때문이다.

이상의 결과로부터 본 논문에서 제안한 등가의 단면지지형 테이블 모델을 이용한 운동정밀도 해석법이 실제 양면지지형 테이블의 운동정밀도 해석에 매우 유효함을 확인할 수 있다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 양면지지형 유정압테이블의 운동오차를 이론적으로 계산할 수 있는 해석방법을 제시하고자 하였으며, 실제 이론해석에 있어서는 등가의 단면지지형 테이블로 모델링함으로써 양면지지형 유정압테이블의 운동정밀도를 효율적으로 해석할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 제안한 모델링방법에 의한 해석결과는 양면지지형 테이블에 대해 직접 해석한 결과와 거의 동일한 결과를 보여 제안한 해석모델의 타당성을 이론적으로 검증하였다. 또한 실험용으로 제작한 유정압테이블에 대한 운동정밀도 실험결과도 본 논문에서 제안한 해석모델에 의한 해석결과와 잘 일치하고 있어 제안한 해석 알고리즘이 실제 양면지지형 테이블의 운동정밀도 해석에 매우 유효함을 확인하였다.

#### 참고문헌

1. 박천홍, 정재훈, 이후상, 김수태, "FEM 을 이용한 유정압테이블의 운동정밀도 해석(1. 단면지지형 테이블의 해석 및 실험적 검증)," 한국정밀공학회지, 제 17 권, 제 12 호, p. 137, 2000.
2. 青山藤詞郎, "靜壓軸受-設計と應用," 工業調査會, 1990.
3. 박천홍, 정재훈, 김수태, 이후상, "서브미크론 진직도 측정장치 개발," 한국정밀공학회지, 제 17 권, 제 5 호, p. 124, 2000.

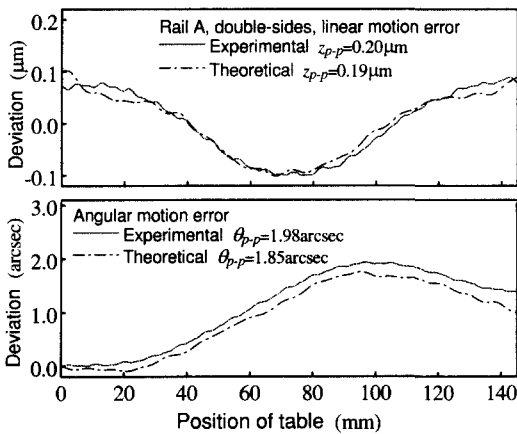


Fig. 12 Motion errors of double sides table on rail A

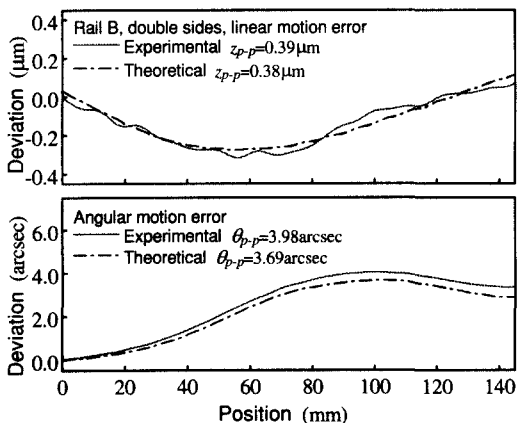


Fig. 13 Motion errors of double sides table on rail B