

# 초정밀 직선 스테이지에서 5 자유도 운동의 정적 및 동적 성능 평가

## Performance Evaluation of Five-DOF Motion under Static and Dynamic Conditions of Ultra-precision Linear Stage

이재창<sup>1</sup>, 이광일<sup>1</sup>, 양승한<sup>1,✉</sup>

Jae-Chang Lee<sup>1</sup>, Kwang-Il Lee<sup>1</sup>, and Seung-Han Yang<sup>1,✉</sup>

<sup>1</sup> 경북대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University)  
✉ Corresponding author: syang@knu.ac.kr, Tel: +82-53-950-6569

Manuscript received: 2014.1.8 / Revised: 2014.4.20 / Accepted: 2014.4.25

*In this study, the five-DOF motion at ultra-precision linear stage under static and dynamic conditions are evaluated through the extending application of ISO 230-2. As the performance factors, the bi-directional accuracy and repeatability of the five-DOF motion are quantitatively evaluated with the measurement uncertainties which are determined using the standard uncertainty of equipment used in experiment. The motion under static condition are analyzed using geometric errors. The five geometric errors except the linear displacement error are measured using optimal measurement system which is designed to enhance the standard uncertainty of geometric errors. In addition, the motion under dynamic conditions are analyzed with respect to the conditions with different feed rate of the stage. The experimental results shows that the feed rate of stage has a significant effect on straightness motions.*

Key Words: Ultra-precision linear stage (초정밀 직선 이송축), Performance evaluation (성능 평가), ISO 230-2 (국제 표준 ISO 230-2), Geometric error (기하학적 오차)

### 1. 서론

초정밀 공작기계에서 가공품의 형상 정확도는 직선 이송축의 다자유도 운동에 의해 많은 영향을 받는다.<sup>1,2</sup> 이송축의 다자유도 운동은 공작기계 성능을 저하시키는 다양한 오차들에 의해 발생한다. 이러한 오차들은 정적 오차와 준정적 오차, 동적 오차로 구분한다.<sup>3</sup> 정적 오차인 기하학적 오차는 이송축 부품들의 불완전한 기하학 및 치수에 의한 오차이고 준정적 오차는 열 변형에 의한 오차이다. 그리고 동적 오차는 진동 및 이송축의 가감속에 따른 힘에 의한 오차이다.<sup>4</sup> 본 연구에서는 기하학

적 오차와 동적 오차를 대상으로 정적 및 동적 조건에서 5자유도 운동을 분석한다.

기하학적 오차는 특성에 따라 PDGEs (Position Dependent Geometric Errors)와 PIGEs (Position Independent Geometric Errors)로 구분한다.<sup>5,6</sup> PDGEs는 이송축을 구성하는 부품들의 불완전으로 인해 발생하며, 이송축에 대해 위치 오차와 각도 오차로 정의한다.<sup>7</sup> PIGEs는 이송축간의 조립과정에서 발생하며 직각도 오차로 정의한다.

직선 이송축의 기하학적 오차를 측정하기 위해 다양한 측정 방법이 개발되었다. Fan<sup>8</sup>는 레이저 간섭계와 QPD (Quadrant Photo Detector)를 이용하여 6

자유도 오차 측정 시스템을 제안했고, Huang<sup>9</sup>는 PSD (Position Sensitive Detector)로 구성된 MDFM (Multi-Degree-of-Freedom Measurement)을 개발하여 5자유도 오차를 측정한다. 또한 Lee<sup>10</sup>는 정전용량 센서를 이용하여 MMT (Miniaturized Machine Tool)의 기하학적 오차 측정을 위한 시스템을 개발하였다. 그리고 Lee<sup>11</sup>는 측정된 기하학적 오차의 표준 불확도를 최소로 하기 위해 측정 시스템을 최적 설계하였다.

국제 표준 ISO 230-2는 무부하 조건에서 수직 제어 이송축을 평가하는 방법이다.<sup>12</sup> 레이저 간섭계를 이용하여 직선 이송축의 선형 위치 오차와 회전 테이블의 각도 위치 오차를 대상으로 이송축의 정확도와 정밀도를 평가한다. 그러나 이 방법은 정적 조건에서 직선 이송축의 선형 위치 오차만을 고려한다. 이송축의 성능을 정확하게 분석하기 위해서는 이송축의 다자유도 운동 평가가 요구되며, 기하학적 오차뿐만 아니라 동적 오차도 고려해야 한다. 산업 현장에서는 기하학적 오차만을 적용하여 활용하고 있는 실정이다. 그러므로 다자유도 운동의 정적 및 동적 성능을 정량적으로 분석하기 위한 이송축의 다자유도 운동 평가 방법이 필요하다.

본 연구에서는 국제 표준 ISO 230-2를 기반으로 하여 조정밀 직선 이송축에서 정적 및 동적 조건하에 이송축 5자유도 운동을 정량적으로 평가한다. 2장에서는 기하학적 오차의 표준 불확도를 최소를 위한 기준 좌표계의 위치를 최적화하고 오차 측정에 사용되는 센서와 기준 미러의 표준 불확도를 분석한다. 3장에서는 ISO 230-2를 기반으로 이송축의 5자유도 운동을 정량적으로 분석한다. 또한 이송 속도에 따른 이송축의 동적 운동을 평가한다. 마지막으로 4장에서는 본 연구를 정리 및 요약하여 결론을 나타내고 활용방안을 제시한다.

### 2.5 자유도 측정 시스템

최적 설계된 측정 시스템은 기준 미러와 5개의 정전용량 센서로 구성한다. 측정 시스템을 최적화하는 과정은 세 단계로 구분한다. 1단계는 센서 측정값의 표준 불확도를 분석하고, 2단계는 기준 좌표계 및 센서의 위치를 모델링하고 표준 불확도를 최소로 하는 위치를 결정한다.<sup>11</sup> 마지막으로 3단계는 센서의 수에 따른 표준 불확도를 분석하여 최적의 센서 수를 결정한다.

### 2.1 측정값의 표준 불확도 $u_{DEVICE}$

정전용량 센서 측정값의 표준 불확도  $u_{DEVICE}$ 는 실험에 사용된 기준 미러의 표준 불확도  $u_{MIRROR}$ 와 정전용량 센서의 표준 불확도  $u_{SENSOR}$ 에 의해 결정된다. 환경/셋업의 불확도는 표준 불확도  $u_{DEVICE}$ 에 영향을 미치지 않지만 본 연구에서는 오직 실험에 사용된 장비의 불확도를 고려하고 분석한다. 기준 미러의 표준 불확도는 형상 불확도  $m_{FLATNESS}^+$  -  $m_{FLATNESS}^-$ 에 가장 큰 영향을 받는다. 그리고 정전용량 센서의 표준 불확도에 영향을 미치는 불확도는 선형성  $s_{LINEARITY}^+$  -  $s_{LINEARITY}^-$ 과 분해능  $r$ 에 의해 결정된다. 여기서 형상, 선형성과 분해능 불확도의 확률분포는 균일 분포 (uniform distribution)을 따른다고 가정한다.<sup>13</sup> 정전용량 센서 측정값의 표준 불확도  $u_{DEVICE}$ 는 식(1)과 같이 계산된다.

$$u_{DEVICE} = \sqrt{(u_{SENSOR})^2 + (u_{MIRROR})^2} \quad (1)$$

여기서,

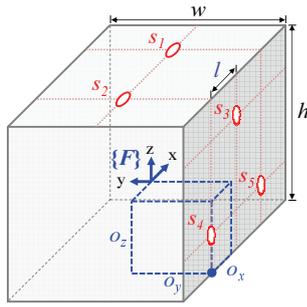
$$u_{SENSOR} = \sqrt{(u_{LINEARITY})^2 + (u_{RESOLUTION})^2}$$

$$= \frac{1}{2\sqrt{3}} \sqrt{(s_{LINEARITY}^+ - s_{LINEARITY}^-)^2 + r^2}$$

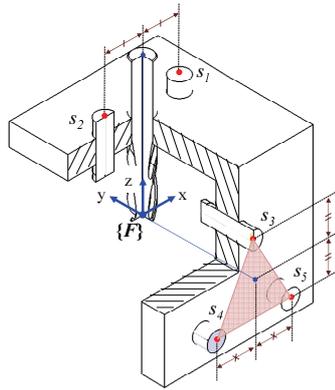
$$u_{MIRROR} = \frac{m_{FLATNESS}^+ - m_{FLATNESS}^-}{2\sqrt{3}}$$

### 2.2 기준 좌표계 및 센서 위치 최적화

정전용량 센서 측정값은  $m_i$  ( $i=1, \dots, 5$ )로 나타내며 아래 첨자는 정전용량 센서를 나타낸다. 기하학적 오차는 정전용량 센서 측정값  $m_i$ 의 조합으로 계산되기 때문에 측정된 오차의 표준 불확도는 아베 오차 (Abbe's error)에 의해 기준 좌표계  $\{F\}$ 와 센서  $s_i$  ( $i=1, \dots, 5$ )의 상대적 위치에 종속적이다. 그러므로 기준 좌표계  $\{F\}$  위치를 최적화하여 오차의 표준 불확도를 최소화한다.<sup>11</sup> 먼저, 기준 좌표계  $\{F\}$ 는 Fig. 1(a)와 같이 오프셋 ( $o_x, o_y, o_z$ )을 이용하여 모델링 한다. 추가적으로 센서  $s_3$ 는 변수  $l$ 을 이용하여 모델링 하여 센서  $s_3, s_4, s_5$ 간의 형상에 따른 영향을 분석한다. 여기서, 변수  $w, h$ 는 기준 미러에서 측정영역의 너비와 높이를 나타낸다. 모델링된 기준 좌표계로부터 각 센서  $s_i$ 의 위치를 정의하고 동차변환행렬로부터 측정값  $m_i$ 를 계산한다. 측정값  $m_i$ 를 이용하여 5개의 기하학적 오차 (수평 진직도 오차  $\delta_{yx}$ , 수직 진직도 오차  $\delta_{zx}$ , 롤 오차  $\epsilon_{yx}$ , 피치 오차  $\epsilon_{zx}$ , 요 오차  $\epsilon_{zx}$ )를 추정한다.



(a) Position modeling of reference coordinate system and sensor



(b) Optimal position of reference coordinate system

Fig. 1 Optimal design of 5-DOF measurement system<sup>11</sup>

다. 센서 측정값의 표준 불확도  $u_{DEVICE}$  가  $u_{DEVICE} = u_{DEVICE,1} = \dots = u_{DEVICE,4}$  로 가정하고<sup>14</sup> 기하학적 오차의 표준 불확도를 최소화하는 오프셋 및 변수를 계산하기 위해 편미분방정식 (Differential equation) 을 사용한다. 계산된 오프셋  $o_x, o_y, o_z$  와 변수  $l$  는 각각  $h/4, w/2, h/2$  그리고  $h/4$  이다. 계산된 결과를 이용하여 결정된 최적의 기준 좌표계 위치는 Fig. 1(b)와 같다. 이 때, 측정값과 기하학적 오차간의 관계는 식(2)와 같이 결정된다.

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{xx} &= -\frac{2}{h}m_3 + \frac{1}{h}m_4 + \frac{1}{h}m_5 \\
 \varepsilon_{yx} &= -\frac{2}{h}m_1 + \frac{2}{h}m_2 \\
 \varepsilon_{zx} &= -\frac{2}{h}m_4 + \frac{2}{h}m_5 \\
 \delta_{yx} &= \frac{1}{2}m_3 + \frac{1}{4}m_4 + \frac{1}{4}m_5 \\
 \delta_{zx} &= \frac{1}{2}m_1 + \frac{1}{2}m_2
 \end{aligned} \tag{2}$$

측면에 위치한 3개의 센서는 이등변 삼각형 형상을 나타내며 기준 좌표계는 중심에 위치함으로써, 평균 효과를 최대화한다. 기하학적 오차  $\varepsilon_{yx}, \varepsilon_{zx}, \delta_{zx}$  는 2개의 측정값을 이용하여 측정하며  $\varepsilon_{xx}, \delta_{yx}$  는 3개의 측정값을 이용한다. 그러므로 측정된 기하학적 오차  $\varepsilon_{xx}, \delta_{yx}$  의 표준 불확도는 식(3)과 같이 기하학적 오차  $\varepsilon_{yx}, \varepsilon_{zx}, \delta_{zx}$  의 표준 불확도와 대비하여 약 13.4% 감소한다. 즉, 상면에 3개의 정전용량 센서를 측면에 2개의 정전용량 센서를 설치하면 반대의 결과를 나타내며 상면에 추가로 1개의 센서를 이용하여 측정하는 경우 두 진직도 오차의 표준 불확도는 동일한 값을 가진다.

$$\begin{aligned}
 u(\varepsilon_{xx}) &= \frac{\sqrt{6}}{h}u_{DEVICE} \\
 u(\varepsilon_{yx}) &= \frac{2\sqrt{2}}{h}u_{DEVICE} \\
 u(\varepsilon_{zx}) &= \frac{2\sqrt{2}}{h}u_{DEVICE} \\
 u(\delta_{yx}) &= \frac{\sqrt{6}}{4}u_{DEVICE} \\
 u(\delta_{zx}) &= \frac{\sqrt{2}}{2}u_{DEVICE}
 \end{aligned} \tag{3}$$

### 2.3 센서 수의 최적화

기존 연구에서는 기준 좌표계 위치 선정의 중요성에 대해 고려하지 않고 일반적으로 센서에 위치한다. 상면에 2개의 센서가 위치하는 경우, 수직 진직도 오차 및 피치 오차 측정이 가능하며 진직도는 기준 좌표계를 설정한 센서의 측정값을 이용하여 측정한다. 단일의 센서 측정값을 이용하여 오차를 측정하므로 측정된 기하학적 오차는 센서의 표준 불확도에 직접적인 영향을 받는다.

그러나 기준 좌표계 위치를 최적화함으로써, 진직도 오차는 2개의 센서 측정값을 이용하여 측정한다. 따라서, 측정된 진직도 오차의 표준 불확도는 평균 효과로 인해 약 30% 감소하며 식(3)과 같다.

오차 측정을 위해 사용된 센서의 수는 시스템의 실용성을 위해 반드시 확인되어야 한다. 진직도 오차 측정을 위해 사용된 센서 수가 증가함에 따라 진직도 오차의 표준 불확실도는 감소하며 Fig. 2와 같다. 센서 3개를 이용하여 측정된 오차의 표준 불확도 계수는 2개를 이용한 경우와 비교하여 약 13% 감소한다. 그러나 표준 불확도 감소를

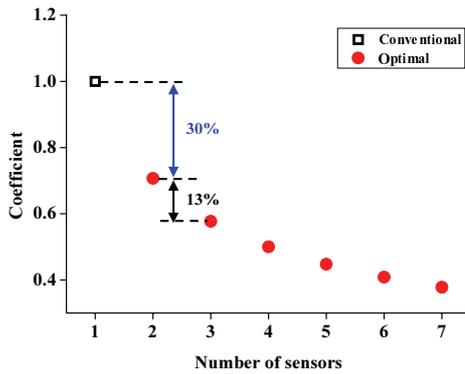


Fig. 2 Standard uncertainty according to number of sensors used in measurement

Table 1 Specification of the equipment

	Parameter	Specification
Reference mirror	Flatness	±30 nm, F.S.
	Width, <i>w</i>	35 mm
	Height, <i>h</i>	50 mm
Capacitive sensor	Range	±100 μm
	Linearity	±60 nm, F.S.
	Resolution	0.8 nm
Linear stage	Stroke	100 mm
	Resolution	10 nm
	Drives	Linear brushless servomotor

Table 2 Standard uncertainty of estimated errors

Parameter	Unit	Standard uncertainty	Measurement uncertainty
$u(\delta_{yx})$	nm	23.7	47.5
$u(\delta_{zx})$	nm	27.4	54.8
$u(\epsilon_{yx})$	arcsec	0.1	0.3
$u(\epsilon_{zx})$	arcsec	0.2	0.3
$u(\epsilon_{xx})$	arcsec	0.2	0.3

위해 추가적으로 사용된 센서의 측정 비용대비 큰 효율을 나타내지 못한다. 따라서 측정 비용 및 효율적인 면에서 2개의 센서를 활용하는 것이 타당하다. 본 연구에서는 이를 바탕으로 상면에는 2개의 센서를 옆면에는 3개의 센서를 설치하여 총 5자유도 기하학적 오차를 측정한다.

### 3. 이송축의 정적 및 동적 운동 평가

#### 3.1 정적 운동 평가

초정밀 이송축 (ABL1000, Aerotech Inc., U.S.A)의

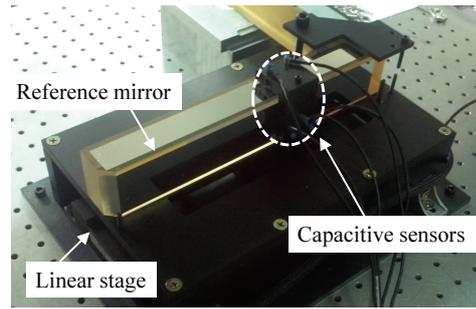


Fig. 3 Experiments for measurement of geometric errors

기하학적 오차는 정전용량 센서 (4810 module, 2812 probe, ADE Technology Inc., U.S.A)와 기준 미러 (Nitto Optical Co., Ltd., Japan)를 이용하여 측정한다. 아베 오차 (Abbe's error) 영향을 제거하기 위해 Fig. 3과 같이 실험 시 기준 미러는 고정되고 센서는 이송축을 따라 이송한다. 실험에서 사용한 장비의 성능은 Table 1과 같이 정리한다. 사용한 장비의 표준 불확도를 이용하여 계산된 기하학적 오차의 표준 불확도와 포함인자 (coverage factor,  $k=2$ )를 고려한 측정 불확도 (measurement uncertainty)는 Table 2와 같다.

측정은 0 ~ 100 mm 범위에서 각각 10 mm간격에 대해 정적으로 진행한다. 양방향에 대해 5회 반복 실험에서 획득한 측정된 오차의 평균값은 Fig. 4와 같다. 측정값은 기준 미러의 셋업 오차에 의해 큰 편차를 나타내며 셋업 오차의 영향을 최소화하기 위해 진직도 오차는 최소 자승법을 이용하여 추정한다. 최소 자승법에 의해 계산된 기울기 값을 이용하여 좌표변환을 함으로써 동일한 기준 좌표계  $\{F\}$ 에서 오차를 정의한다. 측정 결과에서 피치 오차는 상대적으로 다른 각도 오차보다 큰 값을 보인다. 이는 스테이지를 방진테이블에 고정하기 위해 사용된 치구의 평탄도에 의한 결과이다. 측정된 결과를 검증하기 위해 레이저 간섭계를 이용하여 기하학적 오차 (수평 진직도 오차, 수직 진직도 오차, 피치오차, 요오차)를 비교한다. 두 측정 시스템을 이용하여 측정된 결과의 차이는 Fig. 5와 같이 위치 오차는 0.2 μm이고 각도 오차는 0.11 arcsec이다. 이 차이는 레이저 간섭계의 측정 불확도 (measurement uncertainty) 수준 이내로 결과의 타당성을 검증한다.

5자유도 측정 시스템은 짧은 측정 시간에 5개의 기하학적 오차를 동시에 측정하므로 다른 측정 장비에 비해 상대적으로 환경적 요인 (온도, 습도,

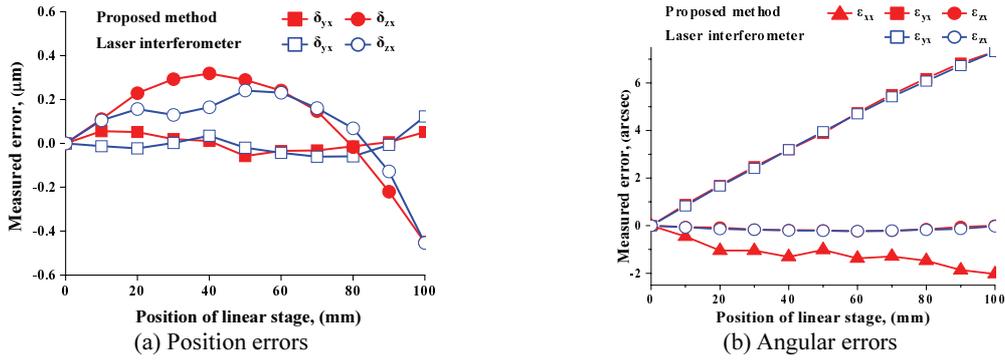


Fig. 4 Measured geometric errors under no-loaded condition

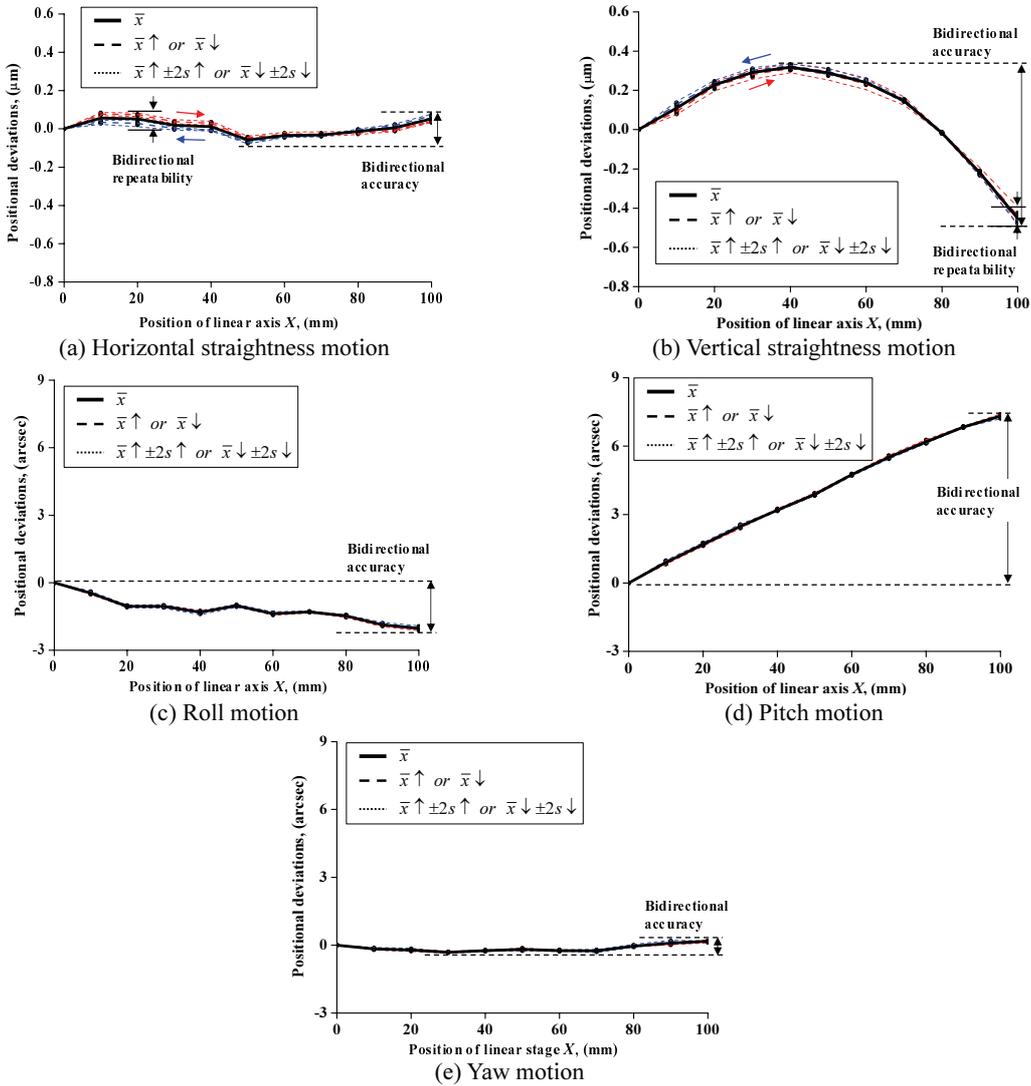


Fig. 5 Five-DOF motion under static condition

Table 3 Evaluation for five-DOF motion under static condition (unit:  $\mu\text{m}$ , arcsec)

Parameter		Unidirectional B	Unidirectional F	Bidirectional
Horizontal straightness motion	Mean reversal value	-	-	0.01
	Range mean bidirectional positional deviation M	-	-	0.11 $\pm$ 0.05
	Repeatability of positioning R	0.04	0.03	0.07
	Accuracy A	0.15 $\pm$ 0.05	0.15 $\pm$ 0.05	0.16 $\pm$ 0.05
Vertical straightness motion	Mean reversal value	-	-	-0.01
	Range mean bidirectional positional deviation M	-	-	0.77 $\pm$ 0.05
	Repeatability of positioning R	0.04	0.09	0.09
	Accuracy A	0.82 $\pm$ 0.05	0.82 $\pm$ 0.05	0.82 $\pm$ 0.05
Roll motion	Mean reversal value	-	-	-0.02
	Range mean bidirectional positional deviation M	-	-	2.03 $\pm$ 0.28
	Repeatability of positioning R	0.17	0.14	0.22
	Accuracy A	2.07 $\pm$ 0.28	2.13 $\pm$ 0.28	2.13 $\pm$ 0.28
Pitch motion	Mean reversal value	-	-	0.01
	Range mean bidirectional positional deviation M	-	-	7.32 $\pm$ 0.32
	Repeatability of positioning R	0.11	0.10	0.21
	Accuracy A	8.22 $\pm$ 0.32	8.23 $\pm$ 0.32	8.23 $\pm$ 0.32
Yaw motion	Mean reversal value	-	-	-0.07
	Range mean bidirectional positional deviation M	-	-	0.49 $\pm$ 0.32
	Repeatability of positioning R	0.14	0.13	0.23
	Accuracy A	0.54 $\pm$ 0.32	0.85 $\pm$ 0.32	0.85 $\pm$ 0.32

압력등)에 의한 영향을 최소화한다. 그러므로 정확한 기하학적 오차 측정이 가능하다.

국제 표준 ISO 230-2 를 기반으로 측정된 기하학적 오차를 이용하여 정적 조건에서의 5자유도 운동을 정량적으로 평가한다. 양방향에 대한 정확도와 반복 정밀도를 평가하였고 결과는 Table 3과 같다. 위치 운동과 각도 운동의 정확도는 각각 0.82  $\mu\text{m}$ , 8.23 arcsec이며, 반복 정밀도는 0.09  $\mu\text{m}$ , 0.23 arcsec이다. 이 때 이송축의 피치운동은 언급한 바와 같이 실험에 사용된 치구에 인해 큰 값을 가진다. 그러나 모든 각도 운동의 반복 정밀도는 0.2 arcsec로 유사한 값을 가지므로 평가 결과는 물리적으로 타당성을 나타낸다.

### 3.2 동적 운동 평가

이송축의 이송속도에 따른 5자유도 동적 운동을 평가한다. 실험 조건은 이송 속도를 10 mm/s, 50 mm/s 그리고 100 mm/s로 설정한다. 양방향에 대해 5회 반복 실험을 하였고 결과는 Fig. 6과 같다. 이송축의 각도 운동은 이송 속도와 상관없이 유사한 결과를 가진다. 그러나 진직도 운동은 고속 운동에서 이송축 끝단에서 큰 차이를 보이며, 이는 이송축의 가감속에 따른 힘에 의한 오차에 기인한 것으로 보인다. 기하학적 및 동적 조건에서의 5자

유도 운동의 반복 정밀도 및 정확도는 Table 4와 같이 정리한다. 5자유도 운동의 반복 정밀도는 기하학적 조건에서의 반복 정밀도보다 상대적으로 큰 값을 가진다. 또한, 수평진직도 운동은 정적 조건일 때와는 다른 경향을 보이며, 양 끝단에서 최대 0.13  $\mu\text{m}$  차이를 가진다.

### 4. 결론

기존 연구에서는 정적 조건에서 직선 이송축의 선형 위치 운동만을 평가하였으나, 이송축의 정확한 성능 분석을 위해서는 다자유도 운동 평가 방법이 필요하다. 본 연구에서는 정적 및 동적 조건하에 이송축의 5자유도 운동을 평가한다. 또한 다양한 이송 속도에 따른 이송축의 운동 경향을 분석하고 5자유도 운동 성능을 정량화한다.

차후 온도 환경을 실시간 측정하여 동일한 방법에 적용함으로써, 준정적/정적/동적 조건에서의 이송축의 성능을 평가하고자 한다. 정량화된 결과는 이송축의 보정 및 제어와 관련하여 피드백으로 활용함으로써 이송축 성능 향상에 기여를 할 수 있을 것이라고 사료된다. 이는 이송축의 위치 정확도를 향상시켜 최종적으로 가공품의 품질 정향도 향상에 기여할 것으로 기대된다.

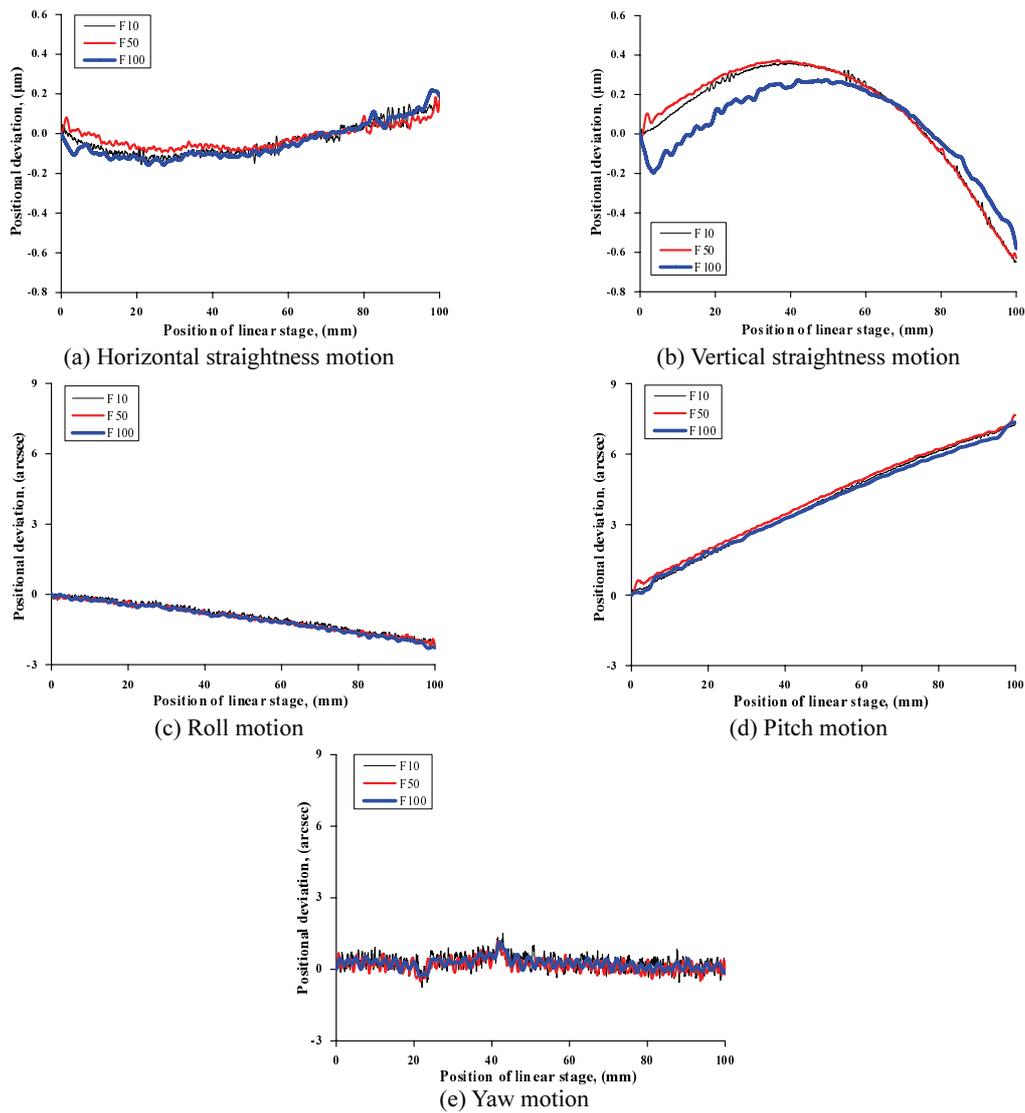


Fig. 6 Five-DOF motion under dynamic condition

Table 4 Evaluation for five-DOF motion under dynamic conditions (unit:  $\mu\text{m}$ , arcsec)

Parameter		Dynamic (10mm/s)	Dynamic (50mm/s)	Dynamic (100mm/s)
Horizontal straightness motion	Repeatability	0.22	0.34	0.35
	Accuracy	$0.45 \pm 0.05$	$0.56 \pm 0.05$	$0.40 \pm 0.05$
Vertical Straightness motion	Repeatability	0.28	0.19	0.15
	Accuracy	$1.11 \pm 0.05$	$1.12 \pm 0.05$	$0.99 \pm 0.05$
Roll motion	Repeatability	0.45	0.61	0.39
	Accuracy	$2.49 \pm 0.28$	$2.57 \pm 0.28$	$2.39 \pm 0.28$
Pitch motion	Repeatability	0.42	0.47	0.54
	Accuracy	$8.43 \pm 0.32$	$8.25 \pm 0.32$	$8.45 \pm 0.32$
Yaw motion	Repeatability	0.46	0.48	0.42
	Accuracy	$1.33 \pm 0.32$	$1.40 \pm 0.32$	$1.76 \pm 0.32$

## 후 기

이 논문은 2013년도 정부(교육부, 미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 대학중점연구소지원사업(No. 2010-0020089)과 기초연구사업(No. 2013 R1A2A2A01067917)으로 수행된 연구임.

## REFERENCES

1. ISO No. 230-1, "Test Code for Machine Tools-part 1: Geometric Accuracy of Machines Operating under No-load or Finishing Conditions," 1996.
2. Yang, S., Yuan, J., and Ni, J., "Accuracy Enhancement of a Horizontal Machining Center by Real-time Error Compensation," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 15, No. 2, pp. 113-124, 1996.
3. Ramesh, R., Mannan, M. A., and Poo, A. N., "Error Compensation in Machine Tools - A Review Part I : Geometric, Cutting-force Induced and Fixture-dependent errors," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 40, No. 9, pp. 1235-1256, 2000.
4. Schwenke, H., Knapp, W., Haitjema, H., Weckenmann, A., Schmitt, R., and Delbressine, F., "Geometric Error Measurement and Compensation of Machines - An Update," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 57, No. 2, pp. 660-675, 2008.
5. Lee, D. M., Zhu, Z., Lee, K. I., and Yang, S. H., "Identification and Measurement of Geometric Errors for a Five-Axis Machine Tool with a Tilting Head using a Double Ball-bar," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 12, No. 2, pp. 337-343, 2011.
6. Park, S. R. and Yang, S. H., "Design of a 5-axis Machine Tool Considering Geometric Errors," *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 24, No. 15-16, pp. 2484-2489, 2010.
7. Lee, D. M. and Yang, S. H., "Mathematical Approach and General Formulation for Error Synthesis Modeling of Multi-axis System," *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 24, No. 15-16, pp. 2737-2742, 2010.
8. Fan, K. C., Chen, M. J., and Huang, W. M., "A Six-degree-of-freedom Measurement System for the Motion Accuracy of Linear Stages," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 38, No. 3, pp. 155-164, 1998.
9. Huang, P. S. and Ni, J., "On-line Error Compensation of Coordinate Measuring Machines," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 35, No. 5, pp. 725-738, 1995.
10. Lee, J. H., Liu, Y., and Yang, S. H., "Accuracy Improvement of Miniaturized Machine Tool: Geometric Error Modeling and Compensation," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, No. 12-13, pp. 1508-1516, 2006.
11. Lee, K. I., Lee, J. C., and Yang, S. H., "The Optimal Design of a Measurement System to Measure the Geometric Errors of Linear Axes," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 66, No. 1-4, pp. 141-149, 2013.
12. ISO No. 230-2, "Test Code for Machine Tools-part 2: Determination of Accuracy and Repeatability of Positioning Numerically Controlled Axes," 2006.
13. ISO/IEC GUIDE 98-3, "Uncertainty of Measurement-part 3: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM:1995)," 1995.
14. ISO/TR 230-9, "Test Code for Machine Tool-Part 9: Estimation of Measurement Uncertainty for Machine Tool Tests according to Series ISO 230, Basic Equations," 2005.