

초정밀 롤 금형 가공기의 기하학적 오차 측정 방법: 모의실험

Measurement Method for Geometric Errors of Ultra-precision Roll Mold Machine Tool: Simulation

이광일¹, 양승한^{1,✉}
Kwang-Il Lee¹ and Seung-Han Yang^{1,✉}

¹ 경북대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.)
✉ Corresponding author: syang@knu.ac.kr, Tel: +82-53-950-6569

Manuscript received: 2013.7.30 / Accepted: 2013.9.23

In this study, a measurement method of double ball-bar is proposed to measure the geometric errors of an ultra-precision roll mold machine tool. A volumetric error model of the machine tool is established to investigate the effects of the geometric errors to a radius error and a cylindricity of the roll mold. A measurement path is suggested for the geometric errors, and a ball-bar equation is derived to represent the relation between the geometric errors and a measured data of the double ball-bar. Set-up errors, which are inevitable at the double ball-bar installation, also are analyzed and are removed mathematically for the measurement accuracy. In addition, standard uncertainty of the measured geometric errors is analyzed to determine the experimental condition. Finally, the proposed method is tested and verified through simulation.

Key Words: Geometric Errors (기하학적 오차), Standard Uncertainty (표준 불확도), Double Ball-bar (볼바), Ultra-precision Machine Tool (초정밀 가공기), Roll Mold (롤 금형)

기호설명

L = measurement distance of roll mold, mm .
 R = nominal length of double ball-bar, μm .
 $R + \Delta R$ = measured data of double ball-bar, mm .
 c = nominal angle of rotary axis C , rad .
 k = coverage factor for measurement uncertainty.
 n_z = number of measurement position along z -direction.
 n_c = number of sample angle of rotary axis C , rad .
 o_{xc}, o_{yc} = offset errors of rotary axis C along x -, y -direction, respectively, μm .
 r = nominal radius of roll mold, mm .
 s_{xc}, s_{yc} = squareness errors of rotary axis C along x -, y -direction, respectively, μrad .
 u_{DBB} = standard uncertainty of double ball-bar, μm .

(w_{xi}, w_{yi}, w_{zi}) = set-up error of the ball on rotary table at i -th measurement position ($i=1, \dots, n_z$).
 x, z = nominal position for linear axis X, Z , mm .
 $\{i\}$ = coordinate system of axis i ($i = X, Z, C$).
 τ_i^j = 4×4 homogeneous transformation matrix from j -coordinate system to i -coordinate system.

1. 서론

공작기계는 공구와 공작물 사이의 상대 위치 및 방향을 제어하여 부품을 가공하며, 부품 형상에 따라 다양한 구조를 나타낸다.^{1,2} 최근 초정밀 공작기계는 렌즈 금형, 광학계, LCD 부품 가공을 위해 산업에 적용되고 있으며,³ 특히 광학필름의 연속 생산 및 생산성 향상을 위해 초정밀 롤 금형

가공기가 연구 및 개발되고 있다.⁴

공구와 공작물 사이의 위치, 방향 정확도는 기하학적, 열변형, 동적 오차 등의 다양한 원인에 의해 저하된다.⁵ 특히 기하학적 오차는 end-effector에 큰 영향을 미치는 주요 오차이며, 이를 측정하기 위해 다양한 연구가 진행되고 있다.⁶⁻⁸ 동작기계는 직선 이송축 및 회전 이송축으로 구성하며, 직선 이송축의 기하학적 오차는 다양한 방법을 통해 측정한다.^{9,10} 하지만 회전 이송축의 기하학적 오차 측정은 제한적으로 진행되었으며, 일부 연구만 알려져 있다.^{11,12}

볼바는 고정밀 5축 동작기계에서 회전 이송축의 기하학적 오차를 측정하기 위해 사용되었으며, 측정은 회전 이송축 및 2개 직선 이송축의 동시 구동을 통해 진행한다.¹³ 기하학적 오차는 볼바 측정데이터의 편심을 사용하여 계산하며, 기하학적 오차를 측정하기 위해 반경 방향 (radial-direction) 및 축 방향 (axial-direction)의 측정 경로가 필요하다. 이와 유사한 측정 방법으로 3자유도의 측정시스템을 사용하는 R-test가 있다.¹⁴ R-test는 정밀한 구 (precision sphere)의 중심 좌표를 측정하여 기하학적 오차를 동시에 측정하는 장점이 있지만 복잡한 교정작업이 필요하다.¹⁵ 측정에서 직선 이송축의 구동에 따른 불확도(uncertainty)를 최소화하기 위해 회전 이송축만을 구동하는 방법이 있다.^{16,17} 또한 정밀한 구의 기상측정 (on machine measurement)을 통해 회전 이송축의 기하학적 오차를 측정하는 방법이 있다.¹⁸ 이러한 측정방법은 측정에서 회전 이송축뿐만 아니라 2개 이상의 직선 이송축이 구동되어야 하는 제약이 있다. 하지만 초정밀 롤 금형 가공기는 일부 직선 이송축의 이송 거리가 짧고, 2개 직선 이송축이 이루는 평면이 회전 이송축과 수직을 이루지 않기에 기존 측정 방법을 적용하는 것은 문제가 된다.¹⁹

본 논문에서는 초정밀 롤 금형 가공기의 기하학적 오차를 측정하기 위한 볼바 측정 방법을 제안한다. 제안한 측정 방법은 1개 회전 이송축 및 1개 직선 이송축을 사용한다. 일반적으로 볼바는 고정밀 동작기계의 오차 평가 및 측정에 사용하지만, 본 논문에서는 초정밀 롤 금형의 반지름 오차 (radius error) 및 원통도 (cylindricity) 측정을 위해 볼바를 사용한다. 반지름 오차 및 원통도는 롤 금형의 형상 정확도에 영향을 미치는 대표 변수이며, 가공 및 조립 과정에서 작업자의 숙련도에 의해 많은 영향을 받는다. 따라서 초정밀 롤 금형의 형

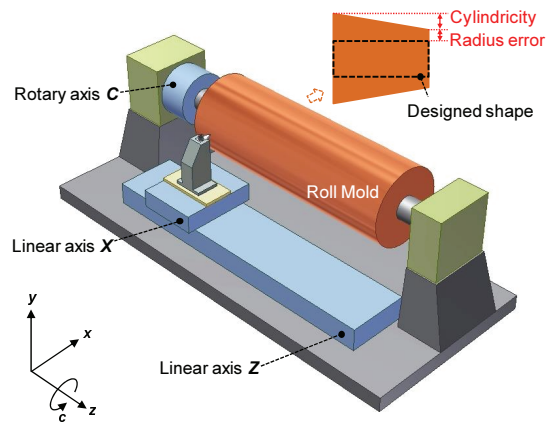


Fig. 1 Configuration of an ultra-precision roll mold machine tool

상 정확도에 영향을 미치는 주요 기하학적 오차를 분석하고, 이를 위한 볼바 측정 방법을 제안한다. 측정 결과의 측정 불확도 (measurement uncertainty)를 분석하여 볼바 측정 조건을 결정하고, 모의실험을 통해 측정 방법의 타당성을 확인한다.

2. 기하학적 오차 측정 방법

초정밀 롤 금형 가공기는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 1개 회전 이송축 C와 2개 직선 이송축 X, Z로 이루어지며, 회전 이송축 상에 고정된 롤 형상의 공작물에 V-groove와 같은 미세 패턴을 가공한다. 일반적으로 가공 표면은 수 nm의 표면 거칠기 (Ra)를 나타낸다. 그러나 가공기의 기하학적 오차에 의하여 공구와 공작물 사이의 정확도가 저하되며, 최종 가공 롤 금형은 반지름 오차 및 일정 경사의 원통도를 나타낸다.

2.1 체적 오차 모델링

회전 이송축의 기하학적 오차는 지령 위치 (command position)에 따라 변하는 위치 종속 오차 (position-dependent geometric errors; PDGEs)와 지령 위치와 상관없이 일정한 값을 나타내는 위치 독립 오차 (position-independent geometric errors; PIGEs)로 정의한다.²⁰ PDGEs는 이송축 구성품의 형상 오차에 의하여 많은 영향을 받는다. 이와는 반대로 PIGEs는 이송축 간의 조립과정에서 주로 발생하며 작업자의 숙련도에 의해 많은 영향을 받기 때문에 상대적으로 PDGEs보다 큰 값을 나타낸다.

Table 1 Geometric errors of a rotary axis

Presented		At ISO	
PIGEs	o_{xc}	XOC	Location errors
	o_{yc}	YOC	
	s_{xc}	AOC	
	s_{yc}	BOC	

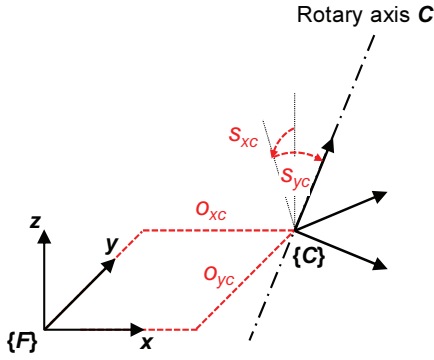


Fig. 2 PIGEs of rotary axis C

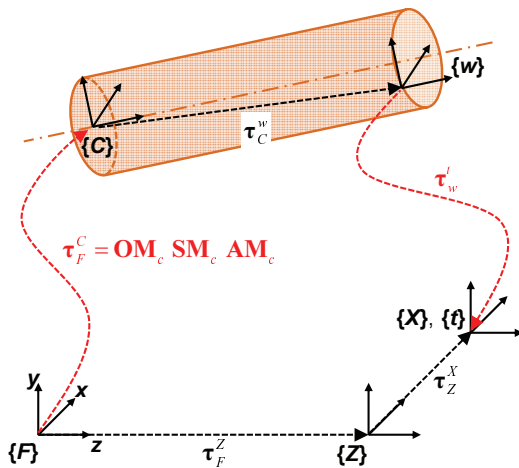


Fig. 3 Kinematic model of the machine tool

본 논문에서는 Fig. 2 및 Table 1에 나타난 회전축 C의 PIGEs를 초정밀 롤 금형 가공기에 적용하고, 롤 금형의 형상에 영향을 미치는 주요 기하학적 오차를 결정 및 측정한다. PIGEs에 의한 공구와 공작물의 위치는 Fig. 3과 같이 동차변환행렬(homogeneous transformation matrix)를 사용하여 나타내며 식 (1)과 같다.²¹

$$\begin{aligned} \tau_F^I &= \tau_F^Z \tau_Z^X \tau_X^I \\ \tau_F^w &= \tau_F^C \tau_C^w \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,

$$\tau_F^Z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tau_Z^X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tau_X^I = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$\tau_F^C = OM_c SM_c AM_c, \tau_C^w = (AM_c)^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -r \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$OM_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & r + o_{xc} \\ 0 & 1 & 0 & o_{yc} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, SM_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & s_{yc} & 0 \\ 0 & 1 & -s_{xc} & 0 \\ -s_{yc} & s_{xc} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$AM_c = \begin{bmatrix} \cos c & -\sin c & 0 & 0 \\ \sin c & \cos c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

를 나타낸다.

체적 오차 (volumetric error)는 식(2)와 같이 공작물 좌표계 {w}에서 나타낸 공구 좌표계 {F}로 나타내며, PIGEs에 의해 발생하는 롤 금형의 형상 오차를 의미한다.

$$\begin{aligned} \tau_w^I &= (\tau_F^w)^{-1} \tau_F^I \\ &= [-o_{xc} - z s_{yc} \quad -o_{yc} + z s_{xc} \quad -r s_{yc} \quad 1]^T \end{aligned} \quad (2)$$

체적 오차의 x-방향 성분 $-o_{xc} - z s_{yc}$ 은 롤 금형의 반지름에 직접 영향을 미치며, z 방향 지령 위치의 증가에 따라 일정 경향을 나타낸다. 이와는 반대로 체적 오차의 y-방향 성분 $-o_{yc} + z s_{xc}$ 은 반경 방향에 수직인 방향으로 주어지며, 이에 따라 롤 금형의 반지름에 큰 영향을 나타내지 않는다. 체적 오차의 z-방향 성분은 지령 위치와 연관이 없으며, 일정한 값을 나타내기 위해 롤 금형의 반지름에 영향이 없다. 따라서 롤 금형의 반지름 오차 및 원통도를 파악하기 위해서 PIGEs 중 오프셋 오차 o_{xc} , 직각도 오차 s_{yc} 의 측정이 필요하다.

2.2 측정 경로 및 볼바 방정식

오프셋 오차 o_{xc} 와 직각도 오차 s_{yc} 를 측정하기 위한 볼바 셋업 및 측정 경로는 Fig. 4와 같으며, 기준 좌표계 {F}에서 나타낸 볼바의 볼 TB, WB의

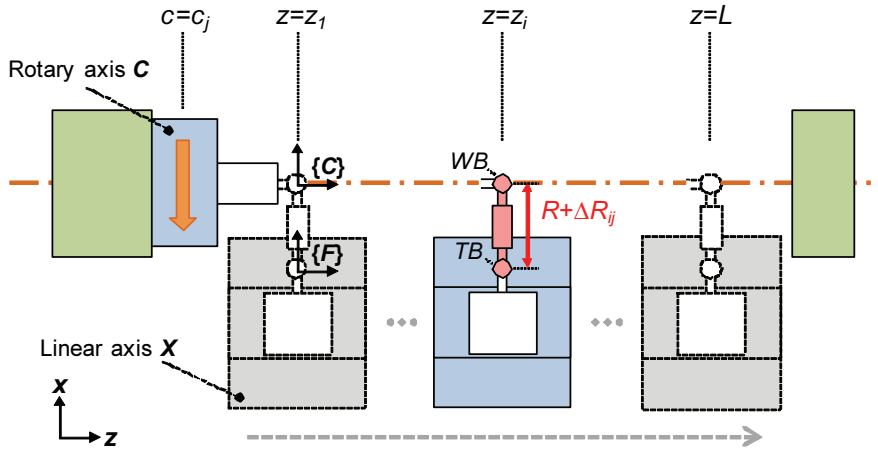


Fig. 4 Measurement path of double ball-bar for geometric errors

위치 **TB**, **WB** 및 볼바 방정식은 식(3)과 같다. 여기서 z_i ($i=1, \dots, n_z$)는 i 번째 측정 위치를 위한 직선 이송축 **Z**의 지령 위치를 나타낸다. 또한 c_j ($j=1, \dots, n_c$)는 각각의 측정 위치에서 회전 이송축 **C**의 지령 위치를 의미한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{TB} &= [0 \ 0 \ z_i \ 1]^T \\ \mathbf{WB} &= \mathbf{r}_F^C [w_{xi} \ w_{yi} \ z_i + w_{zi} \ 1]^T \\ (R + \Delta R_{ij})^2 &= \|\mathbf{TB} - \mathbf{WB}\|^2 \\ \therefore \Delta R_{ij} &= o_{xc} + z_i s_{yc} + w_{xi} \cos c_j - w_{yi} \sin c_j \end{aligned} \quad (3)$$

오프셋 오차 o_{xc} , 직각도 오차 s_{yc} 및 셋업 오차 (w_{xi} , w_{yi})는 식(3)에 최소자승법을 적용하여 일반적으로 계산한다.¹⁶ 그러나 볼 **WB**의 위치는 치구의 자중에 의해 영향을 받으며, 셋업 오차 (w_{xi} , w_{yi} , w_{zi})는 지령값 c_j 에 따라 변동한다. 최종적으로 오프셋 오차 o_{xc} 와 직각도 오차 s_{yc} 의 측정 정확도를 저하시킨다. 자중에 의한 문제는 지령 위치를 $c_j = 0, c_2 = \pi$ 로 설계하여 최소화한다. 따라서 식(3)은 식(4)로 주어지며, 식(4)의 해 (solution)는 식(5)와 같다.

$$\begin{aligned} \Delta R_{i1} + \Delta R_{i2} &= 2o_{xc} + 2z_i s_{yc} \\ \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta R_{i1} + \Delta R_{i2} \\ \vdots \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \vdots \\ 2 \quad 2z_i \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} o_{xc} \\ s_{yc} \end{bmatrix} \\ \mathbf{b} &= \mathbf{Ax} \\ \therefore \mathbf{x} &= (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} o_{xc} \\ s_{yc} \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n_z} z_i^2 \sum_{j=1}^{n_c} \Delta R_{ij2} - \sum_{i=1}^{n_z} z_i \sum_{j=1}^{n_c} z_i \Delta R_{ij2} \\ - \sum_{i=1}^{n_z} z_i \sum_{j=1}^{n_c} \Delta R_{ij1} + n_z \sum_{j=1}^{n_c} z_i \Delta R_{ij1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \Delta R_{ij2} &= \Delta R_{i1} + \Delta R_{i2} \\ D &= 2n_z \sum_{i=1}^{n_z} z_i^2 - 2 \left(\sum_{i=1}^{n_z} z_i \right)^2 \end{aligned}$$

를 나타낸다.

측정한 오프셋 오차 o_{xc} 와 직각도 오차 s_{yc} 는 볼바의 표준 불확도 u_{DBB} 에 의하여 각각 표준 불확도 $u(o_{xc})$, $u(s_{yc})$ 를 나타내며, 식(6)과 같다.²²

$$\begin{bmatrix} u(o_{xc}) \\ u(s_{yc}) \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{D} \begin{bmatrix} \sqrt{n_z^2 \left(\sum_{i=1}^{n_z} z_i^2 \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{n_z} z_i \right)^4} \\ \sqrt{2n_z \sum_{i=1}^{n_z} z_i} \end{bmatrix} u_{DBB} \quad (6)$$

3. 모의실험

제안한 방법의 타당성을 나타내기 위해 모의실험을 진행하며, 모의실험에 사용한 변수는 Table 2와 같다. 여기서 볼바 및 가공기 관련 변수는 각각 QC-20w (Renishaw plc., UK), Nanoform DRL1400 (AMETEK Precitech Inc., USA)의 값을 나타낸다.^{19,23}

표준 불확도 $u(o_{xc})$, $u(s_{yc})$ 는 식(6)을 사용하여 측

Table 2 Parameter for simulation

Parameter		Unit	Specification
machine tool	r	mm	250
	L	mm	1480
double ball-bar	R	mm	150
	u_{DBB}	μm	0.12
PIGEs	o_{xc}	μm	10
	o_{yc}	μm	-28
	s_{xc}	μrad	23
	s_{yc}	μrad	17
experiment condition	k	-	2
	(w_{xi}, w_{yi}, w_{zi})	μm	± 20
	noise level	μm	± 1

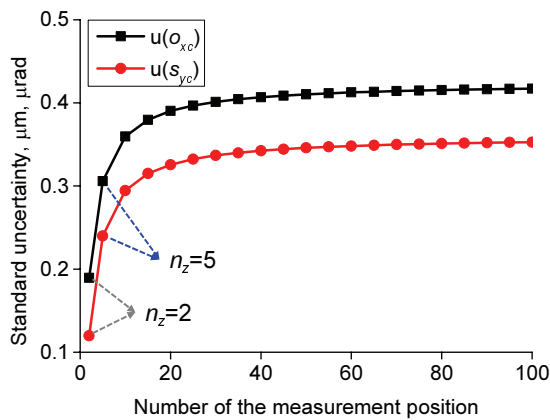


Fig. 5 Standard uncertainty according to the number of the measurement position

정수 n_z 에 따라 계산하였으며, Fig. 5와 같다. 측정 수 n_z 의 증가에 따라 표준 불확도 $u(o_{xc})$, $u(s_{yc})$ 가 증가하며, 최소값은 측정수 n_z 가 2인 경우 각각 $0.189 \mu\text{m}$, $0.12 \mu\text{rad}$ 을 나타낸다. 그러나 측정과정에서 발생할 수 있는 추가적인 불확도 요인을 고려하여 측정수 n_z 가 5인 경우에 대해 모의실험을 Fig. 6과 같이 진행한다. 측정수 n_z 가 5인 경우 오프셋 오차 o_{xc} 와 직각도 오차 s_{yc} 의 표준 불확도 및 측정 불확도는 Table 3과 같다.

모의실험 변수를 사용하여 계산한 볼바 측정데이터 $R+\Delta R_{ij}$ ($i=1, \dots, n_z; j=1, 2$)는 Fig. 7과 같으며, 셋업 오차 (w_{xi}, w_{yi}, w_{zi})에 의하여 불규칙한 형태를 나타내지만 동일한 측정위치에서의 평균값 $R+(\Delta R_{i1} + \Delta R_{i2})/2$ 은 일정한 경향을 보인다. 측정데이터 $R+\Delta R_{ij}$ 를 사용한 모의실험 결과는 Table 4와 같으며, 생성한 값과 비교하면 매우 미소한 차이를 나

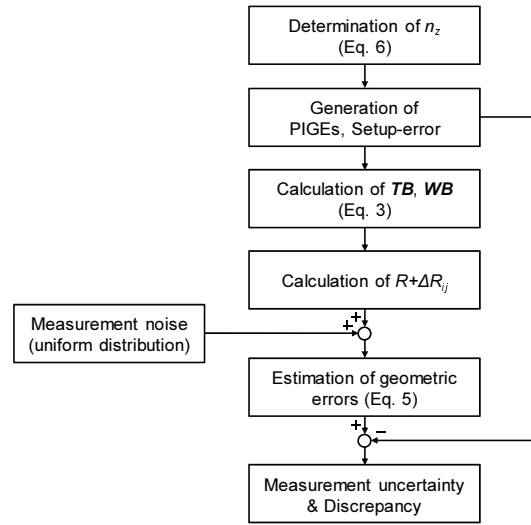


Fig. 6 Simulation procedure

Table 3 Standard/Measurement uncertainty with $n_z = 5$

	Unit	Standard uncertainty, u	Measurement uncertainty, U
o_{xc}	μm	0.3	0.6
s_{yc}	μrad	0.24	0.48

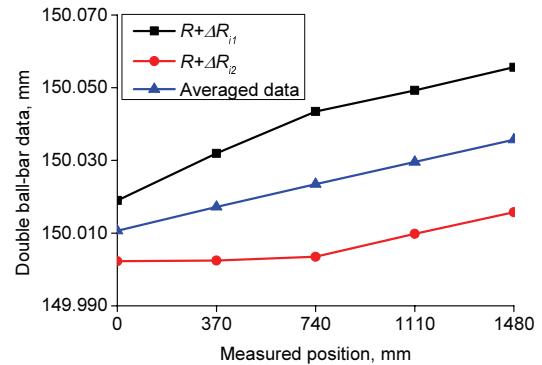


Fig. 7 Calculated data for simulation

Table 4 Simulation result for the PIGEs

	Unit	Generated value	Simulated value	Discrepancy
o_{xc}	μm	10	10.5	-0.5 ± 0.6
s_{yc}	μrad	17	17.02	-0.02 ± 0.48

타낸다. 모의실험 결과를 보정하면²⁴ 롤 금형의 반지름 오차 및 원통도는 각각 $-1.1 \sim 0.1 \mu\text{m}$, $-0.74 \sim 0.68 \mu\text{m}$ 을 예상하며, 이러한 측정 정확도는 본 논

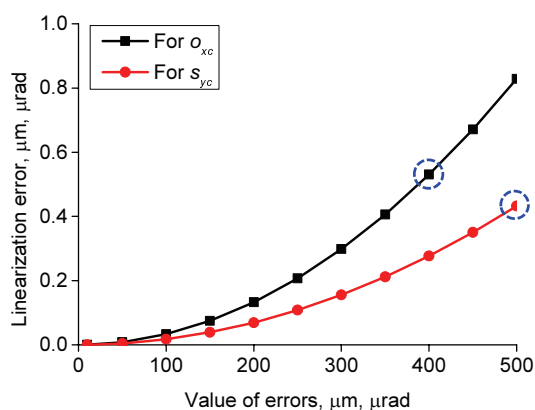


Fig. 8 Linearization error for ball-bar equation

문에서 제안한 방법이 측정 불확도를 고려하는 경우 현장에 적용이 가능한 것을 나타낸다.

동차변환행렬을 사용하여 식(3)의 선형 불바 방정식을 구하는 경우 기하학적 오차 및 셋업 오차는 수십 μm 수준으로 가정하며, 이에 따라 오차의 고차항은 고려하지 않는다. 그러나 오차의 크기에 따라 측정 결과가 부정확할 수 있으며, 불바 방정식의 선형화 오차(linearization error)를 Fig. 8과 같이 계산하였다. 선형화 오차는 생성 값에서 모의실험 값을 뺀 값의 절대값을 나타낸다. 오프셋 오차 o_{xc} 와 직각도 오차 s_{ye} 의 크기가 각각 400 μm, 500 μrad인 경우 선형화 오차는 0.53 μm, 0.43 μrad이며, 이는 Table 3의 측정 불확도와 비슷한 값을 나타낸다. 측정된 기하학적 오차 o_{xc} , s_{ye} 가 각각 400 μm, 500 μrad 보다 큰 경우에는 선형화 오차가 측정 불확도 보다 큰 값을 나타내기 때문에, 측정된 오차를 보정하고 재 측정을 진행하여 선형화 오차의 측정 결과에 대한 영향을 감소시킨다.

4. 결론

본 논문에서는 초정밀 롤 금형 가공기의 기하학적 오차를 측정하기 위한 방법을 제안하고, 측정 불확도의 분석 및 모의실험을 통해 제안한 방법의 타당성을 확인하였다. 이를 위해 초정밀 가공기의 체적오차 모델을 구하였으며, 롤 금형의 반지름 오차 및 원통도에 영향을 미치는 주요 기하학적 오차를 분석하였다. 또한 주요 오차를 측정하기 위하여 측정 경로, 해석 알고리즘을 제안하였으며, 측정 불확도의 분석을 통해 실험 조건을 선정하였다.

측정한 기하학적 오차를 보정하면 롤 금형의 형상 정확도는 1 μm 수준으로 개선이 가능하며, 이는 정확한 형상의 롤 금형 가공을 통하여 고품위의 광학필름 생산에 기여할 것이다. 또한 설계 공차를 충족시키기 위한 현장 작업자의 교정 작업을 최소화하여 동작기계 및 롤 금형의 개발 주기를 단축하는 장점이 있다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 대학중점연구소지원사업으로 수행된 연구임(2010-0020089).

참고문헌

1. Dassanayake, K. M., Tsutsumi, M., and Saito, A., "A Strategy for Identifying Static Deviations in Universal Spindle Head Type Multi-axis Machining Centers," *Int. J. Mach. T. & Manuf.*, Vol. 46, No. 10, pp. 1097-1106, 2006.
2. Zargarbashi, S. H. H. and Mayer, J. R. R., "Assessment of Machine Tool Trunnion Axis Motion Error, using Magnetic Double Ball Bar," *Int. J. Mach. T. & Manuf.*, Vol. 46, No. 14, pp. 1823-1834, 2006.
3. Kim, H. S., Lee, K. I., Lee, K. M., and Bang, Y. B., "Fabrication of Free-form Surfaces using a Long-stroke Fast Tool Servo and Corrective Figuring with On-machine Measurement," *Int. J. Mach. T. & Manuf.*, Vol. 49, No. 12-13, pp. 991-997, 2009.
4. Park, C. H., Oh, J. S., Shim, J. Y., and Hwang, J. H., "Development of a Large Surface Mechanical Micro Machining System & Machine," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 28, No. 7, pp. 761-768, 2011.
5. 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," *Int. J. Mach. T. & Manuf.*, Vol. 40, No. 9, pp. 1235-1256, 2000.
6. Schwenke, H., Knapp, W., Haitjema, H., Weckenmann, A., Schmitt, R., and Delbressine, F., "Geometric Error Measurement and Compensation of Machines - An Update," *CIRP Annals - Manuf. Tech.*, Vol. 57, No. 2, pp. 660-675, 2008.
7. Ibaraki, S. and Knapp, W., "Indirect Measurement of

- Volumetric Accuracy for Three-axis and Five-axis Machine Tools: A Review," *Int. J. Auto. Tech.*, Vol. 6, No. 2, pp. 110-124, 2012.
8. Evans, C. J., Hocken, R. J., and Estler, W. T., "Self-calibration: Reversal, Redundancy, Error Separation, and 'Absolute Testing'," *CIRP Annals - Manuf. Tech.*, Vol. 45, No. 2, pp. 617-634, 1996.
 9. ISO No. 230-1, "Test Code for Machine Tools - Part 1: Geometric Accuracy of Machines Operating under No-load or Finishing Conditions," 1996.
 10. Yang, S., Yuan, J., and Ni, J., "Accuracy Enhancement of a Horizontal Machining Center by Real-time Error Compensation," *J. Manuf. Sys.*, Vol. 15, No. 2, pp. 113-124, 1996.
 11. ISO No. 230-7, "Test Code for Machine Tools - Part 7: Geometric Accuracy of Axes of Rotation," 2006.
 12. Suh, S. H., Lee, E. S., and Jung, S. Y., "Error Modelling and Measurement for the Rotary Table of Five-axis Machine Tools," *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, Vol. 14, No. 9, pp. 656-663, 1998.
 13. Tsutsumi, M. and Saito, A., "Identification and Compensation of Systematic Deviations Particular to 5-axis Machining Centers," *Int. J. Mach. T. & Manuf.*, Vol. 43, No. 8, pp. 771-780, 2003.
 14. Weikert, S., "R-test, a New Device for Accuracy Measurements on Five Axis Machine Tools," *CIRP Annals - Manuf. Tech.*, Vol. 53, No. 1, pp. 429-432, 2004.
 15. Trapet, E., Aguilar, J. J., Yague, J. A., Spaan, H., and Zeleny, V., "Self-centering Probes with Parallel Kinematics to verify Machine-tools," *Prec. Engin.*, Vol. 30, No. 2, pp. 165-179, 2006.
 16. Lee, K. I. and Yang, S. H., "Robust Measurement Method and Uncertainty Analysis for Position-independent Geometric Errors of a Rotary Axis using a Double Ball-bar," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 14, No. 2, pp. 231-239, 2013.
 17. Lee, K. I. and Yang, S. H., "Measurement and Verification of Position-independent Geometric Errors of a Five-axis Machine Tool using a Double Ball-bar," *Int. J. Mach. T. & Manuf.*, Vol. 70, pp. 45-52, 2013.
 18. Siemens AG, "Kinematics Measuring Cycle CYCLE996," <http://www.cnc4you.siemens.com> (Accessed 17 Sep. 2013)
 19. Ametek Precitech Inc., "Drum Roll Lathe Overview," http://www.precitech.com/products/drumroll_lathe/drum_roll_lathe.html (Accessed 17 Sep. 2013)
 20. Lee, K. I., Lee, D. M., and Yang, S. H., "Parametric Modeling and Estimation of Geometric Errors for a Rotary Axis using Double Ball-bar," *Int. J. Adv. Manuf. & Tech.*, Vol. 62, No. 5-8, pp. 741-750, 2012.
 21. Lee, D. M. and Yang, S. H., "Mathematical Approach and General Formulation for Error Synthesis Modeling of Multi-axis System," *Int. J. Mod. Phys. B*, Vol. 24, No. 15-16, pp. 2737-2742, 2010.
 22. ISO No. 230-9, "Test Code for Machine Tools - Part 9: Estimation of Measurement Uncertainty for Machine Tool Tests according to series ISO 230, Basic Equations," 2005.
 23. Renishaw plc., "Telescoping Ballbar Systems," <http://www.renishaw.com/en/telescoping-ballbar-systems--6813> (Accessed 17 Sep. 2013)
 24. Lee, K. I., Lee, D. M., Kweon, S. H., and Yang, S. H., "Geometric Errors Estimation of a Rotary Table using Double Ball-bar," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 27, No. 11, pp. 98-105, 2010.

