

멀티프로브 오차분리법을 이용한 정밀 라인프로파일 측정 기술

A Precision Line Profile Measurement Technique Using Multi Probe Error Separation Method

백상우¹, 조남규^{2, #}

Sang Woo Baek¹ and Nahm Gyoo Cho^{2, #}

¹ 한양대학교 일반대학원 기계설계공학과 (Department of Mechanical Design Engineering, Graduate School, Hanyang University)

² 한양대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Hanyang University)

Corresponding Author / E-mail: ngcho@hanyang.ac.kr; TEL: +82-31-400-5286

ORCID: 0000-0003-4798-8581

KEYWORDS: Line-profile measuring system (라인프로파일 측정시스템), On-machine measurement (온-머신 측정), Multi-DOF motion error (다자유도 구동오차), Linear form component (선형 형상 성분), Error separation technique (오차분리기술)

In this research, a precise on-machine line-profile measuring system that compensates for the motion-error from the linear-guide, which can influence the accuracy of the measurement of the profile was developed. For this purpose, the principle of measuring the system model was used to analyze the compensating motion error component for line-profile and 3 types of MPES method (Integration-Method, the Fourier-Model-Method, and the Sequential-Method). The multi-probe-error-separation-method (MPES) was applied to calculate the motion-error, which in turn was used to compensate for the measured linear-profile of the specimen. Lastly, the simulation conditions involving a multi-probe measurement system consisting of a reference-artifact, capacitive-sensor, and three displacement-sensors were designed and Monte-Carlo simulation was implemented for the evaluation of the 3 types of MPES method. Also, the simulation results obtained from the conventional measuring system and the proposed system were compared for the verification of the performance of the latter. Consequently, efficient compensation of the motion error appeared as possible and the applicability of the multi-probe measurement system was confirmed.

Manuscript received: May 1, 2020 / Revised: May 29, 2020 / Accepted: June 9, 2020

NOMENCLATURE

i = Measurement data position in travel range ($i = 1, 2, \dots, N$)

L = Travel length

d = Probe interval

s = Sampling rate

$m_{P_j}(x_i)$ = Sensor measurement data for reference surface
($j = 1, 2, 3$)

$m_P(x_i)$ = Sensor measurement data for specimen surface

$f_R(x_i)$ = Form error component profile of reference surface

$f_S(x_i)$ = Line profile of specimen surface

$e_Z(x_i)$ = Horizontal motion error profile

$e_\theta(x_i)$ = Yawing motion error profile

$L_R(x_i), L_S(x_i)$ = Linear regression line of data profiles

a_R, a_S = Gradient coefficient of linear regression line

b_R, b_S = Intercept coefficient of linear regression line

$\overline{O_U P_2}, \overline{O_U P_S}$ = Length of the between center of probe unit and
zero point of probe

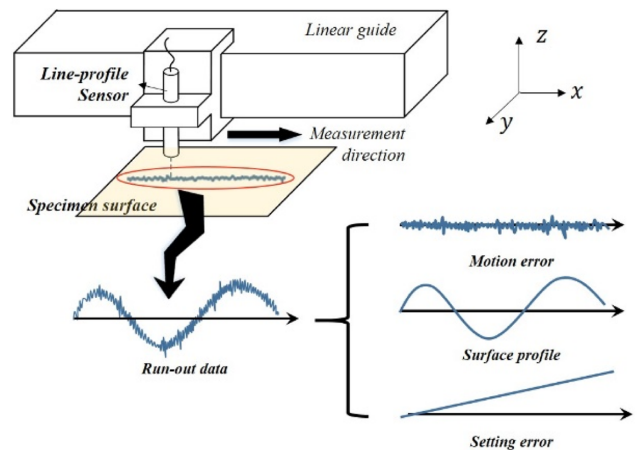
δ_1, δ_2 = Misalignment error of probe1-probe 2 and probe 2-
probe 3

1. 서론

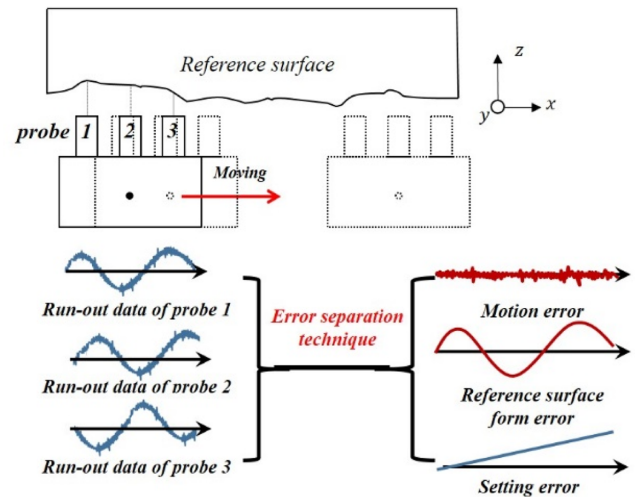
정밀-라인프로파일 측정 기술은 제조기술 분야에서 고정밀의 측정을 바탕으로 제어 기술 및 구동 기술을 기반으로 하는 기술로써 진직도, 표면 거칠기, 평탄도 등과 같이 가공 및 측정 장비에서 요구되는 다양한 정밀 부품 및 가공물의 기하 공차 평가를 위해 다양한 온-머신 측정 기술들이 연구되고 있다.¹⁻⁸ 이러한 라인 프로파일 평가시스템은 산업고도화에 따라 대측정 범위 및 고정밀도를 위한 기반 기술이 요구된다. 라인프로파일 측정 기술의 측정정밀도는 측정시스템에서 리니어-가이드 등의 선형이송장치 구동 시 발생하는 구동오차(Motion Error)에 따라 크게 영향을 받으며, 장치의 구동정밀도는 가이드 레일의 형상-오차, 조립-공차, 이송부품 간의 정렬-오차 등에 의해 결정된다. 따라서 공작기계 및 측정 장비의 요구 정밀도가 높아지고 선형이송장치의 구동 범위가 길어질수록, 구동오차를 최소화할 수 있도록 고성능의 구동정밀도를 가지는 선형이송장치가 요구된다.

이에 따라 라인프로파일 측정정밀도를 향상시키기 위해서 고성능 선형이송장치를 적용하여 구동오차의 영향이 없다고 가정하거나, 선형이송장치의 구동오차를 장착하기 전에 평가하여 보상데이터로 사용하여 구동오차 영향을 최소화하는 방식을 사용해왔다.^{2,4,7} 하지만 고성능 선형이송장치는 대측정 범위 및 고정밀 요구에 따라 매우 고가이며 엄밀한 측정 환경이 요구된다는 한계가 있다. 측정된 구동오차 데이터를 보상에 사용하는 경우 계통오차 성분만 보상이 가능하고 랜덤오차 성분은 보상이 불가능하다는 단점이 있다. 이러한 한계점들을 극복하기 위해 최근 선형이송장치의 구동오차를 온-머신 상태에서 동시에 측정하여 별도로 보상하는 방법이 연구되고 있다.^{5,6,8-10} 하지만 Fig. 1(a)와 같이 비접촉식 센서의 변위 신호 기반 측정데이터에는 2 자유도의 구동오차와 측정 기준면의 형상오차(Form Error), 시스템의 조립오차 및 기타 환경오차 등의 신호 성분이 혼재되어 검출된다. 이와 같은 혼재된 신호 성분들 중에 구동오차 성분만을 획득하여 라인 프로파일 측정물의 측정데이터에 보상해주기 위해 복수의 센서 신호들을 기반으로 기하학적 관계에 의해 기준면의 형상오차와 선형이송장치의 구동오차를 분리하는 오차분리기술이 활발히 연구되고 있다.¹²⁻²²

Whitehouse¹¹에 의해 제안된 오차분리기술들 중에 멀티프로브-오차분리기술(Multi-Probe Error Separation, MPES)은 3개 이상의 다중 변위 센서를 적용하여 원치 않는 2 자유도의 구동오차 성분과 형상오차 성분을 분리하는 방법으로(Fig. 1(b)), 3개의 측정데이터로부터 1주기 성분의 설치오차(Setting Error)를 선형회귀(Linear Regression)를 기반으로 제거하고 MPES 오차분리 기술의 알고리즘에 따라 구동오차와 형상오차 성분을 분리한다. MPES 기술은 데이터 처리를 기반으로 하는 정밀도 향상 기술로써, 리셋을 위한 추가적인 정밀 하드웨어가 필요하지 않고 단일 측정으로 얻어진 측정데이터들을 활용하기 때문에 온-머신 측정 및 나아가 실시간 측정이 가능한 장점을 가지고 있다. 2 자유도의 구동오차 성분은 각각 Y축에 해당하는 측정



(a) General runout data components



(b) Concept of the error separation technique

Fig. 1 Schematic of the conventional runout data components and a concept of the error separation

방향 병진-구동오차(Horizontal Motion Error)와 틸트-구동오차(Yawing Motion Error)를 의미한다.

이러한 MPES 방법은 다중 변위 센서의 측정데이터 처리 방식에 따라 적분법,^{12-14,16} 푸리에급수법^{17,20} 및 순차계산법^{15,18,19} 기반 MPES 기술로 구분된다. 우선, 적분법 기반 MPES 방법은 데이터 처리 수학적 기법으로 수치적분법을 사용하는 방식이다. 장점은 데이터 수집 절차가 간단하며 데이터 밀도를 상대적으로 높게 획득이 가능하지만, 변위 센서 간의 영점 설치오차에 의해 측정 길이의 제곱에 비례하는 누적오차가 발생한다. 다음으로 푸리에급수법 기반 MPES 방법은 고밀도의 데이터 수집이 가능하며 고주파 영역의 형상 성분까지 측정이 가능하고, 변위 센서 간의 영점 설치오차의 영향을 받지 않아 누적오차가 발생하지 않기 때문에 별도의 교정 작업이 필요 없다. 하지만 다른 방법들과 달리 엄밀한 수학적 해를 가지는 것이 아니며, 양 끝 부분 데이터의 불연속 및 변위 센서 간의 간격과 데이터 밀도 간의

상관관계에 따라 주파수 변조 현상이 발생하여 오차로 유입된다.²² 마지막으로 순차계산법 기반 MPES 방법은 수학적 기법의 이론적 오차가 없어 엄밀한 해를 구하기 때문에 가장 신뢰성이 높은 방법이지만, 데이터 밀도가 낮으며 적분법과 동일하게 변위 센서 간의 영점 설치오차에 따라 누적오차가 발생한다는 문제가 있다.

본 연구에서는 라인프로파일 측정시편(Specimen)의 측정정밀도 향상을 위해 선형이송장치의 구동오차를 온-머신으로 측정하여 보상 가능한 측정 기술을 제안하고 적용성을 검토한다. 이를 위한 보상 기술로 측정기준면의 형상오차를 제거하여 정밀한 선형 구동오차 측정이 가능한 MPES 기술을 적용하였다. MPES 측정 기술의 적용성 검토를 위해 적분법, 푸리에급수법, 순차계산법의 3가지 MPES 방법들 간의 구동오차 성분 분리 성능에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, 라인프로파일 측정 데이터에 대해 MPES 방법으로부터 획득된 구동오차 성분의 보상을 통해 적용성을 확인하였으며, 성능 검증을 위해 원본 데이터와 기존 단일 센서 측정 방식의 결과와 시뮬레이션을 통해 비교 분석하였다.

2. 원리

2.1 선형이송장치 구동오차 성분 온-머신 보상이 가능한 라인프로파일 측정시스템 원리

일반적인 라인프로파일 측정시스템의 측정 방식은 Fig. 1과 같이 1개의 라인프로파일 측정센서를 다축의 선형이송장치에 장착하여 측정 방향으로 직선 구동하면서 획득된 데이터 프로파일을 라인프로파일로 사용한다. 하지만 대측정 범위 및 초고정밀의 측정 요구에 따라 고성능의 라인프로파일 측정시스템 개발을 위해 선형이송장치의 구동오차를 온-머신 상태에서 측정하여 보상 가능하도록 추가적인 보상시스템을 개발하여 적용하고자 한다. Fig. 2는 본 연구에서 제안하는 멀티프로브 측정시스템 기반 선형이송장치의 구동오차를 보상하는 라인프로파일 측정시스템의 개념도이다. 제안된 측정시스템의 구성은 우선, 3축 젠트리 타입의 구동시스템에 측정 방향으로 구동하는 선형이송장치의 구동 슬라이드가 있고, 구동 슬라이드에는 3개의 변위 센서로 이루어진 멀티프로브 측정시스템이 측정기준물(Reference Artifact)의 측정면에 수직한 방향으로 설치된다. 또한 멀티프로브 측정시스템과 대칭된 위치에 반대 방향으로 측정시편을 측정하도록 라인프로파일 측정 센서 1개가 설치된다. 측정기준물과 라인프로파일 측정시편은 구동 슬라이드의 프로브 유닛(Probe Unit)을 중심으로 양단에 배치된다.

이러한 구성을 가지는 측정시스템의 원리에 대한 개략도가 Fig. 3에 나타나 있으며, 측정기준물 형상프로파일(f_R)을 측정하기 위한 3개의 변위 센서(P_1, P_2, P_3)와 측정시편의 라인프로파일(f_S) 측정용 변위 센서(P_S) 1개의 측정신호($m_{P_1}, m_{P_2}, m_{P_3}, m_{P_S}$) 수학적 모델은 다음 식(1)부터 식(4)와 같다.

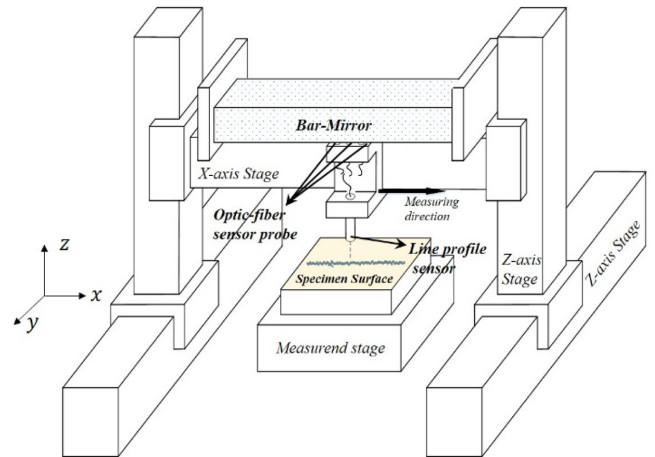


Fig. 2 Designed a line-profile measurement system based multi-probe system to compensated motion error components

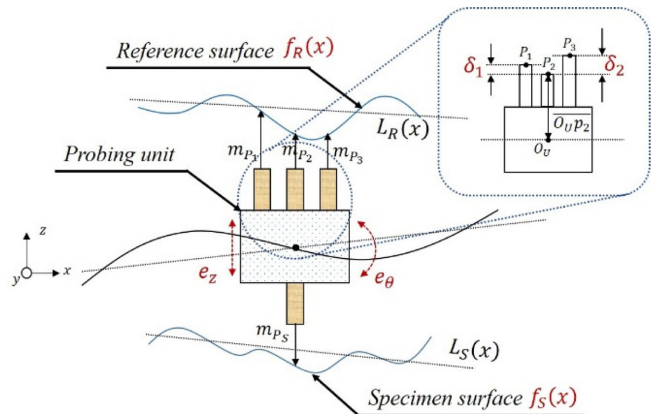


Fig. 3 A geometric relationship of MPES method and line-profile measurement system

$$m_{P_1}(x_i) = f_R(x_i - d) - e_z(x_i) + d \cdot e_\theta(x_i) + L_R(x_i - d) - \overline{O_U P_2} - \delta_1 \quad (1)$$

$$m_{P_2}(x_i) = f_R(x_i) - e_z(x_i) + L_R(x_i) - \overline{O_U P_2} \quad (2)$$

$$m_{P_3}(x_i) = f_R(x_i + d) - e_z(x_i) - d \cdot e_\theta(x_i) + L_R(x_i + d) - \overline{O_U P_2} - \delta_2 \quad (3)$$

$$m_{P_S}(x_i) = -(f_S(x_i) - e_z(x_i) + L_S(x_i) - \overline{O_U P_S}) \quad (4)$$

$$L_R(x_i) = a_R \cdot x_i + b_R$$

$$L_S(x_i) = a_S \cdot x_i + b_S$$

여기서, 총 측정 길이 L 에 대해 x_i 는 데이터 측정 위치이고, 멀티프로브 측정시스템의 프로브 유닛은 3개의 프로브 간에 d 의 거리만큼 간격을 가지고 설치되어 데이터는 프로브 간격 d 와 배수 관계를 가지는 간격 s 의 샘플링 간격으로 측정한다. 또한, $f_R(x_i), f_S(x_i)$ 는 각각 측정기준면과 측정시편의 형상 성분이고, $e_z(x_i), e_\theta(x_i)$ 는 각각 시스템 좌표계의 Y축에 해당하는 구동부의

측정 방향 병진-구동오차와 틸트-구동오차 성분이다. δ_1, δ_2 는 각각 멀티프로브 측정시스템의 중심 프로브(P_2)를 기준으로 할 때 나머지 2개의 프로브(P_1, P_3)의 초기 세팅오차 성분이고, $\overline{O_U P_2}, \overline{O_U P_S}$ 은 구동부의 중심으로부터 각각 멀티프로브 시스템 중심 프로브(P_2)와 라인프로파일 측정 프로브(P_S)까지의 설치 거리이다.

설계된 시스템의 경우, 선형이송장치, 측정기준면, 측정시편을 최대한 정확하게 평행으로 설치하겠지만, 각 표면 프로파일의 중심선들과 구동 궤적의 중심선은 서로 독립적으로 어긋나 있다. 이에 대한 상대적 자세를 시스템 좌표계를 기준으로 정의하였으며, 각 곡선의 중심선은 $L_R(x_i), L_S(x_i)$ 로 표현되고, 각각 a_R, a_S 의 기울기와 b_R, b_S 의 Y축 방향 위치 성분으로 정의된다.

시스템 구성의 기하학적 관계와 모델식을 바탕으로 2자유도의 구동오차 성분을 측정 시편에 대한 측정데이터에 보상한다. 이에 따른 최종 측정시편의 라인프로파일 모델식은 다음 식(5)와 같다.

$$f_S(x_i) = (f_R(x_i) - m_{P_2}(x_i) - m_{P_S}(x_i)) + (a_R - a_S)x_i + (b_R - b_S + \overline{O_U P_S} - \overline{O_U P_2}) \quad (5)$$

라인프로파일 측정데이터에 대한 구동오차를 고정밀도를 확보하면서 보상하기 위해서 측정기준물의 형상오차 성분($f_R(x_i)$)의 제거가 필수적이다. 일반적으로는 형상오차 성분을 최소화하기 위해 측정기준물을 마스터피스를 사용하여 무시 가능하도록 하드웨어를 구축하지만, 측정기준물의 시간에 따른 형상 변형 문제가 발생하기 때문에 온-머신 측정이 불가능하다. 이를 해결하기 위해 복수개의 획득된 측정데이터를 활용하여 데이터 처리를 통해 온-머신 상태에서 형상오차 성분을 제거할 수 있는 MPES 기술을 적용하여 보상을 위한 구동오차 데이터의 정확정밀도를 향상시킨다.

2.2 선형이송장치 구동오차 성분 온-머신 보상이 가능한 라인프로파일 측정시스템 원리

위에서 언급한 바와 같이 측정기준물로부터 획득되는 구동오차 성분의 정확정밀도 향상을 위해 오차분리기술들 중 원리가 간단하고 적용성이 가장 쉬운 반전법(Reversal Method) 외에 온-머신(On-Machine)으로 측정이 가능한 멀티프로브-오차분리기술(MPES)이 적용된다. 이러한 MPES 방법은 다중 변위 센서의 측정데이터 처리 방식에 따라 적분법, 푸리에급수법 및 순차계산법 기반 MPES 기술로 구분된다. 이러한 MPES 방법들이 적용된 구동오차 보상 기반 라인프로파일 측정에 대한 데이터 처리 과정은 Fig. 4와 같다. 본 연구에서는 3가지의 방식에 대해 모델식을 설계하고 비교 분석을 통해 라인프로파일 측정시스템 개발에 적용성을 검토한다.

2.2.1 적분법(Integration Method)

적분법은 멀티프로브 측정시스템에서 획득하는 3개의 측정데이터 $m_{P_1}(x_i), m_{P_2}(x_i)$ 그리고 $m_{P_3}(x_i)$ 에 대해 구동오차 성분 $e_y(x_i)$ 와 $m_\theta(x_i)$ 가 제거되도록 계수를 적용하여 하중합성량 $M(x_i)$ 를

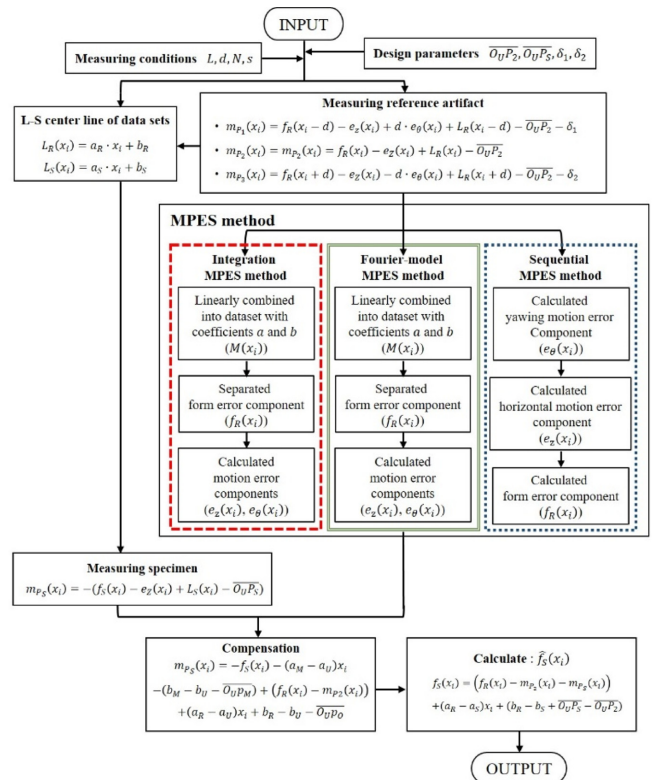


Fig. 4 Data processing algorithm of the system

구하였을 때, 그 형태가 측정기준물의 형상 성분 $f_R(x_i)$ 의 2차 도함수 형태를 가지는 수학적 특징을 활용하여 이중적분을 통해 형상 성분을 산출한다.

$$M(x_i) = \frac{1}{d^2} [m_{P_1}(x_i) - 2 \cdot m_{P_2}(x_i) + m_{P_3}(x_i)] \quad (6)$$

$$= \frac{1}{d^2} [f_R(x_i - d) - 2f_R(x_i) + f_R(x_i + d) - (\delta_1 + \delta_2)]$$

하중합성에 대한 식(6)으로부터, 2차 도함수 형태를 이중적분하여 형상 성분 $f_R(x_i)$ 은 다음 식(7)과 같이 구해진다.

$$f_R(x_i) = \sum_{k=1}^i \left(\sum_{j=1}^k (M(x_j)d) \right) + \frac{\delta}{2d^2} x_i^2 \quad (7)$$

여기서, $\delta = \delta_1 + \delta_2$

따라서, 식(1)부터 식(3)과 식(7)의 관계에 의해 구동오차 성분 $e_y(x_i)$ 와 $e_\theta(x_i)$ 가 다음의 식(8)과 식(9)와 같이 구해진다. 최종적으로 식(8)을 식(4)에 대입하여 식(5)의 결과식이 도출되며, 여기서 선형 기울기 성분들 $L_R(x_i), L_S(x_i)$ 은 최소제곱법으로 계산되어 보정 된다.

$$e_y(x_i) = f_R(x_i) - m_{P_2}(x_i) + L_R(x_i) - \overline{O_U P_2} \quad (8)$$

$$e_\theta(x_i) = \frac{1}{d} [f_R(x_i - d) - m_{P_1}(x_i) - e_y(x_i) + L_R(x_i - d) - \overline{O_U P_2} - \delta_1] \quad (9)$$

적분법은 식(7)에 따르면, 프로브 초기 설치오차 δ_1 과 δ_2 의 영향에 따라 $\frac{\delta}{2d}x_i^2$ 항에 대한 적분상수항의 오차로 누적된다 (Parabolic Error). 이는 측정길이 L 에 제곱에 비례하여 커지기 때문에 대측정 범위일수록 불리하다는 단점이 있다.

2.2.2 푸리에급수법(Fourier-Model Based Method)

푸리에급수법은 데이터 성분을 푸리에 급수로 가정하여 계수 비교법을 통해 형상 성분을 산출하는 방법이다. 적분법의 식(6)과 동일하게 구동오차 성분이 제거되도록 하중합성량($M(x_i)$)을 계산하고, 형상 성분($f_R(x_i)$)과 하중합성량($M(x_i)$)을 각각 Bin Number k 를 갖는 푸리에급수 모델로 가정한다.

$$\mathcal{F}\{f_R(x_i)\} = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos k \frac{2\pi}{L} x + B_k \sin k \frac{2\pi}{L} x \quad (10)$$

$$\mathcal{F}\{M(x_i)\} = \sum_{k=1}^{\infty} F_k \cos k \frac{2\pi}{L} x + G_k \sin k \frac{2\pi}{L} x \quad (11)$$

식(6)과 식(10), 식(11)의 관계를 매개변수 α_k 와 β_k 를 사용하여 정리하면 다음 식(12)와 같은 관계식이 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} A_k \\ B_k \end{bmatrix} = \frac{1}{\alpha_k^2 + \beta_k^2} \begin{bmatrix} \alpha_k & \beta_k \\ -\beta_k & \alpha_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_k \\ G_k \end{bmatrix} \quad (12)$$

식(12)의 계산된 푸리에 계수 A_k , B_k 를 식(10)에 대입하여 형상 성분 $f_R(x_i)$ 을 구한다. 다음으로 적분법의 과정과 동일하게 식(8)과 식(9)와 같이 구동오차 성분을 획득하고, 얻어진 구동오차 성분을 식(4)에 대입하여 구동오차가 보상된 측정시편의 라인프로파일을 획득한다.

푸리에급수법은 프로브 초기 설치오차에 대한 영향을 받지 않으며 고밀도의 측정데이터 획득이 가능하지만, 매개변수 α_k 와 β_k 의 관계에 따라 고조파변조현상이 발생할 경우 큰 오차가 유입된다.²¹

2.2.3 순차계산법(Sequential Method)

순차계산법은 샘플링 간격 간의 데이터들의 연관성을 이용하여 기하학적 모델링을 기반으로 형상 성분 또는 구동오차 성분 이외의 성분들이 제거되도록 귀납적 반복 계산을 통해 산출하는 방법이다. 식(1)부터 식(3)의 성분들 간의 기하학적 관계에 따라 구동오차 성분은 다음 식(13)과 식(14)와 같이 계산된다.

$$e_\theta(x_i) = e_\theta(x_i - d) + \{m_1(x_i) - m_2(x_i - d) - m_2(x_i) + m_3(x_i - d)\}/d \quad (13)$$

$$e_y(x_i) = e_y(x_i - d) - \{m_2(x_i - d) - m_1(x_i) + d \cdot e_\theta(x_i)\} \quad (14)$$

여기서, $f_R(1) = 0$, $e_y(1) = 0$, $e_\theta(1) = 0$

식(13)과 같이 틸트 구동오차 성분이 먼저 계산되고, 이를 식(14)에 대입하여 병진 구동오차 성분이 산출된다. 따라서 구해진 구동오차 성분을 식(4)에 대입하여 측정시편의 라인프로파일

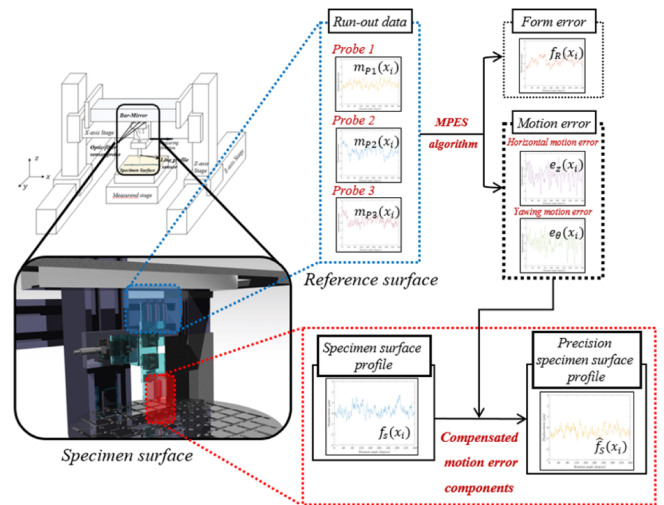


Fig. 5 Data processing of the line profile measurement system using MPES method

Table 1 Spec. of the designed system components

Component		Model	Spec.	
Optic fiber sensor	Philtec, DMS-RC25		Bandwidth [kHz]	1
			ADC [bit]	16
			Range [μm]	0-760
			Resolution [nm]	15
			Diameter [mm]	4.75
Capacitive sensor	Probe	MicroSense 2805	Bandwidth [kHz]	1
			Stand-off	500
			$\pm$ Range [μm]	250
			Linearity [%]	0.04
			Resolution [nm]	18.7
			Diameter [mm]	5

측정데이터에 대해 구동오차를 보상한다.

순차계산법은 적분법과 마찬가지로 프로브 초기 설치오차 δ_1 과 δ_2 의 영향에 따라 $(\delta_1 + \delta_2)x_i$ 의 항에 대한 오차 성분이 유입되며, 데이터 밀도가 최대 프로브 간격 d 에 한정되기 때문에 고주파 성분을 분리하는 것은 불가능하다.

3. 정밀 라인프로파일 측정을 위한 MPES 측정 방법 시뮬레이션 검증

앞서 설명된 시스템 설계 및 기술 원리를 적용하여 MPES 기술 기반 선형이송장치의 구동오차의 온-머신 보상이 가능한 고정밀 라인프로파일 측정시스템이 설계되었으며, 시뮬레이션 조건을 결정하기 위한 측정시스템의 장치 구성에 대한 설계 사양이 Table 1에 표시된다. 측정시스템의 구성은 측정기준물

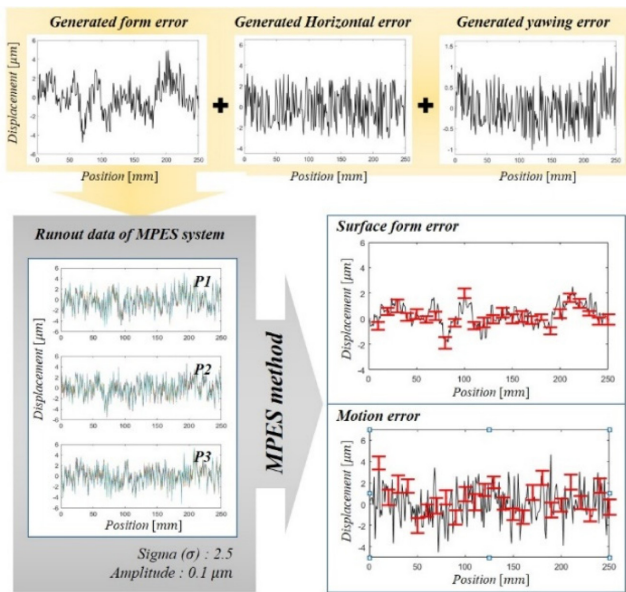


Fig. 6 Computation processing of Monte-Calro simulation for the MPES methods (Described case is the integration MPES method)

Table 2 Results of simulation of comparison between each MPES methods

MPES algorithm		Mean [μm]	Deviation [μm]	Algorithm computing speed [ms]
Fourier model based method	From error	0.011	±2.15	64.87
	Motion error	-0.012	±3.43	
Integration method	From error	0.003	±0.57	114.51
	Motion error	0.002	±1.14	
Sequential method	From error	-0.006	±0.51	2.63
	Motion error	0.005	±0.97	

(Reference Surface)과 3개의 멀티프로브 측정 유닛은 광섬유 센서(Fiber Optic Sensor)로 결정되었다. 라인프로파일 측정 센서는 정전용량형 센서(Capacitive Sensor)의 사양이 적용되었다.

2장에서 분석된 MPES 방법들의 측정알고리즘의 성능을 비교 검증하기 위해 Fig. 5에 나타나있는 데이터 처리 과정을 기반으로 다음의 시뮬레이션 수행되었다.

(1) MPES 방법들에 대한 측정 알고리즘 성능 검증: 측정기준물에 대한 MPES 방법의 성능을 검증하기 위해, 시뮬레이션에서 발생시킨 원본 형상 성분 및 구동오차 성분과 기하학적 관계에 의해 발생시킨 런아웃-데이터에 대해 적분법, 푸리에급수법 및 순차계산법의 MPES 기술들을 각각 적용하여 분리한 형상 성분 및 구동오차 성분을 비교한다.

(2) 구동오차 보상에 의한 라인프로파일 측정 성능 검증: 선형이송장치의 구동오차 성분에 대한 보상알고리즘이 적용되지 않은 기존 방식(1-프로브 측정 방식)의 측정 결과와 MPES 기술에

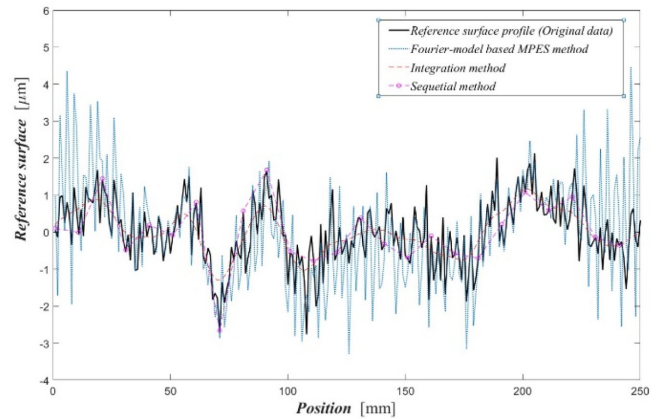


Fig. 7 Comparison results of the form error component of the reference surface

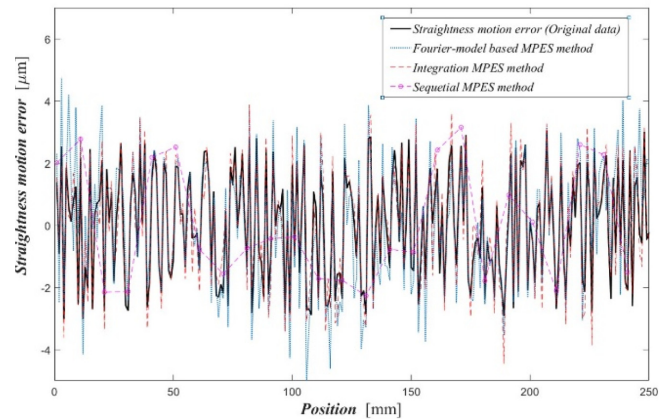


Fig. 8 Comparison results of the motion error component of the linear guide

의해 획득된 구동오차 성분에 대한 보상알고리즘이 적용된 측정 결과를 비교한다.

시뮬레이션을 위해 총 측정-길이 $L = 250$ mm, 프로브 설치 간격 $d = 10$ mm, 샘플링 간격 $s = 0.1$ mm로 조건이 결정되었다.

우선, MPES 기술에 대한 성능 시뮬레이션 검증을 위해 설치 오차의 수준은 반복 교정에 의해 무시 가능한 수준이라고 가정하였다. 또한 시뮬레이션을 위해 각각의 형상오차 성분과 구동오차 성분을 생성하였으며, 식(1)부터 식(4)의 관계에 따라 각 성분을 합성하여 측정데이터(P_1, P_2, P_3)를 발생시켰다. 이로부터 Monte-Calro 시뮬레이션 기법을 활용하여, 측정데이터에 2.5 시그마의 확률오차를 발생시키고 각각의 MPES 측정알고리즘에 적용하여 획득된 형상오차 및 구동오차 산출 결과의 편차와의 차이를 확인하였다. 적분법에 대한 시뮬레이션 과정을 대표로 하여 Fig. 6에 시뮬레이션에 대한 개략도가 나타나 있으며, 푸리에급수법, 적분법과 순차계산법에 대해 형상오차 성분 및 구동오차 성분의 산출 프로파일이 각각 비교되었다(Figs. 7과 8)에

Table 3 Simulation results

	1-probe method	Integrated MPES method
Deviation [μm]	± 2.7	± 0.82

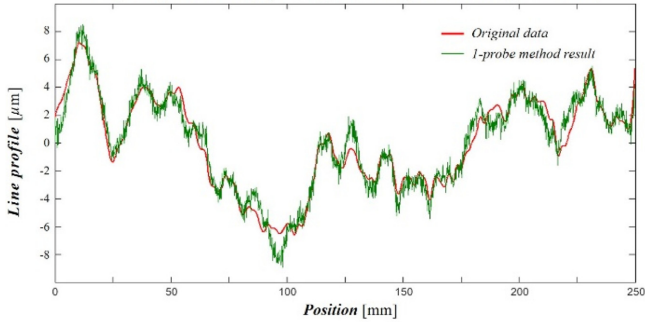


Fig. 9 Compared to original data of the specimen line-profile and the simulation result by the 1-probe method compensation method

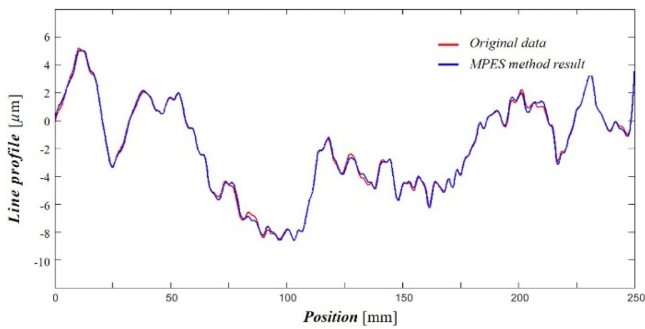


Fig. 10 Compared to the original data of the specimen line-profile and the simulation result by compensation using the MPES method

보여준다. 이에 대한 결과값을 Table 3에 표기하였다.

그 결과, 푸리에급수법은 샘플링 간격 0.1 mm의 횡분해능보다 고밀도의 형상 및 구동오차 성분까지 검출이 가능하였지만, 고조파변조현상에 의해 오차가 유입되었으며, 특히 데이터의 양 끝단으로 갈수록 오차가 증가함을 확인할 수 있었다. 순차계산법의 경우 프로브 설치 간격 10 mm 간격으로 데이터 검출이 되었으며, 데이터 밀도가 가장 낮지만 원본데이터의 경향을 가장 잘 복원하였다. 적분법은 순차계산법에 비해 일부 미세한 설치 오차의 영향에 의해 편차가 약 10%정도 크게 나타났지만 샘플링 간격(8)만큼의 데이터 밀도는 보장이 되기 때문에 3가지 방법 중에 가장 적용성이 높다.

또한, 측정 기술의 적용성을 검토하기 위해 MPES 알고리즘의 연산 속도가 계산되었으며, Window OS, Ram 32 GB, Matlab Program의 조건하에서 수행되었다(Table 2). 그 결과 적분법의 경우가 연산 속도가 가장 높았지만, 약 114 ms로 온-머신 시스템에 적용하기에는 적절한 속도로 분석되지만, 실시간 측정까지

필요한 온-머신 시스템에 대해서는 구동 속도 제한의 문제 및 딜레이로 인해 측정 불확도에 영향을 줄 수 있다. 하지만, 요구되는 속도에 따라 측정시스템을 Linux 환경, CPU 및 Ram의 성능 확장과 Matlab에 비해 상대적으로 빠른 프로그래밍 언어(C++ 등)를 사용하여 보완이 가능할 것으로 예상되며, 정확한 상호 관계에 대한 추후 연구가 필요하다.

최종적으로 적분법 MPES 기술을 기반으로 구동오차 성분 보상 알고리즘이 적용된 라인프로파일 측정기의 측정 시편에 대한 측정 성능 시뮬레이션 검증 결과가 Figs. 9와 10에 비교되었다.

Table 3에 나타나 있듯이 측정시편의 원본 데이터에 대해 리니어 가이드의 구동오차가 보상되지 않는 1-프로브 측정 방식은 약 $\pm 2.7 \mu\text{m}$ 수준으로 오차가 발생하였으며, 이는 구동오차 성분의 진폭 크기 수준과 비슷한 수준으로 리니어가이드의 구동오차가 측정시편 측정에 그대로 영향을 미친 것을 확인할 수 있다. 적분법 기반 MPES 기술을 적용하여 구동오차를 보정한 측정시편의 측정 결과는 원본 데이터에 비해 약 $\pm 0.82 \mu\text{m}$ 의 편차를 보였으며, MPES 방법을 적용하여 획득한 구동오차 성분의 보상을 기반으로 정밀한 라인프로파일 측정 성능을 만족할 수 있음이 확인 되었다.

4. 결론

본 연구에서는 측정시편의 라인프로파일 측정정밀도를 향상시키기 위해 선형이송장치의 구동오차를 온-머신으로 측정가능하고, 측정데이터에 대해 구동오차 성분을 보상 가능한 측정 기술을 검토하고 적용성을 확인한다. 이를 위한 측정 기술로 측정 기준면의 형상오차를 제거하고 정밀한 선형 구동오차 측정이 가능한 MPES 기술을 적용하였으며, 라인프로파일 측정 원리와 적분법, 푸리에급수법 및 순차계산법 등의 MPES 방법들의 원리가 분석되었다. 이를 기반으로, MPES 측정 기술의 적용성 검토를 위해 분석된 3가지 MPES 방법들 간의 구동오차 성분 분리 성능에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 라인프로파일 측정데이터에 대해 MPES 방법으로부터 획득된 구동오차 성분의 보상을 통해 적용성을 확인하였으며, 성능 검증을 위해 원본 데이터와 기존 단일 센서 측정 방식의 결과와 시뮬레이션을 통해 비교 분석하였다.

이를 통해 MPES 기술을 적용하여 효율적으로 선형이송장치의 구동오차를 온-머신 상태로 보상 가능함을 확인하였으며, 라인프로파일의 측정정밀도를 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 이를 통해 상대적으로 저가의 하드웨어(선형이송장치 및 측정기준물)로 고정밀 성능의 라인프로파일 측정시스템 구성이 가능하다. 또한 측정기준물의 형상오차 성분을 온-머신 상태로 측정 및 보상이 가능하기 때문에 측정기준물의 재설치 문제가 없으며, 유지관리가 용이하다.

하지만 대측정 범위를 측정을 수행하기 위해서는 적분법과 순차계산법의 경우 측정센서간의 초기 설치오차의 영향이 측정

길이에 비례하여 누적되는 문제를 해결해야 할 것이다. 측정 센서 간의 초기 설치오차에 영향을 받지 않는 푸리에급수법의 경우 고조파변조현상에 대한 수학적 증명이 선행됨과 함께 오차 유입을 회피할 수 있는 설계 방법이 연구되어야 할 것이다. 또한, 실시간 측정 기반 온-머신 측정시스템으로 적용성을 확장하기 위해서는 알고리즘 연산 속도에 따른 딜레이로 인한 측정불확도 요인들에 대한 추후 연구가 필요할 것이다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 한국연구재단의 이공분야인기초연구 기본연구사업(No. NRF-2020R1F1A1070803)과 한국연구재단의 이공학계 인기초연구 지원사업(No. NRF-2017R1D1A1B03033792)의 지원을 받아 수행된 연구임.

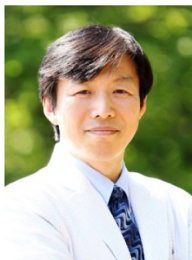
REFERENCES

- Gao, W., Haitjema, H., Fang, F., Leach, R., Cheung, C., et al., "On-Machine and In-Process Surface Metrology for Precision Manufacturing," *CIRP Annals*, Vol. 68, No. 2, pp. 843-866, 2019.
- Zhang, E., Teng, X., Chen, B., Zhang, S., and Li, Z., "Three-Degrees-of-Freedom Measurement System for Measuring Straightness Errors and Their Position based on the Faraday Effect," *Applied Optics*, Vol. 59, No. 3, pp. 764-770, 2020.
- Zhu, M., Ge, G., Yang, Y., Du, Z., and Yang, J., "Uncertainty Evaluation of Straightness in Coordinate Measuring Machines based on Error Ellipse Theory Integrated with Monte Carlo Method," *Measurement Science and Technology*, Vol. 31, No. 3, Paper No. 035008, 2019.
- Küng, A., Bircher, B. A., and Meli, F., "Low-Cost 2D Index and Straightness Measurement System based on a CMOS Image Sensor," *Sensors*, Vol. 19, No. 24, p. 5461, 2019.
- Křen, P., "Design of Ultra-Precise Scanning Deflectometer," *Optical Engineering*, Vol. 58, No. 9, Paper No. 094110, 2019.
- Shimizu, H., Yamashita, R., Hashiguchi, T., Miyata, T., and Tamaru, Y., "Square Layout Four-Point Method for Two-Dimensional Profile Measurement and Self-Calibration Method of Zero-Adjustment Error," *International Journal of Automation Technology*, Vol. 12, No. 5, pp. 707-713, 2018.
- Wang, H., Shao, Z., Fu, Y., and Han, Z., "Calculation Method for Optimal Measuring Interval of Large-Scale Straightness Measurement," *Computer Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 23, No. 1, pp. 10-16, 2017.
- Shimizu, H., Yamashita, R., Hashiguchi, T., and Miyata, T., "A Novel Compensation Method of Zero-Adjustment Error in Flatness Measurement Using Serial Four-Point Method," *Proc. of the International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st century: LEM21*, Vol. 9, p. 163, 2017.
- Weichert, C., Bosse, H., Flügge, J., Köning, R., Köchert, P., et al., "Implementation of Straightness Measurements at the Nanometer Comparator," *CIRP Annals*, Vol. 65, No. 1, pp. 507-510, 2016.
- Kim, J. A., Kim, J. W., Kang, C. S., Jin, J., and Eom, T. B., "Interferometric Profile Scanning System for Measuring Large Planar Mirror Surface based on Single-Interferogram Analysis Using Fourier Transform Method," *Measurement*, Vol. 118, pp. 113-119, 2018.
- Whitehouse, D., "Some Theoretical Aspects of Error Separation Techniques in Surface Metrology," *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, Vol. 9, No. 7, pp. 531-536, 1976.
- Fung, E. H., "A New Method for Measuring straightness And Yawing Motion Errors of a Linear Slide," Vol. 128, No. 2, p. 503-512, 2006.
- Hwang, J., Park, C. H., Gao, W., and Kim, S. W., "A Three-Probe System for Measuring the Parallelism and Straightness of a Pair of Rails for Ultra-Precision Guideways," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, Nos. 7-8, pp. 1053-1058, 2007.
- Fung, E. H., Wong, W., and Zhu, M., "An On-Machine Separation Method for Straightness, Yawing and Rolling Errors of a Linear Slide," *Proc. of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Vol. 4, pp. 105-114, 2009.
- Yang, P., Takamura, T., Takahashi, S., Takamasu, K., Sato, O., et al., "Multi-Probe Scanning System Comprising Three Laser Interferometers and One Autocollimator for Measuring Flat Bar Mirror Profile with Nanometer Accuracy," *Precision Engineering*, Vol. 35, No. 4, pp. 686-692, 2011.
- Lee, J. C., Gao, W., Shimizu, Y., Hwang, J., Oh, J. S., et al., "Precision Measurement of Carriage Slide Motion Error of a Drum Roll Lathe," *Precision Engineering*, Vol. 36, No. 2, pp. 244-251, 2012.
- Fung, E. H. and Zhu, M., "An Improved Fourier Five-Sensor (IF5S) Method for Separating Straightness and Yawing Errors of a Linear Slide based on Multiple Sensor Parameter Sets and Least Square Regression Technique," *Measurement*, Vol. 45, No. 5, pp. 1323-1330, 2012.
- Fung, E. H. K., Zhang, X. Z., Zhu, M., and Wong, W. O., "Profile Estimation of Linear Slide in the Presence of Straightness, Yawing and Rolling Motion Errors," *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 421, pp. 444-448, 2013.
- Fu, X., Bing, G., Zhao, Q., Rao, Z., Cheng, K., et al., "Improved Error Separation Technique for On-Machine Optical Lens Measurement," *Measurement Science and Technology*, Vol. 27, No. 4, Paper No. 045005, 2016.
- Chen, Y. L., Niu, Z., Matsuura, D., Lee, J. C., Shimizu, Y., et al., "Implementation and Verification of a Four-Probe Motion Error

- Measurement System for a Large-Scale Roll Lathe Used in Hybrid Manufacturing,” *Measurement Science and Technology*, Vol. 28, No. 10, Paper No. 105004, 2017.
21. Liu, W., Fan, K., Hu, P., and Hu, Y., “A Parallel Error Separation Method for the On-Line Measurement and Reconstruction of Cylindrical Profiles,” *Precision Engineering*, Vol. 51, pp. 1-9, 2018.
22. Baek, S. W., Kim, M. G., Lee, D. H., and Cho, N. G., “Multi-Probe System Design for Measuring the Roundness and Rotation Error Motion of a Spindle Using an Error Separation Technique,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 233, No. 5, pp. 1547-1560, 2019.

**Sang-Woo Baek**

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Design Engineering, Graduate School of Hanyang University His research interest is Diving error & form error measurement technique, Measuring system, Sensor development, Precision positioning system, Uncertainty analysis etc.
E-mail: bsw928@hanyang.ac.kr

**Nahm-Gyoo Cho**

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Hanyang University. His research interest is Measurement technology, Precision engineering, Surface metrology, Sensor, Positioning technology, Data analysis etc.
E-mail: ngcho@hanyang.ac.kr