

혼합축차이점법을 이용한 진직도 정밀측정에 있어서 센서 게인오차의 영향에 관한 연구

A Study on the Effect of the Sensor Gain Error in the Precision Measurement of Straightness Error Using Mixed Sequential Two-Probe Method

정지훈¹, 오정석², 김경호², 박천홍^{1,2,✉}
Ji Hun Jeong¹, Jeong Seok Oh², Gyungho Kihm², and Chun Hong Park^{1,2,✉}

¹ 과학기술연합대학원대학교 나노메카트로닉스학과 (Department of Nano-Mechatronics, University of Science & Technology)
² 한국기계연구원 첨단생산장비연구본부 (Advanced Manufacturing Systems Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials)
✉ Corresponding author: pch657@kimm.re.kr, Tel: +82-42-868-7117

Manuscript received: 2013.3.16 / Revised: 2013.5.9 / Accepted: 2013.5.12

In this study, effect of the sensor gain error is theoretically analyzed and simulated when mixed sequential two-probe method(MTPM) is applied for the precision measurement of straightness error of a linear motion table. According to the theoretical analysis, difference of the gain errors between two displacement sensors increases measurement error dramatically and alignment error of the straightedge is also amplified by the sensor gain difference. On the other hand, if the gain errors of the two sensors are identical, most of error terms are cancelled out and the alignment error doesn't give any influence on the measurement error. Also the measurement error of the straightness error is minimized compared with that of the straightedge's form error owing to close relationship between straightness error and angular motion error of the table in the error terms.

Key Words: Mixed Sequential Two-Probe Method (혼합축차이점법), Sensor Gain Error (센서 게인오차), Linear Motion Table (직선이송계), Straightness Error (진직도오차), Measurement Error (측정오차)

기호설명

$e_s(x)$ = straightness error of linear motion table
 $e_f(x)$ = form error of straightedge
 $\theta(x)$ = angular motion error of linear motion table
 $e_a(x)$ = alignment error of straightedge
 l_x = distance between two sensors in feed direction
 Δ = axial misalignment between two sensors
 $R_A(x), R_B(x)$ = output of sensor A and B
 G_A, G_B = gain of sensor A and B

1. 서론

최근 들어 디스플레이, 금형 등을 중심으로 초 정밀 가공장비의 수요가 증가하고 있으며 이에 따라 공기베어링이나 유정압베어링과 같은 정압베어링을 적용한 장비 개발 수요가 증가하고 있다. 정압베어링의 경우 공기막이나 유막의 평균화효과에 의해 운동정밀도를 향상시킬 수 있는 장점이 있으며 이와 같은 정압베어링을 채용한 직선이송계는 대략적으로 500 mm당 1 μ m 이하의 진직도오차를 구현하고 있다.¹

일반적으로 직선이송계의 진직도오차는 스트레이트 에지(straightedge)와 변위센서를 이용하거나 레이저간섭계를 이용하여 측정된다. 스트레이트 에지를 이용한 진직도 측정방법의 경우 스트레이트 에지 자체의 형상정밀도에 측정정밀도가 종속되고 높은 정밀도의 스트레이트 에지는 매우 고가인 문제점이 있다. 레이저간섭계를 이용한 진직도 측정²의 경우 열적 드리프트 및 진동 등 안정성 문제로 인해 서브 마이크론 영역의 진직도를 측정하는 것이 일반적인 환경에서는 쉽지 않다.

이러한 이유로 인해 보다 정밀하게 진직도오차를 측정하기 위한 방법으로 반전법(reversal method)³이나 복수개의 변위센서를 이용하는 축차이점법(sequential two-probe method)^{4,6} 및 삼점법(three-probe method)⁷⁻¹⁰ 등의 자가보정법(self-calibration method)을 이용하여 스트레이트 에지의 형상오차와 이송계의 진직도오차를 분리하는 방법이 널리 사용되고 있다. 하지만 반전법의 경우 스트레이트 에지의 처짐으로 인해 수직방향 측정이 용이하지 않고, 축차이점법의 경우 각운동오차(angular motion error)의 영향이 고려되지 않아 측정오차가 발생하며, 삼점법의 경우에는 센서 간의 영점조정을 필요로 하는 등 각각의 특징과 단점을 가지고 있다.

저자들의 경우 축차이점법의 알고리즘을 기반으로 하되 측정 시 발생하는 이송계의 각운동오차 성분을 레이저간섭계로 측정하여 보정해주는 혼합 축차이점법(mixed sequential two-probe method)을 제안하였으며 서브 마이크론의 정밀도로 형상오차와 진직도오차를 분리할 수 있음을 실험적으로 검증하였다.¹¹⁻¹³

다른 자가보정법들과 마찬가지로 혼합축차이점법의 경우에도 사용되는 두 변위센서의 정밀도에 의해 측정정밀도가 영향을 받으며 이에 대한 영향을 제대로 이해하는 것이 실제적인 응용에 있어서 매우 중요하다. 본 연구에서는 가장 큰 오차요인인 변위센서의 게인오차(gain error)가 혼합축차이점법을 적용한 진직도오차 및 형상오차 측정에 미치는 영향을 모델링과 시뮬레이션을 통하여 분석하였고 이를 통해 측정오차를 최소화할 수 있는 조건을 제시하였다.

2. 혼합축차이점법의 원리

혼합축차이점법은 기존 축차이점법에서 이송계의 각운동오차에 의한 영향이 고려되지 않는 문제

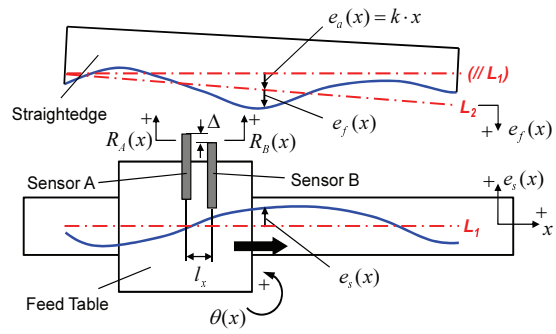


Fig. 1 Principle of mixed sequential two-probe method

를 보완하기 위해 고안된 방법이다. 이 방법에서는 레이저간섭계 등 별도의 각운동 측정장치를 이용하여 각운동오차를 측정한 후 보정을 하게 되며 그 원리 및 변수, 오차방향을 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서 $e_s(x)$ 는 이송계의 진직도오차, $e_f(x)$ 는 스트레이트 에지의 형상오차를 나타내며 $\theta(x)$ 는 이송계의 각운동오차를 나타낸다. 이송계 진직도오차의 대표직선(L_1)과 스트레이트 에지 형상오차의 대표직선(L_2) 사이의 정렬 상태를 고려하기 위해 두 대표직선 사이의 기울기 차를 k 라고 정의하면 임의의 x 위치에서의 정렬오차 $e_a(x)$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$e_a(x) = k \cdot x \tag{1}$$

이송계 상에 변위센서 A, B를 설치하고 이 때 두 센서 간의 간격을 l_x , 두 센서 간의 센서 축 방향 옵셋을 Δ 라 정의한다. 이송계를 센서 간격 l_x 만큼 이동시키는 경우, x_i 및 x_{i+1} 위치에서의 각운동오차의 영향을 고려한 각 센서의 측정값 $R_A(x_i)$, $R_B(x_i)$ 및 $R_A(x_{i+1})$ 은 각운동오차가 매우 작다고 가정할 때 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_A(x_i) = e_f(x_i) + e_s(x_i) + k \cdot x_i \tag{2}$$

$$R_B(x_i) = e_f(x_{i+1}) + e_s(x_i) + l_x \cdot \theta(x_i) - \Delta + k \cdot x_{i+1} \tag{3}$$

$$R_A(x_{i+1}) = e_f(x_{i+1}) + e_s(x_{i+1}) + k \cdot x_{i+1} \tag{4}$$

여기서 $i = 0, \dots, N-1$ 이며 N 은 측정데이터 수를 나타낸다. 식(2)-식(4)로부터 x_{i+1} 위치에서의 진직도오차 $e_s(x_{i+1})$ 와 스트레이트 에지의 형상오차 $e_f(x_{i+1})$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$e_s(x_{i+1}) = e_s(x_i) + R_A(x_{i+1}) - R_B(x_i) + l_x \cdot \theta(x_i) - \Delta \tag{5}$$

$$e_f(x_{i+1}) = e_f(x_i) + R_B(x_i) - R_A(x_i) - l_x \cdot \theta(x_i) + \Delta - k \cdot l_x \quad (6)$$

식(5)에서의 $-\Delta$ 와 식(6)에서의 $\Delta - k \cdot l_x$ 는 상수 항으로 계산과정의 각 스텝마다 일정하게 더해지며, 따라서 계산된 진직도오차와 형상오차는 이 상수항들에 의해 선형적으로 증가하거나 감소하게 된다. 하지만 이러한 영향은 선형이므로 계산된 진직도오차와 형상오차의 대표직선을 최소오차자승법에 의해 구하고 그 대표직선에 대한 편차만을 취하면 센서 측정방향 정렬오차 Δ 와 스트레이트 에지 정렬오차 k 에 의한 측정오차 없이 진직도오차와 형상오차를 구할 수 있다.

한편, 식(2)~식(6)은 센서 간의 간격 l_x 만큼 이송계를 이동시켜가며 측정했을 때의 진직도오차와 형상오차를 계산한 것이므로 상대적으로 센서간 간격 l_x 보다 짧은 파장의 고주파 성분은 얻을 수 없다. 센서 간격 l_x 당 n 개의 데이터를 얻는 경우에는 $j = 0, \dots, n-1$ 개의 데이터군에 대해 각각 식(5)와 식(6)을 적용하여 진직도오차 및 형상오차를 구한 후, $j = 1, \dots, n-1$ 의 프로파일이 각각 $j=0$ 인 경우의 프로파일과 최소의 오차를 갖도록 초기값을 설정함으로써 연속적인 프로파일을 구성할 수 있다.⁶

3. 센서 계인오차에 의한 영향 모델링

일반적으로 혼합측차이점법에서 많이 사용되는 정전용량형 변위센서(capacitive displacement sensor)의 경우 두 도체 전극 사이의 거리에 반비례하는 정전용량의 변화를 이용하여 변위를 검출하는 센서로서 다른 전기식 변위센서와 마찬가지로 변위를 전압신호로 변환하여 출력하며 이 때 계인오차와 비선형성을 가지게 된다. 계인오차의 경우 기본적으로 제조사에서 보정과정을 거치나 측정 셋업에서의 센서 틸트(tilt) 및 시간에 따른 특성변화 등으로 실제 측정에 있어서는 보정된 계인과는 일반적으로 약간의 차이를 가지게 된다. 예를 들어 전극 간 거리가 100 μm 이고 capacitor 직경이 12 mm 인 경우 5 mrad의 전극 간 상대적 틸트오차는 약 5.4 %의 계인오차를 유발하게 된다. 동일 조건에서 틸트오차에 의한 비선형성 증가는 약 0.6 %로 틸트오차가 계인오차에 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.¹⁴ 이상에서 알 수 있듯이 측정 과정에서 변위센서의 계인오차가 존재할 가능성이 높으므로 그 영향을 파악하는 것이 매우 중요하다.

본 연구에서는 실제 변위를 기준으로 센서에서 측정된 변위의 비율을 계인으로 정의하였으며 이상적인 경우 계인은 1이 되고 여기에서 벗어난 값을 센서의 계인오차로 볼 수 있다. 센서 A, B의 계인을 각각 G_A, G_B 라 정의하면 각 변위센서에서 측정되는 변위 $R_A^*(x_i), R_B^*(x_i)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$R_A^*(x_i) = G_A \cdot R_A(x_i) = G_A \cdot \{e_f(x_i) + e_s(x_i) + k \cdot x_i\} \quad (7)$$

$$R_B^*(x_i) = G_B \cdot R_B(x_i) = G_B \cdot \{e_f(x_{i+1}) + e_s(x_i) + l_x \cdot \theta(x_i) - \Delta + k \cdot x_{i+1}\} \quad (8)$$

$$R_A^*(x_{i+1}) = G_A \cdot R_A(x_{i+1}) = G_A \cdot \{e_f(x_{i+1}) + e_s(x_{i+1}) + k \cdot x_{i+1}\} \quad (9)$$

식(7)~식(9)를 식(5)과 식(6)에 대입하면 계인오차가 존재할 때 계산된 진직도오차 $e_s^*(x_{i+1})$ 과 형상오차 $e_f^*(x_{i+1})$ 은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} e_s^*(x_{i+1}) &= e_s^*(x_i) + R_A^*(x_{i+1}) - R_B^*(x_i) + l_x \cdot \theta(x_i) - \Delta \\ &= e_s^*(x_i) + R_A(x_{i+1}) - R_B(x_i) + l_x \cdot \theta(x_i) - \Delta \\ &\quad + (G_A - G_B) \cdot e_f(x_{i+1}) - (G_B - 1) \cdot l_x \cdot \theta(x_i) \\ &\quad + (G_A - 1) \cdot e_s(x_{i+1}) - (G_B - 1) \cdot e_s(x_i) \\ &\quad + (G_A - G_B) \cdot k \cdot x_{i+1} + (G_B - 1) \cdot \Delta \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} e_f^*(x_{i+1}) &= e_f^*(x_i) + R_B^*(x_i) - R_A^*(x_i) - l_x \cdot \theta(x_i) + \Delta - k \cdot l_x \\ &= e_f^*(x_i) + R_B(x_i) - R_A(x_i) - l_x \cdot \theta(x_i) + \Delta - k \cdot l_x \\ &\quad + (G_B - G_A) \cdot e_s(x_i) + (G_B - 1) \cdot l_x \cdot \theta(x_i) \\ &\quad + (G_B - 1) \cdot e_f(x_{i+1}) - (G_A - 1) \cdot e_f(x_i) \\ &\quad + (G_B - G_A) \cdot k \cdot x_i + (G_B - 1) \cdot (k \cdot l_x - \Delta) \end{aligned} \quad (11)$$

식(5), 식(6), 식(10), 식(11)로부터 계인오차가 존재할 때의 측정오차는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \{e_s^*(x_{i+1}) - e_s^*(x_i)\} - \{e_s(x_{i+1}) - e_s(x_i)\} \\ = (G_A - G_B) \cdot e_f(x_{i+1}) - (G_B - 1) \cdot l_x \cdot \theta(x_i) \\ + (G_A - 1) \cdot e_s(x_{i+1}) - (G_B - 1) \cdot e_s(x_i) \\ + (G_A - G_B) \cdot k \cdot x_{i+1} + (G_B - 1) \cdot \Delta \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \{e_f^*(x_{i+1}) - e_f^*(x_i)\} - \{e_f(x_{i+1}) - e_f(x_i)\} \\ = (G_B - G_A) \cdot e_s(x_i) + (G_B - 1) \cdot l_x \cdot \theta(x_i) \\ + (G_B - 1) \cdot e_f(x_{i+1}) - (G_A - 1) \cdot e_f(x_i) \\ + (G_B - G_A) \cdot k \cdot x_i + (G_B - 1) \cdot (k \cdot l_x - \Delta) \end{aligned} \quad (13)$$

식(12)의 $(G_B-1) \cdot \Delta$ 항과, 식(13)의 $(G_B-1) \cdot (k \cdot l_x - \Delta)$ 항은 상수 항으로 측정오차와 상관 없으나 이들을 제외한 나머지 항들은 측정오차에 영향을 미치게 된다. 특히 두 계인의 차이가 클수록, 그리고 스트레이트 에지의 정렬오차 k 가 커질수록 측정오차가 증폭됨을 알 수 있다.

한편, 식(12), 식(13)에서 특수한 경우로 두 변위센서의 계인이 $G_A = G_B = G$ 로 같은 경우를 생각할 수 있다. 이 경우 식(12), 식(13)은 다음과 같이 단순화된다.

$$\begin{aligned} & \{e_s^*(x_{i+1}) - e_s^*(x_i)\} - \{e_s(x_{i+1}) - e_s(x_i)\} \\ &= (G-1)\{e_s(x_{i+1}) - e_s(x_i) - l_x \cdot \theta(x_i)\} \\ & \quad + (G-1) \cdot \Delta \end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned} & \{e_f^*(x_{i+1}) - e_f^*(x_i)\} - \{e_f(x_{i+1}) - e_f(x_i)\} \\ &= (G-1) \cdot \{e_f(x_{i+1}) - e_f(x_i) + l_x \cdot \theta(x_i)\} \\ & \quad + (G-1) \cdot \{k \cdot l_x - \Delta\} \end{aligned} \tag{15}$$

식(14), 식(15)를 살펴보면 진직도오차 계산에서는 스트레이트 에지 형상오차의 영향이 소거되고, 스트레이트 에지 형상오차 계산에서는 진직도오차의 영향이 소거되며, 더 이상 스트레이트 에지의 정렬오차 k 가 측정오차에 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 즉 혼합측차이점법을 이용하여 이송계의 진직도오차와 스트레이트 에지의 형상오차를 분리할 때 두 센서 계인의 편차만을 보정하더라도 측정오차의 상당 부분을 감소시킬 수 있음을 보여 준다. 이송계에 정진용량형 센서를 장착하여 절대적인 계인을 알아내기는 힘들지만 두 계인의 편차는 상대적으로 쉽게 측정할 수 있다는 점을 감안하면 식(14)와 식(15)는 실제 혼합측차이점법의 적용에 있어서 상당히 중요한 의미를 내포하고 있다고 할 수 있다.

식(14)에서 두 번째로 고려해야 할 항은 $e_s(x_{i+1}) - e_s(x_i) - l_x \cdot \theta(x_i)$ 항이다. 수평방향 진직도오차 측정을 기준으로 할 때 이송계의 롤오차(roll error)에 의한 진직도오차 성분이 매우 작을 경우 way straightness 측정법¹⁵을 참고하면 이송계의 진직도오차 $e_s(x)$ 와 각운동오차(이 경우는 yaw error) $\theta(x)$ 는 다음과 같은 관계로 근사할 수 있다.

$$\frac{de_s(x)}{dx} \approx \tan \theta(x) \tag{16}$$

이송계의 각운동오차가 매우 작다고 가정하면

$\tan \theta(x)$ 는 $\theta(x)$ 로 근사할 수 있으며 식(16)에서부터 이송계 진직도오차는 다음과 같이 표현된다.

$$e_s(x) = \int_0^x \frac{de_s(x)}{dx} dx \approx \int_0^x \theta(x) dx \tag{17}$$

즉 이송계의 진직도오차는 각운동오차를 적분한 것으로 볼 수 있으며 Fig. 1과 같이 l_x 간격으로 이송계를 스텝 이송하면서 각운동오차를 측정하면 i 번째 위치에서의 진직도오차는 다음과 같이 근사될 수 있다.

$$e_s(x_{i+1}) \approx \sum_{k=0}^i \theta(x_k) \cdot l_x + const \tag{18}$$

식(18)로부터 다음과 같은 수식이 유도된다.

$$e_s(x_{i+1}) - e_s(x_i) - l_x \cdot \theta(x_i) \approx 0 \tag{19}$$

식(19)를 식(14)에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \{e_s^*(x_{i+1}) - e_s^*(x_i)\} - \{e_s(x_{i+1}) - e_s(x_i)\} \\ &= (G-1)\{e_s(x_{i+1}) - e_s(x_i) - l_x \theta(x_i)\} + (G-1)\Delta \\ & \approx (G-1)\Delta \end{aligned} \tag{20}$$

즉, 계인오차가 존재하더라도 두 센서의 계인이 동일할 경우 이송계의 진직도오차 측정에 미치는 영향이 매우 작음을 알 수 있다. 다만 스트레이트 에지 형상오차의 경우에는 식(15)에서 형상오차와 이송계 각운동오차와의 연관관계가 없으므로 계인오차가 동일하더라도 일정 부분 측정오차가 존재하게 된다.

4. 센서 계인오차에 의한 영향 시뮬레이션

혼합측차이점법에서 센서 계인오차에 의한 영향을 시뮬레이션 하기 위해서는 이송계의 진직도오차와 각운동오차 및 스트레이트 에지의 형상오차를 생성해야 하며 이 때 이송계의 진직도오차와 각운동오차는 서로 밀접하게 연관되어 있으므로 임의로 생성할 수 없다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 특정 이송계에서의 레일의 형상오차를 가정한 다음 전달함수법을 이용한 직선운동시스템 정밀도 시뮬레이션 기술¹⁶을 이용하여 이송계의 진직도오차와 각운동오차를 추출하였다.

Fig. 2는 시뮬레이션 대상으로 선정된 유정압 이송계의 레이아웃을 보여 준다. 유정압 이송계의 좌측 및 우측 레일은 각각 “C” 자 형태로 되어

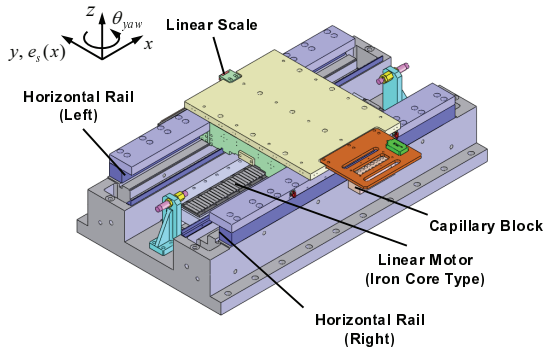


Fig. 2 Layout of hydrostatic bearing table for simulation

Table 1 Specifications of hydrostatic bearing

	Horizontal	Vertical
Supply Pressure	100 N/cm ²	
Dynamic Viscosity	10 cSt	
Capillary Coefficient	1.9153 × 10 ⁻⁵ mm ³	2.3457 × 10 ⁻⁵ mm ³
Load Capacity (ε=0.4)	9,237 N	14,340 N
Stiffness	1,660 N/μm	2,577 N/μm
Flow Rate	0.21 l/min	0.26 l/min

있으며 상/하 및 측면 방향으로 각각 3개의 패드가 레일과 마주보는 형태로 구성되어 있다. Table 1은 전달함수 생성에 사용된 유정압 베어링의 사양을 나타낸다.

유정압 이송계의 수평방향 진직도오차와 각운동오차(요오차)를 추출하기 위하여 1 mm 간격으로 임의로 생성한 수평방향 좌측 및 우측 레일의 형상오차를 Fig. 3에 나타내었다. 총 930 mm의 레일 길이에 대해 수평방향 좌측 레일의 형상오차는 15.78 μm, 우측 레일의 형상오차는 15.39 μm이며 형상오차의 부호는 Fig. 3의 우측 상단에 표시하였다. 운동오차 시뮬레이션에 있어서 수직방향 레일의 형상오차와 리니어모터에 의한 영향은 없는 것으로 가정하였다.

Fig. 4는 Fig. 3의 레일 형상오차를 이용하여 시뮬레이션 한 유정압 이송계의 수평방향 진직도 오차 e_s 와 요오차 θ_{yaw} 를 보여 준다. 총 465 mm의 행정에 대해 수평방향 진직도오차는 2.07 μm, 요오차는 6.22 arcsec로 예측되었다. Fig. 5는 센서 간격 l_s 가 15 mm인 경우를 가정하여 총 480 mm에 대해서 생성된 스트레이트 에지의 형상오차를 나타낸다. 형상오차 e_f 는 1.50 μm이며 스트레이트 에지의 정렬오차($k=10 \mu\text{m}/465\text{mm}$)가 포함될 경우 e_f+e_a 는 10.32 μm 이다.

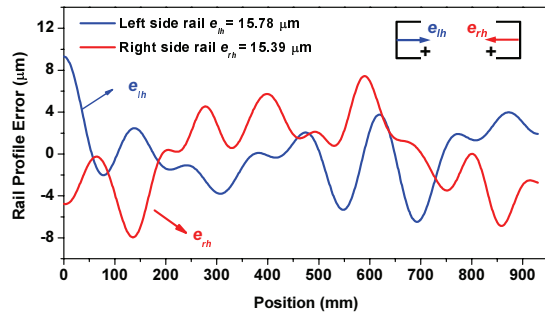


Fig. 3 Assumed rail profile errors in the horizontal direction

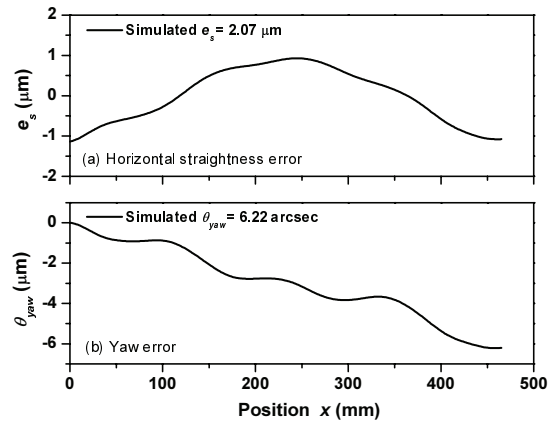


Fig. 4 Simulated motion errors of the hydrostatic bearing table

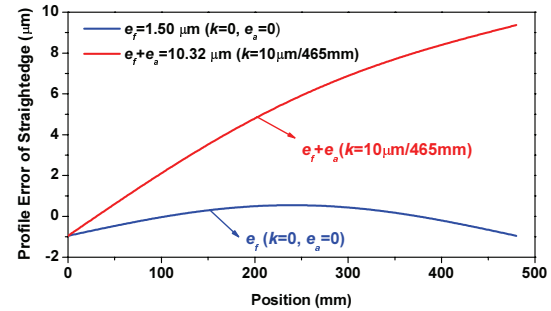


Fig. 5 Generated form error of the straightedge

이상의 과정을 거쳐서 생성된 이송계의 운동오차와 스트레이트 에지의 형상오차를 식(7), 식(8)에 대입하면 각각의 센서 계인에 대해 센서에서 측정되는 변위 R_A^* , R_B^* 를 구할 수 있다. 계인오차의 경우 5%를 기준으로 하였으며 Table 2에 시뮬레이션에서 고려된 센서 계인을 나타내었다.

Table 2 Cases of gains considered in the simulation

Case	G_A	G_B
No Gain Error	1	1
Different Gain Error	1	0.95
	1	1.05
Same Gain Error	0.95	0.95
	1.05	1.05

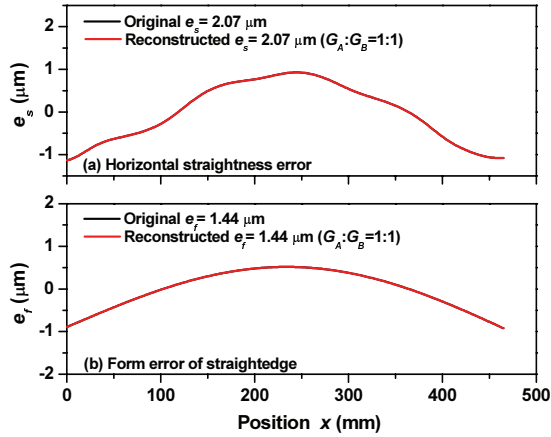


Fig. 6 Results of simulation in case of no gain error

각각의 계인 상태에서 구한 R_A^* , R_B^* 를 식(5)와 식(6)에 대입하면 진직도오차와 스트레이트 에지의 형상오차를 구할 수 있으며 이를 원래의 오차와 비교하였다. 이때 데이터 간격은 1 mm, 센서 간격은 15 mm이며 총 15개의 데이터 군에 대해 참고 문헌 6의 방법을 이용함으로써 1 mm 간격의 연속적인 진직도오차 및 형상오차 프로파일을 구하였다.

Fig. 6은 계인오차가 없을 때, 즉 G_A 와 G_B 가 각각 1일 경우에 계산한 오차와 원래의 오차를 비교한 결과를 보여 준다. 당연한 결과이지만 계인오차가 없을 경우 원래의 진직도오차 및 형상오차와 완벽하게 동일한 것을 알 수 있다. 이 때 스트레이트 에지의 형상오차가 1.44 μm 로 Fig. 5의 1.50 μm 와 다른 이유는 Fig. 6(b)의 경우 측정 구간인 465 mm에 대해서 계산된 결과로 스트레이트 에지 전체의 길이 480 mm를 기준으로 표시한 Fig. 5와는 약간의 차이가 발생하기 때문이다.

Fig. 7은 스트레이트 에지의 정렬오차가 없고 ($k=0$), 계인이 서로 다른 경우 ($G_A:G_B=1:0.95$, $G_A:G_B=1:1.05$)에 대해 각각 계산된 진직도오차와 형상오차를 원래의 오차와 비교한 것이다. 계인이 서로 다를 경우 식(12)와 식(13)에서 나타낸 것처럼

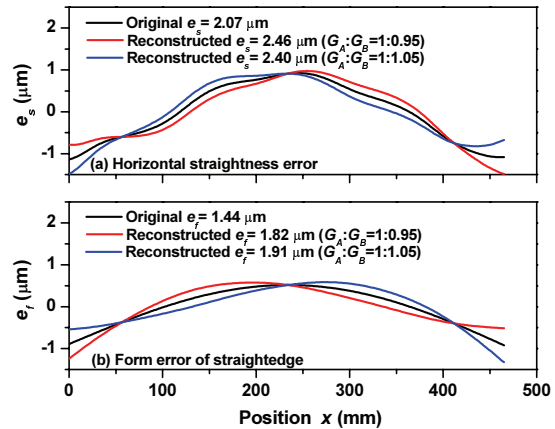


Fig. 7 Results of simulation in case of different gain ($k=0$)

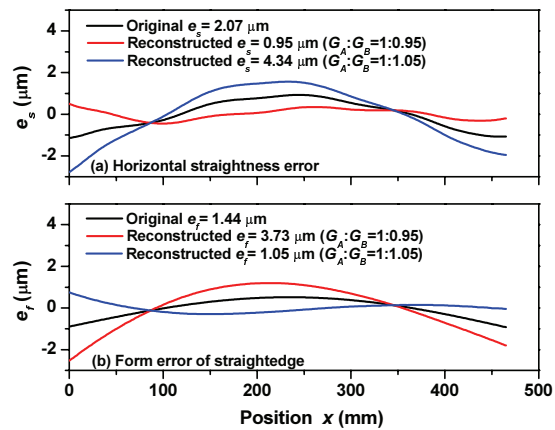


Fig. 8 Results of simulation in case of different gain with alignment error ($k=10 \mu\text{m}/465 \text{ mm}$)

처럼 계인의 편차 및 계인오차에 원래의 진직도오차, 형상오차 및 각운동오차가 곱해져서 측정오차를 유발하는 것을 확인할 수 있다. 진직도오차의 경우 원래 값인 2.07 μm 에서 0.33~0.39 μm 의 측정오차를 보였으며 형상오차의 경우 원래 값인 1.44 μm 에서 0.38~0.47 μm 정도의 측정오차를 나타냈다.

Fig. 8은 스트레이트 에지의 정렬오차가 존재하고 ($k=10 \mu\text{m}/465 \text{ mm}$), 계인이 서로 다른 경우 ($G_A:G_B=1:0.95$, $G_A:G_B=1:1.05$)에 대해 비교한 결과를 나타낸다. 식(12)와 식(13)에서 예측한 것처럼 계인편차와 k 가 포함된 오차항이 추가되면서 측정오차가 크게 증폭되는 것을 확인할 수 있다. 진직도오차의 경우 원래 값인 2.07 μm 에서 -1.12~2.27

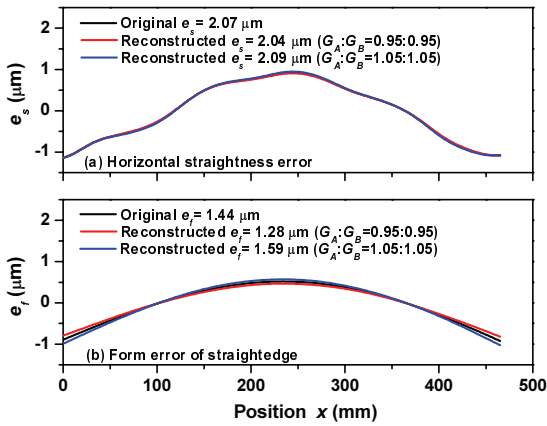


Fig. 9 Results of simulation in case of same gain error ($k=0$)

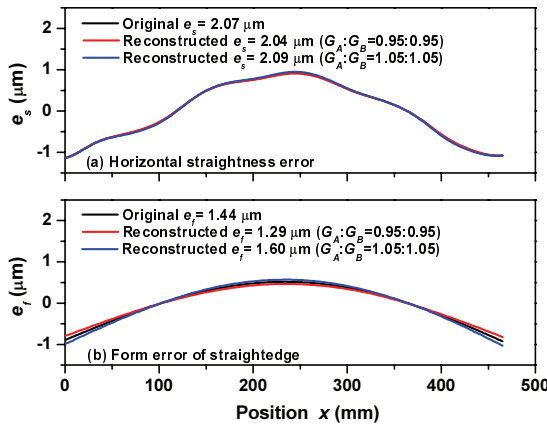


Fig. 10 Results of simulation in case of same gain error ($k=10 \mu\text{m}/465 \text{ mm}$)

μm 의 측정오차를 보였으며 형상오차의 경우 원래 값인 $1.44 \mu\text{m}$ 에서 $-0.39 \sim 2.29 \mu\text{m}$ 정도의 측정오차를 나타냈다.

Fig. 9는 스트레이트 에지의 정렬오차가 없고 ($k=0$), 게인오차가 서로 같은 경우 ($G_A:G_B=0.95:0.95$, $G_A:G_B=1.05:1.05$)에 대해 비교한 결과를 나타낸다. 진직도오차의 경우 식(20)에서 예측했듯이 원래 값인 $2.07 \mu\text{m}$ 에서 $-0.03 \sim 0.03 \mu\text{m}$ 의 매우 작은 차이만을 보이고 있으며 형상오차의 경우 원래 값인 $1.44 \mu\text{m}$ 에서 $-0.16 \sim 0.15 \mu\text{m}$ 의 차이를 보여 진직도오차에 비해 크기는 하나 Fig. 7의 결과와 비교해서는 측정오차가 크게 감소함을 알 수 있다.

Fig. 10은 스트레이트 에지의 정렬오차가 존재

하고 ($k=10 \mu\text{m}/465\text{mm}$), 게인오차가 서로 같은 경우 ($G_A:G_B=0.95:0.95$, $G_A:G_B=1.05:1.05$)에 대해 비교한 결과를 나타낸다. 게인오차가 서로 다른 경우인 Fig. 8의 결과와는 달리 정렬오차가 존재하더라도 측정오차는 정렬오차가 없을 경우와 동일한 수준을 유지하는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 혼합측차이점법을 이용한 이송계 진직도오차의 정밀 측정에서 센서의 게인오차가 측정오차에 미치는 영향을 이론적으로 분석하고 시뮬레이션 하였다. 우선, 두 센서의 게인오차가 존재하고 서로 다른 경우, 이송계의 진직도오차 및 각운동오차, 스트레이트 에지의 형상오차 및 정렬오차가 게인오차와 곱해지면서 측정오차가 매우 커지는 현상을 파악하였다. 반면에 게인오차가 존재하더라도 서로 같은 경우에는 오차항 중 상당수가 상쇄되어 측정오차가 줄어들며 특히 정렬오차에 의한 영향이 제거됨을 알 수 있었다. 또한 진직도오차의 경우 진직도오차와 각운동오차의 상관관계에 의해 오차항의 상당 부분이 추가로 상쇄되어 형상오차에 비해 더 정밀하게 측정할 수 있음을 확인하였다.

일반적으로 정전용량형 센서의 경우 제조사에서 게인오차를 보정하여 제공하고 있으나 센서의 게인특성은 시간에 따른 변화와 함께 장착 시의 틸트오차에도 큰 영향을 받으므로 절대적인 게인오차를 완벽히 보정하기는 쉽지 않다. 이에 반해 두 센서를 실제 측정 지그에 장착한 상태에서 센서 게인의 편차를 측정, 보정하는 것은 상대적으로 용이하며 본 연구의 결과는 이러한 과정만으로도 진직도오차 측정에서 측정오차를 크게 감소시킬 수 있음을 보여 준다.

후 기

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업 (No.10033595, No.10038577)의 지원을 통해 수행되었습니다. 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Moore Nanotechnology Systems, <http://www.nanotechsys.com>

2. Hewlett Packard Co., "Laser Measurement System User's Guide, Manual Part No. 00528-90010," 1984.
3. Evans, C. J., Hocken, R. J., and Estler, W. T., "Self-Calibration: Reversal, Redundancy, Error Separation and 'Absolute Testing'," *Annals of the CIRP*, Vol. 45, No. 2, pp. 617-634, 1996.
4. Tanaka, H., Tozawa, K., Sato, H., O-hori, M., and Sekiguchi, H., "Application of a New Straightness Measurement Method to Large Machine Tool," *Annals of the CIRP*, Vol. 30, No. 1, pp. 455-459, 1981.
5. Tozawa, K., Sato, H., and O-hori, M., "New Method for the Measurement of the Straightness of Machine Tools and Machined Work," *ASME J. of Mechanical Design*, Vol. 104, No. 3, pp. 587-592, 1982.
6. Gao, W. and Kiyono, S., "High Accuracy Profile Measurement of a Machined Surface by the Combined Method," *Measurement*, Vol. 19, No. 1, pp. 55-64, 1996.
7. Tanaka H., Sato, H., "Extensive Analysis and Development of Straightness Measurement by Sequential-Two-Points Method," *Trans. ASME J. of Eng. for Ind.*, Vol. 108, pp. 176-182, 1986.
8. Gao, W. and Kiyono, S., "On-Machine Profile Measurement of Machined Surface Using the Combined Three-Point Method," *JSME Int. J. Series C*, Vol. 40, No. 2, pp. 253-259, 1997.
9. Gao, W., Yokoyama, J., Kojima, H., and Kiyono, S., "Precision Measurement of Cylinder Straightness Using a Scanning Multi-Probe System," *Precision Engineering*, Vol. 26, No. 3, pp. 279-288, 2002.
10. Fung, E. H. K., and Yang, S. M., "An Approach to On-Machine Motion Error Measurement of a Linear Slide," *Measurement*, Vol. 29, No. 1, pp. 51-62, 2001.
11. Oh, Y. J., Park, C. H., Hwang, J. H., and Lee, D. W., "Measurement of Five DOF Motion Errors in the Ultra Precision Feed Tables," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 22, No. 11, pp. 135-141, 2005.
12. Park, C. H., Oh, Y. J., Shamoto, E., and Lee, D. W., "Compensation of Five DOF Motion Errors of Hydrostatic Feed Table by Utilizing Actively Controlled Capillaries," *Precision Engineering*, Vol. 30, No. 3, pp. 299-305, 2006.
13. Oh, J. S., Khim, G., Oh, J. S., and Park, C. H., "Precision Measurement of Rail Form Error in a Closed Type Hydrostatic Guideway," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 13, No. 10, pp. 1853-1859, 2012.
14. Hicks, T. R. and Atherton, P. D., "The NanoPositioning Book," Queensgate Instruments, pp. 59-62, 1997.
15. Optodyne, Inc., <http://www.optodyne.com/opnew5/TecArt/tech29.pdf>
16. Oh, J. S., Khim, G., Park, C. H., Chung, S. J., Lee, S. K., and Kim, S. J., "Accuracy Simulation of the Precision Linear Motion Systems," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 28, No. 3, pp. 275-284, 2011.