

### 3 자유도 위치 결정 기구의 위치 오차 평가 및 보정법에 대한 불확도 분석

박재준\*, 엄형욱\*, 조남규#

#### An Uncertainty Analysis of a Compensation Method for the Positioning Error of Three-DOF Manipulator

Jae-jun Park\*, Hyungwook Eom\* and Nahmgyoo Cho#

#### ABSTRACT

This study analyzes the uncertainty of the compensation method of a sensing error of three-DOF measuring system. This compensation method utilizes a reference coordinate system using a three point by moving a position of an end-point of a three-DOF manipulator. The coordinate transformation between the three-DOF manipulator and the measuring system is identified by the reference coordinate system. According to the concept of this compensation method, each positioning error at any position of the end-point of the manipulator is derived. Uncertainty analyses of the compensation values on the basis of sensitivity analysis and Monte Carlo simulation are used to investigate a feasibility and effectiveness of the compensation method.

**Key Words** : Three-DOF manipulator (3 축 구동기구), Positioning error (위치 결정 오차), Compensation method(보정법), Uncertainty analysis (불확도 분석)

#### 1. 서론

다자유도 구동 시스템에는 CMM(coordinate measuring machine), NC Machine, 초정밀 위치 결정 기구 등이 있다. 이러한 다자유도 구동 시스템은 제작오차, 조립오차, 설치오차 등 다양한 오차요인들로 인하여 위치 결정 오차(positioning error)가 발생한다.

다자유도 구동 시스템에서 발생하는 위치 결정 오차를 보정하기 위한 방법으로 다자유도 구동 시

스템의 기구학적 교정법<sup>1,2</sup>이 있다. 이 방법은 엔드 포인트(end-point) 또는 공구(tool)의 위치나 자세를 측정하여 기구학적 변수들을 규명하는 방법으로, 기구 내부에 센서를 부착하여 전체 구동부를 측정 및 분석하는 방법이다. 이 방법은 실시간 보정과 각 파라미터의 민감도 분석이 가능하지만, 기구 내 다수의 센서장착으로 구동범위에 제한을 가지게 되며 정확한 위치 추정이 어려운 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 새롭게 연구된 방법이 다자유도 구동 시스템의 엔드 포인트

접수일: 2006년 3월 10일; 게재승인일: 2006년 5월 29일

\* 한양대학교 대학원 정밀기계 공학과

# 교신저자 : 한양대학교 기계정보경영학부

E-mail ngcho@hanyang.ac.kr Tel. (031) 400-5286

를 직접 측정하는 방법이다. 이 방법은 외부 측정 기기 및 센서를 이용하여 엔드 포인트의 위치와 자세를 직접 측정하여 기구학적 변수들을 규명하는 방법으로, 레이저 간섭계(laser interferometer),<sup>3</sup> 레이저 트래킹(laser tracking),<sup>4,5</sup> 비전 시스템(vision system)<sup>6</sup>, 경의의(theodolite),<sup>7,8</sup> 수평계(inclinometer)<sup>9</sup> 등이 이용된다. 이러한 측정방법들은 보정의 직접적인 대상인 엔드 포인트를 직접 측정하는 장점이 있지만, 설치가 복잡하고 설치오차를 제거하기 위해 정밀 얼라인먼트(alignment)기술이 요구되고 또한 구동 시스템과 측정 시스템 사이에 좌표계 설정오차가 발생하는 단점이 발생한다.

이러한 문제점들을 해결하기 위하여 선행연구에서는 3 자유도 위치 결정 기구의 위치 오차 보정법<sup>10</sup>을 제안하였다. 이 방법에서는 구동 시스템과 측정 시스템 사이에 발생하는 좌표계간의 불일치가 측정 오차에 미치는 영향을 제거하기 위해 구동 시스템의 작업 공간상에 가상의 기준 좌표계(reference coordinate system)을 설정하였다. 그리고 이를 통하여 구동시스템의 좌표계와 측정 시스템의 좌표계간의 관계를 규명하는 좌표계 동정(identification) 알고리즘과 위치 결정 오차를 산출하는 방법을 제안하였으나 측정오차에 의한 적용 가능성은 검토되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 제안되었던 보정법에 의하여 구한 오차 보정량에 대하여 불확도 분석을 실시하고 몬테카를로법에 의한 추가검증을 통하여 위치 결정 오차 보정 알고리즘의 적용 가능성을 평가하였다.

## 2. 구동 시스템의 위치 오차 산출/평가법

본 연구에서 제안된 구동 시스템의 위치 오차 산출 및 평가법은 좌표계 동정과정과 위치 오차 산출과정으로 이루어져있다. 좌표계 동정과정은 구동 시스템을 구동시켜 엔드 포인트의 위치를 작업 공간 내 임의의 3 점으로 이동시키고, 측정 시스템을 이용하여 이동된 3 점을 측정한다. 이렇게 얻어진 3 점의 정보를 통하여 기준 좌표계를 설정하고, 이 기준 좌표계를 이용하여 구동 시스템의 좌표계와 측정 시스템의 좌표계를 동정한다. 또한, 위치 오차 산출과정은 동정된 좌표계 관계를 기준으로 엔드 포인트의 명령된 위치와 측정 시스템으로 측정된 엔드 포인트의 위치를 비교하여 주어진 엔드 포인트의 위치에서의 오차를 산출하고 평가한다.

Fig. 1 은 구동 시스템의 위치 오차 보정량 산출 방법을 나타낸다.

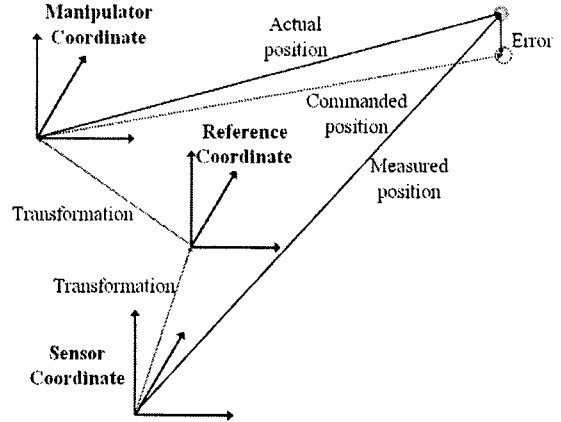


Fig. 1 Schematic of positioning error calculation

### 2.1 구동 시스템의 위치 오차의 정의

구동 시스템의 위치오차는 구동 시스템에서 엔드 포인트에 명령되는 좌표값과 실제로 구동했을 경우의 엔드 포인트의 실제 좌표값의 차로 정의한다. 명령되는 좌표값과 실제 움직인 좌표값의 차이는 구동시스템의 제작오차, 조립오차, 가공오차 등으로 인하여 발생한다.

### 2.2 좌표계 동정(identification)

#### 2.2.1 기준 좌표계 설정

선행연구<sup>10</sup>에서 설명했듯이, 구동 시스템을 작동시켜 얻은 3 점  ${}^mP_1, {}^mP_2, {}^mP_3$ 을 이용하여 작업 공간상에 구동 좌표계상에 기준 좌표계를 정의한다.

$${}^m\hat{x}_r = \frac{\overline{{}^mP_1 {}^mP_2}}{\sqrt{{}^mP_1 {}^mP_2}} , {}^m\hat{y}_r = \frac{\overline{{}^mP_1 {}^mP_3}}{\sqrt{{}^mP_1 {}^mP_3}} , {}^m\hat{z}_r = {}^m\hat{x}_r \times {}^m\hat{y}_r \quad (1)$$

구동 시스템을 구동시킨 후 측정시스템으로 얻은 3 점의 위치를  ${}^cP_1, {}^cP_2, {}^cP_3$ 으로 정의하면, 측정 좌표계상에서의 기준 좌표계는 식(2)와 같이 설정된다.

$${}^c\hat{x}_r = \frac{\overline{{}^cP_1 {}^cP_2}}{l_{12}} , {}^c\hat{y}_r = \frac{\overline{{}^cP_1 {}^cP_3} - \vec{\delta}_x}{l_{13} \cos \theta} , {}^c\hat{z}_r = {}^c\hat{x}_r \times {}^c\hat{y}_r \quad (2)$$

여기서,  $\vec{\delta}_x = -l_{13} \sin \theta \cdot \hat{x}_r$ ,

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \cos^{-1} \left( \frac{l_{12}^2 + l_{13}^2 - l_{23}^2}{2l_{12}l_{13}} \right)$$

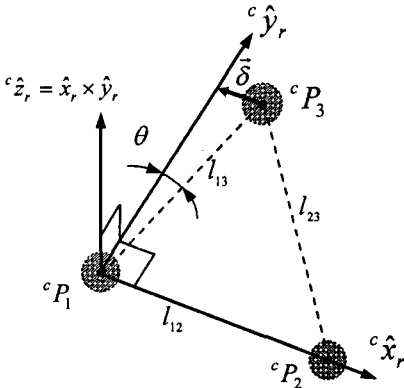


Fig. 2 Definition of reference coordinate system at sensor system

2.2.2 좌표계 변환

앞의 2.2.1 절에 의해 결정된 기준 좌표계를 이용하여 좌표계 변환을 하게된다. 우선 구동 시스템의 좌표계와 기준 좌표계간의 변환행렬은 식(3)과 같이 정의 된다.

$${}^m_r\mathbf{T} = \begin{bmatrix} {}^m\hat{x}_r & {}^m\hat{y}_r & {}^m\hat{z}_r & {}^m x_1 \\ & & & {}^m y_1 \\ & & & {}^m z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

다음으로 센서 시스템의 좌표계와 기준 좌표계간의 변환행렬은 식(4)와 같이 정의 된다.

$${}^c_r\mathbf{T} = \begin{bmatrix} & & & {}^c x_1 \\ {}^c\hat{x}_r & {}^c\hat{y}_r & {}^c\hat{z}_r & {}^c y_1 \\ & & & {}^c z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.3 구동 시스템의 위치 오차 보정량 산출

구동 시스템의 오차가 포함되어 센서 시스템에 의하여 측정된 엔드 포인트의 좌표값  ${}^m\bar{\mathbf{p}}_{obj}$  를 구동 시스템의 좌표계 상의 값으로 표현하면 식(5)과

같다.

$${}^m\bar{\mathbf{p}}_{o,actual} = {}^m_r\mathbf{T}_c^r\mathbf{T}_c^c\bar{\mathbf{p}}_{obj} \quad (5)$$

그러므로, 구동 시스템에서 임의의 엔드 포인트 위치에서의 오차는 식(6)와 같이 표현 될 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{e}} &= \left| {}^m\bar{\mathbf{p}}_{o,command} - {}^m\bar{\mathbf{p}}_{o,actual} \right| \\ &= \left| {}^m\bar{\mathbf{p}}_{o,command} - {}^m_r\mathbf{T}_c^r\mathbf{T}_c^c\bar{\mathbf{p}}_{obj} \right| \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,  $\bar{\mathbf{e}} = (e_x, e_y, e_z)$

3. 위치 오차의 불확도 분석

불확도(Uncertainty)는 측정결과에 관련하여, 측정량을 합리적으로 추정한 값의 분산 특성을 나타내는 파라미터로 정의된다. 여기서 파라미터는 표준편차(Standard deviation) 혹은 그의 배수나 명시된 신뢰구간의 반 너비로 나타낸다.<sup>11</sup>

측정 시스템의 센서 분해능(Sensor resolution)의 영향으로 인하여 여러 가지 불확도 요인이 측정결과에 전파되어 위치 보정량에 영향을 미친다. 따라서, 위치 결정 오차의 불확도가 최소가 되는 조건을 분석하고, 이 결과를 통해 보정법이 적용된 위치 결정 오차 보정량과 적용되지 않았을 경우의 위치 결정 오차 보정량을 비교하여, 제안한 보정법의 효용성을 검증한다.

3.1 분석 대상의 정의

불확도 분석(Uncertainty analysis)을 하기 위하여 먼저 분석할 대상과 조건을 결정한다. Table 1 과 같이 조건과 대상을 정의하였다.

Table 1 Definition of condition and object

condition	Work space range	175×175×50 μm
	Sensor resolution	±0.3×10 <sup>-3</sup> μm
object	Compensation values from the proposed compensation method	

3.2 제안한 보정법의 분석도구

불확도 분석을 위한 조건과 대상이 결정되면 그 조건과 대상에서 발생하는 오차 요인을 분석한

후 불확도 분석을 한다. 불확도 분석의 방법으로 감도 분석(Sensitivity analysis)을 이용한 불확도 산출법과 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation)을 이용한다.

### 3.2.1 오차 발생 요인

기준 좌표계 설정 시 측정 시스템의 센서 분해능의 영향으로 인하여 발생하는 불확도 요인을 고려할 수 있다. 측정 시스템에 의해 측정되는 3 점  $P_1, P_2, P_3$  는 측정 시스템의 센서 분해능 때문에 측정 오차가 발생한다. 또한 엔드 포인트의 측정 점도 센서 분해능의 영향으로 인하여 불확도의 요인이 된다.

### 3.2.2 불확도 분석

불확도 분석 방법에는 감도 분석법과 몬테카를로 시뮬레이션법이 있다. 두 가지 방법을 비교를 해서 분석방법에 문제를 검증한다.

감도 분석법은 측정시스템으로 얻은 보정량을 정의하는 것으로 시작한다. Fig. 5 와 Fig.6 에서 발생하는 오차 요인을 포함하는 각 축의 일반화된 오차 모델을 식(7)와 같이 정의한다.

$$e_x = f_x(q_i), \quad e_y = f_y(q_i), \quad e_z = f_z(q_i) \quad (7)$$

보정량의 불확도는 식(8)를 이용하여 구할 수 있다.

$$u_{e_x} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f_x(q_i)}{\partial q_i} \cdot u(q_i) \right)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\theta_{xi} \cdot u(q_i))^2}$$

$$u_{e_y} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f_y(q_i)}{\partial q_i} \cdot u(q_i) \right)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\theta_{yi} \cdot u(q_i))^2} \quad (8)$$

$$u_{e_z} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f_z(q_i)}{\partial q_i} \cdot u(q_i) \right)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\theta_{zi} \cdot u(q_i))^2}$$

여기서,

$$\theta_{xi} = \frac{\partial f_x(q_i)}{\partial q_i}, \quad \theta_{yi} = \frac{\partial f_y(q_i)}{\partial q_i}, \quad \theta_{zi} = \frac{\partial f_z(q_i)}{\partial q_i} \quad (9)$$

식(9)은 각 오차에 대한 감도(Sensitivity index)로 테일러 급수 전개(Taylor series)를 이용해 구하게 되고,  $u(q_i)$  는 정규분포(Normal distribution)를 갖는 변

동 요인들의 표준 불확도 성분으로 신뢰수준 99%로 정의한다. 이렇게 구해진 각 축의 불확도를 식(8)을 이용하여 합성함으로써 최종적인 불확도 값을 구한다.

$$u_e = \sqrt{(u_{e_x})^2 + (u_{e_y})^2 + (u_{e_z})^2} \quad (10)$$

Table 2 는 감도 분석법의 조건을 나타내고, 뒷 페이지의 Table 4 는 Table 2 에서의 조건을 이용하여 불확도를 구한 예를 보여준다.

Table 2 Condition of sensitivity analysis

Condition	
Work space range	175 × 175 × 50 μm
Reference artifact distance	100 μm
End- point position	125 × 125 × 35 μm
Sensor resolution	± 0.3 × 10 <sup>-3</sup> μm

이렇게 구해진 각 축의 불확도를 식(10)을 이용하여 합성함으로써 최종적인 불확도 값을 구한다. 식(10)을 이용하여 합성한 결과 0.4445 × 10<sup>-3</sup> μm (99%)의 불확도 값을 구할 수 있다.

몬테카를로 시뮬레이션법은 각 검토표항에 대해 10000 회씩 수행하였다. 측정 오차 성분을 정규분포(Normal distribution)으로 가정하고 분해능의 한계구간을 99%의 신뢰구간으로 가정 후 발생시켰으며, 측정기 분해능은 ±0.3 × 10<sup>-3</sup> μm 로 설정하였다. Table 3 과 같이 몬테카를로 시뮬레이션법에서도 감도 분석법과 같은 조건을 적용하여 불확도 값을 구하고, 앞의 감도 분석법과 불확도 값을 비교하여 불확도 산출 시뮬레이션을 검증한다.

Table 3 Condition of Monte Carlo simulation

Condition	
Frequency	10000
Work space range	175 × 175 × 50 μm
Reference artifact distance	100 μm
Object ball position	125 × 125 × 35 μm
Sensor resolution	± 0.3 × 10 <sup>-3</sup> μm

Table 4 Example of sensitivity analysis

Uncertainty factors	Uncertainty elements	Sensitivity( $\theta_{xi}$ ) ( $\mu\text{m}$ )	Sensitivity( $\theta_{yi}$ ) ( $\mu\text{m}$ )	Sensitivity( $\theta_{zi}$ ) ( $\mu\text{m}$ )
End-point Positioning error	x-axis	1	$1.2893 \times 10^{-6}$	$1.0042 \times 10^{-6}$
	y-axis	$1.2893 \times 10^{-6}$	1	$0.5408 \times 10^{-6}$
	z-axis	$1.0042 \times 10^{-6}$	$0.5408 \times 10^{-6}$	1
1 <sup>st</sup> Reference artifact Positioning error	x-axis	1	$1.9340 \times 10^{-6}$	$0.2002 \times 10^{-6}$
	y-axis	1.25	0.25	$1.3005 \times 10^{-6}$
	z-axis	0.35	0.35	1.5
2 <sup>nd</sup> Reference artifact Positioning error	x-axis	$1.2602 \times 10^{-6}$	$1.6117 \times 10^{-6}$	$1.2553 \times 10^{-6}$
	y-axis	1.25	1.25	$1.4357 \times 10^{-6}$
	z-axis	0.35	$0.6761 \times 10^{-6}$	1.25
3 <sup>rd</sup> Reference artifact Positioning error	x-axis	0	$1.6117 \times 10^{-6}$	$0.4513 \times 10^{-6}$
	y-axis	0	$0.1893 \times 10^{-6}$	$0.6761 \times 10^{-6}$
	z-axis	0	0.35	1.25
		$U_{ex}=0.2595 \times 10^{-3}$	$U_{ey}=0.1970 \times 10^{-3}$	$U_{ez}=0.2936 \times 10^{-3}$

불확도는 각 축의 표준편차를 합성한 값으로 나타낼 수 있고 그 값은 Table 5의 결과에서 볼 수 있으며,  $0.4386 \times 10^{-3} \mu\text{m}$ (99%)이다. 그러므로 Table 3과 Table 5를 비교해보면 같음을 알 수 있다.

Table 6은 여러 조건을 변화시켜 불확도 산출 시뮬레이션을 검증한 결과이다. 어느 조건에서든 시뮬레이션의 결과는 같음을 알 수 있다.

Table 5 Example of Monte Carlo simulation

Axis	Mean	Standard deviation
X-axis	$-6.590 \times 10^{-7} \mu\text{m}$	$0.2665 \times 10^{-3} \mu\text{m}$
Y-axis	$-1.5123 \times 10^{-6} \mu\text{m}$	$0.1957 \times 10^{-3} \mu\text{m}$
Z-axis	$2.460 \times 10^{-6} \mu\text{m}$	$0.2882 \times 10^{-3} \mu\text{m}$
Combined uncertainty		$0.4386 \times 10^{-3} \mu\text{m}$ (99%)

### 3.3 기준좌표계의 조건이 불확도에 미치는 영향

오차 보정량의 불확도를 구하기 이전에 먼저

기준 좌표계의 조건이 보정량의 불확도에 미치는 영향을 분석해보도록 한다. Fig. 3과 같이 엔드 포인트의 위치를 고정시킨 후, 기준 좌표계의 설정 시 구한 3점의 위치를 변화시키고 각 변경지점에서 불확도를 구하였으며, 3점의 위치 변화가 불확도에 미치는 영향을 분석하였다. 이로써, 불확도가 최소가 되는 기준물(Reference artifact)의 거리를 결정한다.

Table 7은 기준 좌표계의 조건이 보정량의 불확도에 미치는 영향분석을 위한 조건을 나타낸다.

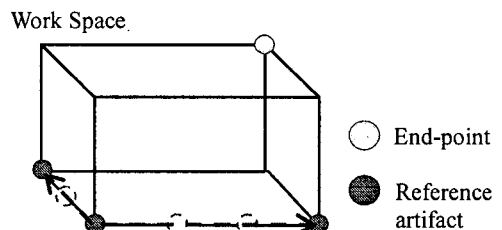


Fig. 3 Change of reference artifact distance

Table 6 Comparison between Sensitivity analysis and Monte Carlo simulation

Reference artifact Distance ( $\mu\text{m}$ )	End-point position ( $\mu\text{m}$ )	Sensitivity ( $\times 10^{-3} \mu\text{m}$ )	Monte Carlo ( $\times 10^{-3} \mu\text{m}$ )
50	25×25×7	0.2746	0.2751
	100×100×28	0.6904	0.6940
	175×175×50	1.2278	1.2249
100	25×25×7	0.2637	0.2616
	100×100×28	0.3734	0.3729
	175×175×50	0.6056	0.6018
150	25×25×7	0.2674	0.2678
	100×100×28	0.2984	0.2986
	175×175×50	0.4201	0.4195

Table 7 Condition of uncertainty analysis

Condition	
Work space range	175×175×50 $\mu\text{m}$
Reference artifact distance	0~175 $\mu\text{m}$
End-point position	175×175×50 $\mu\text{m}$
Sensor resolution	$\pm 0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}$

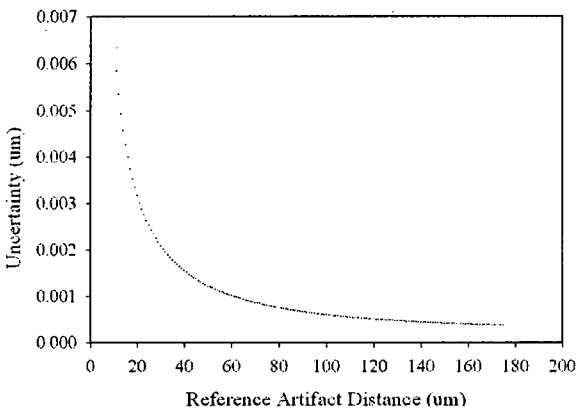


Fig. 4 Effect of reference artifact distance

Fig. 4 는 기준 좌표계의 조건이 보정량의 불확도에 미치는 영향을 그래프로 나타낸 결과이다. 앞의 결과와 그래프의 결과를 토대로 기준물의 크기가 커질수록 불확도는 줄어든다는 사실을 알 수 있다. 그러므로 조건으로부터 기준 작업공간상에서 기준물 거리가 최대가 되는 175 $\mu\text{m}$  에서 불확도가 최소가 됨을 알 수 있다.

앞의 결과로 결정된 불확도가 최소가 되는 기준물의 거리 175 $\mu\text{m}$  를 적용하여 오차 보정량이 갖는 불확도를 구한다. 오차 보정량을 구하는 방법은 기준물의 거리를 175 $\mu\text{m}$  에 고정시키고 엔드 포인트의 위치를 대각선 방향으로 점점 이동시켜가며 그 지점에서의 불확도를 구한다. Fig. 5 는 오차 보정량이 갖는 불확도를 구하는 개념도를 나타낸다.

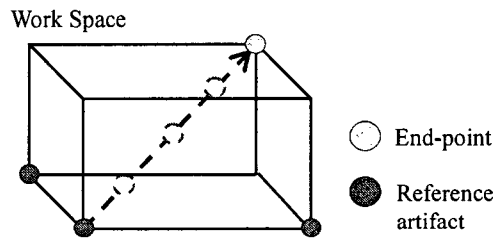


Fig. 5 Change of end-point position

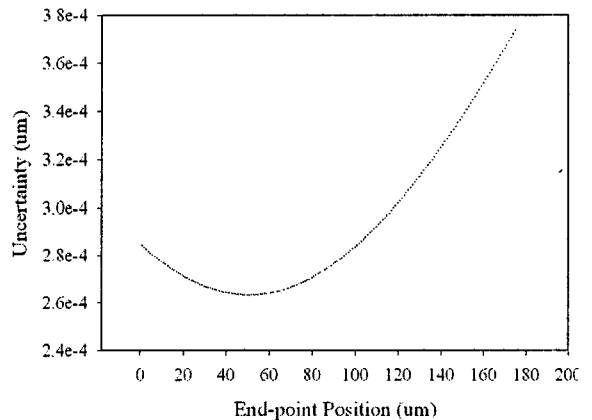


Fig. 6 Effect of end-point position

Table 8 은 오차 보정량이 갖는 불확도를 구하기 위한 조건을 나타내고 Fig. 6 은 그 결과를 보여주는 그래프이다. Fig. 6 의 결과 그래프에서 보

는 바와 같이 오차 보정량의 불확도의 값은  $0 \times 0 \times 0 \mu\text{m}$  에서부터  $175 \times 175 \times 50 \mu\text{m}$  로 갈수록 줄어 들다가 다시 증가하는 경향을 보인다. 오차 보정량의 불확도의 최소값은  $50 \times 50 \times 14 \mu\text{m}$  의 위치에서  $\pm 0.13 \times 10^{-3} \mu\text{m}$  의 범위 이내의 값을 보이고 오차 보정량의 불확도의 최대값은  $175 \times 175 \times 50 \mu\text{m}$  의 위치에서  $\pm 0.19 \times 10^{-3} \mu\text{m}$  의 범위 이내의 값을 보인다. 이와 같은 오차 보정량의 불확도 값은 초기 제안한 조건의 작업 공간내에서 보정량의 불확도가 측정 시스템의 센서 분해능인  $\pm 0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}$  보다 작은 값으로 제안한 보정 알고리즘의 적용 가능성이 확인할 수 있다.

Table 8 Condition of uncertainty analysis

Condition	
Work space range	$175 \times 175 \times 50 \mu\text{m}$
Reference artifact distance	$175 \mu\text{m}$
End-point position	$0 \times 0 \times 0 \sim 175 \times 175 \times 50 \mu\text{m}$
Sensor resolution	$\pm 0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}$

### 3.4 기준좌표계를 고려하지 않은 보정법

제안한 보정법의 효용성을 검증하기 위하여 제안한 보정법을 적용하지 않은 상태의 위치 오차 보정량의 불확도 분석을 한다.

제안한 보정법은 기준 좌표계를 설정하여, 설정된 기준 좌표계를 이용하여 구동 시스템의 구동 좌표계와 측정 시스템의 측정 좌표계를 동정하였지만 좌표변환을 고려하지 않는 경우는 직접 구동 좌표와 측정 좌표계를 동정해야 한다.

구동 좌표계와 측정 좌표계를 동정했을 경우 정확하게 원점과 원점 사이의 거리를 맞추지 못하여 원점간의 차가 발생하는 데 이것을 위치 오차 (Position error)라 하고, 구동 좌표와 측정 좌표계간에 각 축이 회전하여 발생하는 오차를 회전 오차 (Rotation error)라 한다. 회전 오차 성분에 위치 오차 성분을 고려한 최종 변환 행렬은 식(11)과 같다.

$${}^m T = \begin{bmatrix} c\alpha c\beta & c\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\gamma & c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha c\gamma & {}^m x_{mo} - {}^c x_{co} \\ s\alpha c\beta & s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & s\alpha s\beta c\gamma - c\alpha c\gamma & {}^m y_{mo} - {}^c y_{co} \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma & {}^m z_{mo} - {}^c z_{co} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

### 3.5 두 보정법의 비교 분석

식(11)번을 이용하여 좌표변환을 고려하지 않은 보정법의 분석을 한다. Table 9 는 불확도 평가를 하기 위한 조건을 나타낸다

Fig. 7 은 제안한 기준 좌표계의 변환이 고려되지 않은 보정법의 불확도 분석을 한 결과 그래프이다. 오차 보정량의 불확도의 최소값은  $\pm 0.066 \mu\text{m}$  의 범위 이내의 값을 보이고 오차 보정량의 불확도의 최대값은  $\pm 0.1 \mu\text{m}$  의 범위 이내의 값을 나타낸다. Table 10 은 제안한 기준 좌표계의 변환이 고려된 보정법과 고려되지 않은 보정법의 불확도 분석을 비교한 결과표이다. 결과에서 볼 수 있듯이 기준 좌표계의 변환이 고려된 보정법의 불확도 값이 고려되지 않은 값보다 작음을 알 수 있다. 그러므로 제안한 보정법의 효용성을 확인할 수 있다.

Table 9 Condition of uncertainty analysis

Condition	
Work space range	$175 \times 175 \times 50 \mu\text{m}$
Sensor resolution	$\pm 0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}$
Coordinate positional error	$\pm 0.2 \mu\text{m}$
Coordinate rotational error	$\pm 0.06548^\circ$

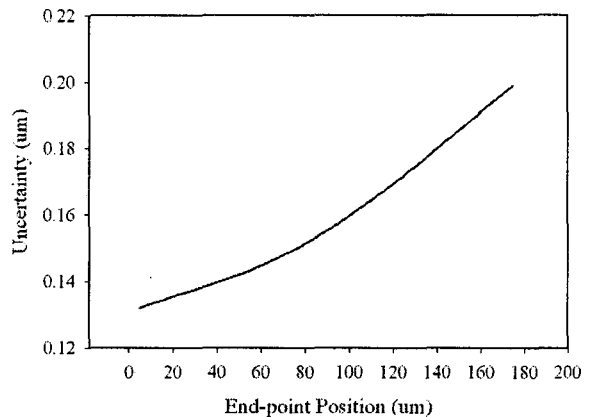


Fig. 7 Effect of end-point position

## 4. 결론

3 자유도 위치 결정 기구의 위치 오차 평가 및 보정법을 제안하고 불확도 분석을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 민감도 해석에 의한 불확도 산출법과 몬테카를로 시뮬레이션법에 의한 불확도 산출법을 비교하여 불확도 산출 시뮬레이션을 검증하였다.
- (3) 보정량 산출을 위한 기준 좌표계 설정시, 보정량에 개입하는 불확도의 영향이 최소가 되는 조건을 분석하였다.
- (4) 제안된 보정법으로부터의 오차 보정량의 불확도가 측정 시스템의 분해능보다 작음을 확인하여 보정법의 적용이 가능함을 확인하였다.
- (5) 기준 좌표계 설정을 하지 않은 보정량의 불확도를 평가하여 비교한 결과로부터, 제안한 보정법의 효용성을 확인하였다.

Table 10 Comparison between Compensation algorithm including ref. coordinate and Compensation algorithm without ref. coordinate

End-Point Position (μm)	Compensation algorithm including ref. coordinate (μm)	Compensation algorithm without ref. coordinate (μm)
10×10×3	$0.2774 \times 10^{-3}$	0.1343
25×25×7	$0.2690 \times 10^{-3}$	0.1370
50×50×14	$0.2633 \times 10^{-3}$	0.1409
75×75×21	$0.2683 \times 10^{-3}$	0.1473
100×100×28	$0.2834 \times 10^{-3}$	0.1585
125×125×35	$0.3071 \times 10^{-3}$	0.1707
150×150×42	$0.3377 \times 10^{-3}$	0.1845
175×175×50	$0.3737 \times 10^{-3}$	0.2017

참고문헌

1. Zhuang, H., "Self-Calibration of Parallel Mechanisms with a Case Study on Stewart Platforms," IEEE Trans.

Robot. Automat., Vol. 13, No. 3 pp. 387-397, 1997.

2. Zhuang, H. and Liu, L., "Self-Calibration of Parallel manipulators," IEEE Trans. Int. Conf. Robot. Automat., pp. 994-999, 1996.

3. Nakamura, O. and Goto, M., "Laser interferometric calibration of microscan mechanisms by using three laser beams," Precision Engineering, Vol. 15, No. 1, pp. 39-43, 1993.

4. Koseki, Y., Arai, T., Sugimoto, K., Takatiji, T. and Goto, M., "Design and accuracy evaluation of high-speed and high precision parallel mechanism," Proc. Of the 1998 IEEE Int. Conf. on Robot. Automat., Vol 2, pp. 1340-1345, 1998.

5. Spiess, V. M. and Avromlou, M., "On the calibration of a 6-D laser tracking system for dynamic robot measurements," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 47, No. 1, pp 270-274, 1998.

6. Renaud, P., Andreff, N., Dhome, M. and Martinet, P., "Experimental evaluation of a vision-based measuring device for parallel machine-tool calibration," Proc. Of the 2002 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intell.Robot. Syst., Vol. 2, pp. 1868-1873, 2002.

7. Masory, O. and Jiahua, Y., "Measurement of pose repeatability of Stewart platform," J. of Robot. Syst., Vol. 12, No. 12, pp. 821-832, 1995.

8. Zhuang, H., Yan, J. and Masory, O., "Calibration of Stewart platforms and other parallel manipulators by minimizing inverse kinematic residuals," Journal of Robotic Systems, Vol. 15, No. 7, pp. 395-405, 1998.

9. Desnard, S. and Kahlil, W., "Calibration of parallel robots using two inclinometers," Proc. Of the 1999 IEEE Int. Conf. on Robot. Automat., Vol. 2, pp. 1758-1763, 1999.

10. Kwon, K. H., Park, J. J., Lee, I. G., Cho, N. G. and Yang, H. I., "Precision evaluation method for the positioning error of three-DOF parallel mechanism using coordinate measuring machine (CMM)," J. of KSPE, Vol. 21, No. 11, pp. 99-109, 2004.

11. KRISS, "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement(KRISS-98-096-SP)," pp. 1-31, 1998.