

◆ 특집 ◆ 직선·회전모터 구동 이송·회전체 연구 V

고정밀 이송기구의 위치결정정밀도에 대한 측정불확도 요소 분석

Measurement Uncertainty Analysis of Positioning Accuracy for High Precision Feed Mechanism

이정훈¹, 윤상환¹, 박민원^{2,✉}

Jung Hoon Lee¹, Sang Hwan Yoon¹ and Min Won Park^{2,✉}

¹ 창원대학교 산학협력단 클러스터사업단 (K-MEM R&D Cluster, Changwon National Univ.)

² 창원대학교 전기공학과 (Department of Electrical Engineering, Changwon National Univ.)

✉ Corresponding author: cluster8@changwon.ac.kr, Tel:055-213-2894

Manuscript received: 2012.3.14 / Accepted: 2012.3.22

Reliable results can't be derived without the notion of measurement uncertainty. The reason is that the measured value includes a lot of uncertain factors. Finding the factor that affect the measurement of parameter is important for estimation of measurement uncertainty. In this paper, the evaluation of uncertainty analysis about positioning accuracy measurements of high precision feed mechanism is presented to evaluate the important factors of uncertainty.

Key Words: Positioning Accuracy (위치 결정 정밀도), Repeatability (반복정밀도), Measurement Uncertainty (측정불확도), Positioning Error (위치결정오차), Measuring Error (측정오차)

기호설명

P_i = Target position

P_{ij} = Reality position

X_{ij} = deviation of position

S_j = Standard uncertainty estimates (positioning)

U = Uncertainty

k = Coverage factor

R = Repeatability of positioning accuracy

A = Positioning accuracy

↑, ↓ = direction

$U(E)$ = Uncertainty of system deviation

1. 서론

측정의 목적은 측정량의 값, 즉 측정하고자 하는 특정한 양의 값을 결정하는 것이다. 따라서 측정을 하기 위해서는 측정량, 측정방법, 측정절차들을 적절히 정의하고 명시하여야 한다. 일반적으로 측정결과는 측정량의 값에 대한 근사값 또는 추정값일 뿐이므로, 그 값에 대한 불확도가 함께 명시될 때에 비로서 완전해진다.

불확도(uncertainty)란 측정결과에 관련하여 측정량을 합리적으로 추정한 값들의 분산특성을 나타내는 매개변수(parameter)이다.¹

측정불확도(measurement uncertainty)는 측정되어진 물리량으로부터 합리적으로 기인하는 범위의 값으로 정의되어진다. 특정한 방법으로 평가와 보고 되어진 불확도는 측정대상의 기대 값이 특정

신뢰수준에서 실제적으로 놓여질 구간을 추정하게 된다. 이를 역으로 해석하면 측정된 대표 값이 틀려질 수도 있는 범위를 나타내게 된다. 따라서 불확실한 부분을 명확히 밝힐 순 없으나 불확실한 정도의 크기를 적절한 기법을 사용하여 추정할 수 있다.²

현재 세계 각국에서는 1993 년 국제표준화기구 (ISO)에서 발행한 측정불확도 표현 지침(GUM: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)을 많은 나라들이 측정 및 교정에 있어 기준으로 받아들이고 있으며, 현재로서는 불확도에 대한 평가와 표현에 있어 가장 적합한 접근방법으로 따르고 있는 실정이다.¹

이와 관련하여 본 논문에서는 창원대학교 산학협력단에서 시행하고 있는 KOLAS 시험인정 항목 중 KS B ISO 230-2: 2007 ‘공작기계-수치제어에 의한 위치결정 정밀도 시험방법’에 대한 불확도 요인을 분석하고, 측정결과값에 큰 영향을 미치는 요인이 무엇인지 파악하고 이를 추정해보고자 한다.

2. 위치결정정밀도 측정불확도 이론

2.1 측정불확도 개요

위치결정정밀도의 기본 모델식 X_{ij} (위치의 편차)는 식(1)과 같다.

$$X_{ij} = P_{ij} - P_i \quad (1)$$

측정불확도를 추정하는 알고리즘은 Fig. 1의 절차를 따른다.³ 측정자의 반복된 실험을 통하여 측정 값의 평균을 이용하여 구한 표준편차를 Type A 표준불확도라 하고 미리 계획된 실험자료(QA/QC 자료), 관계된 물질과 기기의 성질, 특성에 대한 상식과 경험, 시험측정기의 규격, 교정, 보고 자료와 같은 다른 정보에 근거하여 가정한 확률분포로부터 구한 표준편차 값을 Type B 표준불확도라 한다.

Type A 와 Type B 의 표준불확도를 합성한 값을 합성표준불확도라고 정의하며, 합성표준불확도에 포함인자 k 를 곱하여 측정량의 합리적인 추정 값이 이루는 분포의 대부분을 포함할 것으로 기대되는 측정결과 주위의 구간을 확장불확도라고 정의한다.

측정결과값과 확장불확도 값을 명시함으로 측정불확도를 표기할 수 있게 된다.

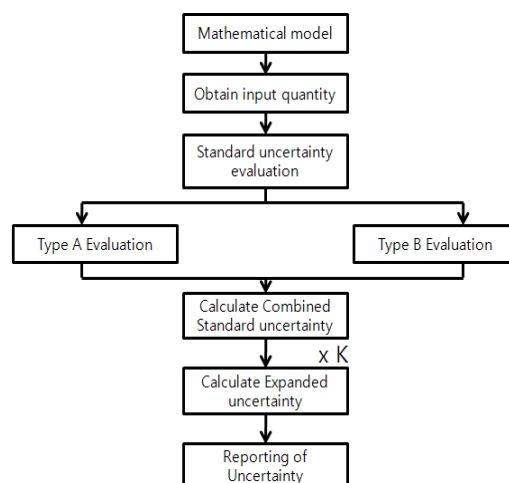


Fig. 1 Procedure of uncertainty estimation

2.1.1 위치결정정밀도 측정의 적용범위

위치결정정밀도 측정은 기계 상에서 각 운동축에 대하여 실시한다. 하지만 여러 개의 운동축을 동시에 제어하는 시험에서는 KS B ISO 230-2:2007 규격에서는 적용하지 않으며 시험하는 측정물(기계)은 조립이 완료된 것으로 완전히 운전할 수 있는 상태이어야 한다.⁴

2.1.2 위치결정정밀도 측정에서의 불확도 요소

위치결정정밀도 측정에 있어 시험규격인 KS B ISO 230-2: 2007 ‘공작기계-수치제어에 의한 위치결정 정밀도 시험방법’ 규격에 의거 불확도 U 의 최소요건은 아래와 같다.⁴

- 측정기 자체에 의한 불확도 파라미터
- 기계 온도 보상에 의한 불확도
- 외부 기온변화에 의한 불확도
- 관련이 있다면 잘못된 측정기 정렬에 의한 불확도

2.1.3 Type A 표준불확도

Type A 표준불확도는 반복 측정결과를 통계적으로 처리하는 기법이다. 위치결정정밀도 시험에서는 각 포인트 마다 지정된 위치를 기점으로 양방향(왕복)으로 5 회 반복 측정하며, 각 포인트 지점마다의 거리오차 값을 기준으로 각 위치에서의 평균 위치결정 편차(X_{ij})를 구하여 반복정밀도와 정확도의 값을 구한다. Type A 표준불확도 값은 식(2)와 식(3)과 같다.

$$R = \max[R_i] \tag{2}$$

$$A = \max[A\uparrow] - \max[A\downarrow] \tag{3}$$

2.1.4 Type B 표준불확도

Type B 표준불확도의 평가는 대부분의 기대 값이 일정구간 이내에서 같은 확률로 존재한다는 균등분포에 근거하여 기대 값을 추정한다. KS B ISO 230-7 의 규격을 참고하여 Type B 표준불확도의 요소를 추정하게 되면 크게 4 가지 요소로 추정할 수 있다. (1)측정기에 의한 불확도, (2)측정기와 기계 축과의 정렬로 인한 불확도, (3)기계온도 보상에 따른 불확도(온도측정, 팽창계수), (4)환경변화 에러에 의한 불확도의 평가로 추정할 수 있다.

Type B 의 표준불확도 요소는 Table 1 과 같다.

Table 1 Standard uncertainty element of Type B

Type B	Uncertainty	A mathematical formula
U_{b1}	U_{device}	$= 0.6 \times R_{device} \times L$
U_{b2}	$U_{misalignment}$	$= 0.3 \times (R_{misalignment} / L)$
U_{b3}	$U_{m.machine\ tool}$	$= 0.6 \times \alpha \times L \times R(\theta)$
U_{b4}	$U_{e.machine\ tool}$	$= 0.6 \times \Delta T \times L \times R(a)$
U_{b5}	U_{eve}	$= 0.6 \times Eve$

Type B 표준불확도에 대한 설명은 다음과 같다.

(1) 측정기에 의한 불확도

U_{device} : 측정기에 의한 불확도(μm)

R_{device} : 제조회사 측정기에 대한 불확도가 포함 계수 $k=2$ 인 경우,

*측정에 사용된 측정기 사양(0.7ppm)

L : 측정 길이(m)

(2) 측정기와 기계 축과의 정렬로 인한 불확도

$U_{misalignment}$: 잘못된 정렬에 의한 불확도(μm)

$R_{misalignment}$: 잘못된 정렬(mm)

*측정에서 최소한의 정렬(0.5mm)

(3) 기계온도 보상에 따른 불확도

$U_{m.machine\ tool}$: 기계온도 측정에 의한 불확도(μm)

α : 기계축의 팽창계수 ($\mu m/m \cdot ^\circ C$)

*철의 열팽창계수 값(11.7 $\mu m/m \cdot ^\circ C$)

$R(\theta)$: 측정불확도에 의한 온도 범위나 측정 장

비와 시편을 잡고있는 장비간의 온도차 ($^\circ C$)

*규격에서 제시하는 최소 온도차(0.1 $^\circ C$)

$U_{e.machine\ tool}$: 기계나 공작물의 팽창계수 때문에 발생할 수 있는 불확도(μm)

T : 기계나 공작물의 온도($^\circ C$)

$R(a)$: 기계의 팽창계수 에러범위($\mu m/m \cdot ^\circ C$)

*철의 열팽창 계수 값(11.7 $\mu m/m \cdot ^\circ C$)

(4) 환경 변화 에러에 의한 불확도

U_{eve} : 환경변화로 인해 발생하는 불확도(μm)

Eve : Drift 테스트의 범위(μm)

*관독기의 범위 (1.70 μm)

2.1.5 확장불확도 요소분석

확장 불확도를 구하기 위해서는 Type A 표준불확도와 Type B 표준불확도를 합성한 합성표준 불확도를 구해야 하지만, 위치결정정밀도의 시험특성상 KS B ISO-230-2:2007 에서는 각 파라미터(평가항목)에는 측정불확도 U 와 포함계수 2 를 적용하는 것이 좋다 라고 명시되어 있다.⁴ 이에 각 파라미터들을 포함한 위치 결정정밀도의 확장불확도 U(A)와 반복정밀도의 확장불확도 U(R)의 식은 아래와 같다.

$$U(A) = \sqrt{U(E)^2 + U(R\uparrow)^2} \tag{4}$$

$$U(R) = 2.2 \times U_{eve} \tag{5}$$

여기서 U(E)는 Type B 표준불확도들의 모든요인들을 고려하였기 때문에 시스템 편차에 따른 불확도라고도 표현하며 계산식은 식(6)과 같다.

$$U(E) = \sqrt{U_{b1}^2 + U_{b2}^2 + U_{b3}^2 + U_{b4}^2 + \frac{1}{5}U_{b5}^2} \tag{6}$$

식(7)은 한쪽방향 반복정밀도의 불확도 평가의 계산식이다.

$$U(R\uparrow) = 2.0 \times U_{eve} \tag{7}$$

최종 측정불확도의 표현은 양쪽방향의 정확도 또는 반복정밀도(R) 의 측정값과 함께 확장불확도 U(A), U(R)의 값을 명시함으로써 최종 표기된다.

3. 시험 및 결과

3.1 사용장비 및 성능

본 시험에 사용되는 장비는 RENISHAW 사의 레이저측정기로서 장비의 사양은 Table 2 와 같다.

Table 2 Equipment Specifications

Maker	RENISHAW (ML-10)
System Accuracy	0.7 ppm
Laser frequency accuracy	0.05 ppm
Max. velocity	1.0 m/sec
Resolution	0.001 μm
Range	0 ~ 40 m

3.2 위치결정정밀도 시험측정

위치결정정밀도 측정에 있어 환경조건으로는 기계가 발휘할 수 있는 온도 환경에 관한 지침을 제조사가 제공해야 한다. 이상적으로 모든 치수 측정은 측정기 및 측정대상물이 20 °C의 온도환경에 놓여진 상태에서 실시를 하는 것이 바람직하다.⁴ 20 °C 외의 온도에서 측정할 경우에는 환경으로 보정한 결과를 얻기 위해 축 위치 결정계 및 측정기의 열팽창 차(NDE)를 보정해야 하기 때문이다.⁴

Fig. 2 는 위치결정정밀도를 실험하는 사진이다. 측정물은 철의 재질로 제작된 3 축 이송기계로 환경온도 22±0.5 °C, 습도 46±0.2 %의 환경에서 실시하였다. 열팽창계수는 철의 열팽창계수인 11.7 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ 로 설정하였으며, 측정물의 온도는 22 °C이다. 측정길이 L = 0~ 560 mm 구간, 80 mm 간격으로 8 구간을 측정지점으로 잡았으며, Y 축 양방향으로 5 회 반복측정을 실시, 구간별 측정지점 및 반복 측정 방법은 Fig. 3 과 같다.



Fig. 2 Photo of positioning accuracy measurement system

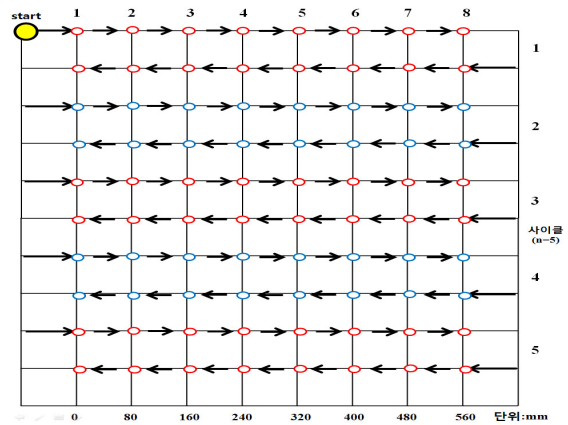


Fig. 3 Measurement point of positioning accuracy measurement

3.3 측정결과

본 논문에서는 위치결정정밀도에 대한 정확도만을 나타내고자 한다. 식(5)에서와 같이 반복정밀도에 따른 확장불확도 값의 경우에는 변수가 Drift의 테스트 범위에 따른 불확도요인 하나이다. 이 부분은 시험 측정간 한번 입력을 하게 되면 크게 달라지지 않는 항목이므로 본 논문에서는 위치결정정밀도 정확도에 대한 불확도 요인에 대하여서만 분석하고자 한다.

5 회 반복측정을 통한 위치결정정밀도의 정확도 값은 Table 3 과 같다. 위치결정정밀도에 대한 정확도 값은 측정기에서 바로 계산이 되는 부분이다.

Table 3 Measured data of positioning accuracy

No.	One way Direction(↑)	One way Direction (↓)	Both ways Direction(↑↓)
A	14.17 μm	12.31 μm	15.19 μm

측정에 따른 위치결정 정확도에 영향을 주는 Type B 표준불확도 값들을 추정하면 Table 4 와 같다.

Table 4 Standard uncertainty values of Type B

	Measurement Uncertainty	Value (μm)
U_{b1}	U_{device}	0.24
U_{b2}	$U_{\text{misalignment}}$	0.27
U_{b3}	$U_{\text{m.machine tool}}$	0.39
U_{b4}	$U_{\text{e.machine tool}}$	7.86
U_{b5}	U_{eve}	1.02

확장불확도 $U(A)$ 값을 추정하게 되면,

$$U(A) = \sqrt{U(E)^2 + U(R \uparrow)^2} = 8.15 \mu\text{m} \text{ 이다.}$$

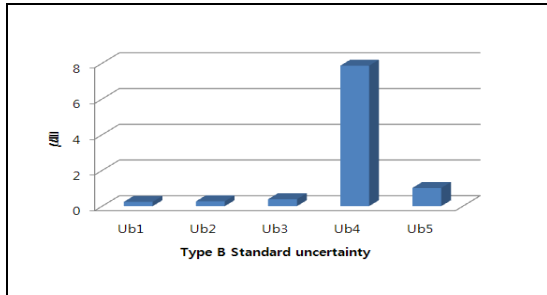


Fig. 4 Graph to compare the size of Type B standard uncertainty

Fig. 4 에서 보는 바와 같이, 기계온도 보상에 따른 불확도 중 팽창계수에 의한 표준불확도요인의 값(U_{b4})이 다른 Type B 표준불확도 값들과 비교해 큰 값을 확인할 수 있었다.

위의 결과를 바탕으로 동일한 시험환경에서 측정물의 가열로 인하여 온도가 1 °C 증가하였을 때, 이에 따른 Type B 표준불확도 값들을 추정하면 Table 5 와 같다.

Table 5 Type B standard uncertainty according to 1 °C temperature rise

	Measurement Uncertainty	Value (μm)
U_{b1}	U_{device}	0.24
U_{b2}	$U_{\text{misalignment}}$	0.27
U_{b3}	$U_{\text{m.machine tool}}$	0.39
U_{b4}	$U_{\text{e.machine tool}}$	11.79
U_{b5}	U_{eve}	1.02

확장불확도 $U_{+1\text{ }^\circ\text{C}}(A)$ 값을 추정하게 되면,

$$U_{+1\text{ }^\circ\text{C}}(A) = \sqrt{U(E)^2 + U(R \uparrow)^2} = 11.99 \mu\text{m} \text{ 이다.}$$

측정물의 온도가 1 °C 상승하게 되면 Table 5 에서와 같이 다른 Type B 표준불확도 값에는 영향을 끼치지 않지만 팽창계수에 의한 불확도 값의 추정에 있어 그 값이 증가했으며, 이는 위치결정정밀도 정확도에 대한 확장불확도 값이 다른 요소의 Type B 표준불확도 추정의 값들은 무시할 수 있을 정도로 확장불확도 $U(A)$ 값에 있어 큰 비중을 차지하는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서 측정물의 온도가 22 °C 일 때 위치결정정밀도에 대한 정확도의 측정불확도 표현은, 양쪽방향 정확도(A) = 15.19 μm ± 8.15 μm 이다.

이에 위치결정정밀도 측정의 정확도에 대한 확장불확도를 추정하였을 때 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 위치결정정밀도 측정에 있어 영향을 주는 항목은 크게 4 가지 이며, 이는 측정기에 의한 불확도, 측정기와 기계 축과의 정렬로 인한 불확도, 기계온도 보상에 따른 불확도(온도측정, 팽창계수), 환경변화 에러에 의한 불확도의 평가로 추정할 수 있었다.

(2) 위치결정정밀도 측정에서 정확도에 대하여 가장 큰 영향을 미치는 불확도는 기계온도측정에 의한 불확도(U_{b4}) 요인이며 이는 전체 확장불확도의 80%를 차지하였다.

(3) 측정물의 온도가 1 °C 상승하게 되었을 때 정확도에 대한 확장불확도 $U(A)$ 값은 3.84 μm 증가하였으며, 이는 위치결정정밀도의 불확도 추정에 있어서 U_{b4} 값에 따라 확장불확도 $U(A)$ 의 값이 크게 변화하는 것을 확인할 수 있었다.

(4) 측정물의 온도가 시험도중 가열이 되어 온도가 증가하게 되면, 더 큰 확장불확도 값이 추정될 수 있으므로 고정밀 이송기구의 위치결정정밀도 측정시에는 시험규격에서 제시하고 있는 측정 환경 20 °C 에서 하는 것이 가장 좋다.

후 기

본 연구는 지식경제부 지방기술혁신사업(RTI04-01-03) 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. KOLAS-G-002:2007, "Estimation of uncertainty of measurement results and guidelines for the representation," Korea Laboratory Accreditation Scheme, 2007.
2. Choi, J. H., "Measurement uncertainty evaluation," Hanrimwon, pp. 1-19, 2006.
3. Kb-C-C 58(4), "Comparison Test Introduction to Measurement Uncertainty," Korea Conformity Laboratories (KCL), 2007.

4. KS B ISO 230-2:2007, “Test code for machine tools - part2 : Determination of accuracy and repeatability of positioning numerically controlled axes,” 2007.