

3 차원 좌표 측정기 성능 시험법에 대한 측정 불확도 해석

Measurement Uncertainty Analysis of Performance Test for Coordinate Measuring Machine

이승표^{1,✉}, 강형주², 하성규³
Seung Pyo Lee^{1,✉}, Hyung Joo Kang² and Sung Kyu Ha³

1 한양대학교 기계설계학과 대학원 (Department of Mechanical Design and Production Engineering, Hanyang Univ.)

2 주식회사 아이엠에스 (International Metrology Systems)

3 한양대학교 기계정보경영공학부 (Division of Mechanical and Information Management Engineering, Hanyang Univ.)

✉ Corresponding author: chrisl@hanyang.ac.kr, Tel: 031-400-4066

Manuscript received: 2008.7.2 / Revised: 2008.12.24 / Accepted: 2009.1.21

Because of both precise measurement and efficient quality control, coordinate measuring machines(CMMs) have been widely used in the industry. The purpose of this paper is to present a method to estimate the CMM measurement uncertainty using design of experiments. A factorial design is applied to carry out the performance test proposed by ISO 10360 and to investigate CMM measurement errors associated to orientation and length of the length bar. In order to assess the measurement uncertainty for the performance test, an analysis of the uncertainty components that make up the uncertainty budget has been carried out. The procedure for evaluating the uncertainty of it follows GUM ("Guide to the expression of uncertainty in measurement"). The results show that the proposed method is suitable to investigate CMM performance and determine the contribution of machine variables to measurement uncertainty.

Key Words: Coordinate Measuring Machine (3 차원 좌표 측정기), Measurement Uncertainty (측정 불확도), Performance Test (성능 시험법), Design of Experiment (실험계획법)

1. 서론

최근 산업이 선진화되고 고도화됨으로써 생산 제품의 품질이 기업의 기술경쟁력을 결정짓는 중요한 요인이 되고 있다. 정밀 제품을 제작하거나 보완하기 위해서는 고성능 정밀기계도 필요하지만, 그 제품이 설계자의 의도대로 정확하게 가공되었는지를 판단하는 것이 중요하다. 이를 위하여 정밀 측정기에 의한 측정 기술이 필요하게 되며, 이들의 상호 협조 없이는 정밀제품의 생산은 기대할 수 없다. 이러한 측정 품질에 대한 판정 시 측정 불확도(measurement uncertainty)는 중요한 판단 요

인으로써 정밀제품일수록 반드시 표시되어야 한다. 또한, 세계적으로 무역이 확대되고 경제의 세계화가 진전됨에 따라, 서로 다른 국가에서 이루어지는 측정 결과를 쉽게 비교할 수 있도록 불확도를 평가하고 표현하는 방법을 통일할 필요가 있다. 이러한 이유들로 인하여 국제표준협회(ISO)에서 "측정 불확도 표현 지침(Guide to the expression of Uncertainty in Measurement, GUM)"¹⁾을 발간하여 표준으로 삼고 있다. ISO 는 모든 규격에서 이 지침서의 적용을 의무화하고 있고, ISO 의 국제 규격을 받아들이고 있는 우리나라에서도 이것의 적용을 의무화하고 있는 실정이다. 특히, 한국시험·검사기

관 인정기구(Korea Laboratory Accreditation Scheme, KOLAS)에서는 교정, 시험, 검사 분야에서 측정 불확도 계산을 의무화하고 있다.²

3 차원 좌표 측정기(Coordinate Measuring Machine, CMM)는 물체의 표면 위치를 검출하는 기능을 가진 센서(프로브, probe)가 3 차원 공간을 이동하면서 측정점의 좌표를 검출하고 컴퓨터를 통해 그 데이터를 처리함으로써 크기나 위치, 방향 등을 측정하는 정밀 측정기이다. 이러한 CMM의 성능 및 품질향상에 대한 요구가 증가함에 따라서 측정 생산성 향상의 필요성이 대두되고 있다. 또한, 제품의 복잡화와 CNC 공작기계의 발달로 인하여 종래의 고전적인 측정방식으로는 더 이상 효과적인 품질 관리가 곤란하다는 이유 등으로 인하여 그 사용이 급속히 확산되고 있다.

CMM은 구조의 복잡성, 측정물 오차, 샘플링 기법, 측정 알고리즘과 기타 외부의 요인 등으로 인하여 측정에 영향을 미치는 수많은 측정 불확도 원인들이 존재한다. 이러한 불확도를 평가하는 방법들은 감도 계수(sensitivity coefficient)를 이용한 해석적 방법과 전문가의 판단에 의존하는 방법, 보정된 길이 표준기(artifact)를 이용한 성능 시험법, 컴퓨터를 이용한 모사법, 측정 이력으로부터의 통계적 추정법, 혼합법 등이 있다.³ 그러나, 이러한 방법들은 구동 변수들에 대한 제어가 원활하지 못하고 그 영향에 대한 정량적인 결과를 얻기가 쉽지 않은 단점이 있다. 따라서, CMM 불확도 평가에 측정 오차에 대한 변수들의 영향을 고찰하고, 제어되는 변수 값의 영향을 파악할 수 있는 통계적인 방법의 도입이 필요하다.

Phillips 등⁴은 작은 원형 형상에 대하여 해석적인 방법을 이용하여 측정 불확도를 평가하였다. Piratelli-Filho 등⁵은 볼 바 게이지를 적용한 CMM 불확도를 연구하였고, Feng 등⁶은 불확도에 대한 영향을 역 공학(reverse engineering)에 기초하여 포괄적으로 접근하였다. 그리고, Lee 등⁷은 에어컨용 압축기 실린더에 대하여 ISO-GUM에 근거한 확장 불확도를 계산하였다. 이와 같이 측정 불확도에 관한 연구들이 있었으나, ISO-GUM에 기반을 둔 통계적인 방법에 대한 연구는 거의 없으며 국내 연구는 전무한 실정이다.

본 연구에서는 실험계획법이라는 통계적인 방법을 사용하여 ISO-GUM에 기반한 CMM의 측정 불확도를 평가하는 방법을 제시하였다. 측정 불확도를 결정하는 방법 중에서 보정된 길이 표준기를

이용한 성능 시험법에 대하여 고찰하였다. 측정 오차의 통계적인 분석을 위하여 분산분석(Analysis of Variance, ANOVA)이 사용되었고, 이로부터 측정 성능에 영향을 주는 요인을 분석하였다. 실험계획법의 결과로부터 CMM의 측정 불확도를 계산하였고, 측정오차의 분포 구간을 예측하였다.

2. CMM 측정 불확도

2.1 불확도 원인

CMM의 불확도는 측정을 수행할 측정물, 주변 환경, 작업자의 숙련도, 그리고 측정 장치 등 많은 원인이 있기 때문에 현실적으로 CMM의 전체 불확도를 평가하는 것은 매우 어렵다. 따라서, CMM 전체 불확도를 몇 가지 부류로 나누고 각각의 불확도를 평가하는 것이 바람직하다. 일반적으로 CMM의 불확도는 크게 하드웨어, 측정물, 샘플링 기법, 측정 알고리즘 그리고 외부 요인들에 의한 불확도로 나눌 수 있다.³

이 중에서 하드웨어에 의한 불확도 원인은 측정 환경 및 시간에 따라 오차값이 변화되는 임의 오차(random error)와 환경 및 시간의 영향을 받지 않는 계통오차(systematic error)로 나눌 수 있다. 계통오차는 직교좌표축이 이동하면서 발생하는 오차와 프로브의 기능상 오차 및 백래쉬 오차 등이 포함된다. 이 중에서 축 이동에 의한 오차는 구조적 오차라고 하며 주로 CMM의 설계 구조상 발생하는 요인과 좌표축의 스케일 오차 등을 포함하여 21개의 계통 성분 오차로 분류할 수 있다.

2.2 불확도 평가 방법

2.2.1 감도 계수를 이용하는 해석적 방법

측정량이 측정 변수들에 대한 수학적 함수로 표현되는 경우는 ISO-GUM에 언급된 감도 계수를 이용한 방법에 의하여 CMM 불확도를 평가할 수 있다.

ISO-GUM에 의하면 각각의 불확도 원인들은 통계적인 방법으로 평가하는 방법(A형 평가)과 그 이외의 수단을 이용하는 방법(B형 평가)으로 구별하여 표준 불확도(standard uncertainty)로서 명시되어야 한다. 이때 정량화된 불확도 값들은 상관 관계의 여부에 따라서 감도 계수를 이용하여 합성 표준 불확도(combined standard uncertainty)를 계산한다. 그 다음 포함 인자(coverage factor)를 적용하여 총체적인 확장 불확도(expanded uncertainty)를 구한

다.¹ 이 확장 불확도를 이용하여 실제 CMM 측정 오차 값이 포함될 수 있는 구간을 나타낼 수 있다. 이 방법은 잘 정의된 수학적 모델이 있는 경우에 유용하게 적용될 수 있다.

2.2.2 보정된 길이 표준기를 이용한 성능 시험법

CMM 성능 시험법은 지정된 길이 표준기를 이용하여 측정 오차를 평가하는 기준을 정의하고, 이와 같이 정의된 기준을 이용하여 불확도를 평가하는 방법을 의미한다. 이와 같은 성능 시험법은 규격으로 정의되는 경우가 많으며 ISO 10360⁸ 은 국제표준협회(ISO)에서 제정한 규격이다. ISO 10360 규격은 사용자가 지정한 7 군데의 시험위치와 방향에 대하여 각 위치에서 5 개의 각각 다른 길이 표준기를 3 회씩 측정하도록 규정한다. 모든 측정 값이 주어진 조건을 초과하지 않으면 합격으로 판정한다. 이 규격은 사용자 위주로 규정되어 있고, 포괄적으로 규정되어 있다. 또한, 범위를 명확히 구분하고 현실성을 감안하여 규정되어 있다는 장점이 있기에 많이 사용되고 있다. 일반적으로 길이 표준기로는 길이 바(length bar) 또는 볼 바(ball bar) 등이 사용된다. 성능 시험 결과 얻어지는 측정 불확도는 [A, L/B] (L m)의 형태로 표시된다.

2.2.3 컴퓨터를 이용한 모사법

CMM의 불확도를 평가하기 위한 컴퓨터 모사법은 측정오차에 대하여 수학적으로 측정 모델을 구성하고 이를 컴퓨터를 이용하여 수치적으로 모사를 수행하는 방법을 말한다. 이러한 방법들로는 Virtual CMM, Expert CMM, 몬테카를로 모사법(Monte Carlo simulation) 등이 있다.³

이 중에서 몬테카를로 모사법은 구하고자 하는 수치의 확률적 분포를 반복 가능한 실험의 통계로부터 구하는 방법이다. 이 방법은 측정 시 입출력 값의 개수가 많은 경우, 모델식이 복잡하거나 비선형인 경우, 측정 불확도가 너무 커서 선형 가정이 어려운 경우에 적합한 것으로 알려져 있다.⁹

3. 실험계획법

3.1 실험계획법

기존의 불확도 평가 방법들은 잘 정의된 수학적 모델이 없거나 구체적인 CMM 변수에 대한 영향을 파악하고자 하는 경우에 적용이 어려운 단점

이 있다. 즉, 프로브의 영향에 의한 오차나 스케일에 의한 오차, 축에 의한 위치 오차, 피치(pitch) 오차, 요(yaw) 오차, 롤(roll) 오차 등을 평가하기 위한 제어가 용이치 않으며 그에 따른 정량적 평가가 쉽지 않다. 그러므로, CMM 불확도 평가에 CMM 변수들의 영향을 고찰하고 분석할 수 있는 통계적인 방법의 도입이 요구된다.

실험계획법은 실험을 계획하고 수행하고 결과를 분석하는 일체의 방법을 의미한다.^{10,11} 실험계획법을 CMM 불확도 평가에 적용하면 CMM 변수들을 적절히 제어할 수 있고, 그에 대한 영향을 정량적으로 파악할 수 있다. 또한, 분산 분석 등의 통계적 기법을 이용하여 측정 성능에 영향을 주는 CMM 변수들을 분석할 수 있다.

3.2 실험 방법 및 조건

본 연구에서는 실험계획법을 이용하여 CMM 측정 불확도를 평가하였다. 측정 불확도를 평가하기 위하여 보정된 길이 표준기를 이용한 성능 시험법을 적용하였고, 규격으로 ISO 10360을 선택하였다. 그리고, 길이 표준기로서 길이 바를 사용하였다.

실험계획법에서 실험을 단순화하고 전체 실험 회수를 최소화하기 위하여 몇몇 인자들은 고정 값으로 간주한다. 본 연구에서는 전체 실험에 대하여 동일한 프로브를 사용하였고, CMM의 이동속도를 일정하게 유지하였다. 또한, 동일한 측정을 위하여 측정 프로그램을 작성하여 사용하였고, 이로 인하여 길이 바를 동일한 방향과 동일한 위치에서 측정할 수 있었다. 길이 바를 측정하는 위치는 작업 공간의 중앙에 위치시키며, 길이 바는 작업 공간 중앙에 지지대를 사용하여 CMM 테이블 위에 단단히 고정시켰다. 측정은 온도의 영향을 최소화하기 위하여 20°C ± 1°C의 항온실에서 수행하였고, 따라서 온도의 영향은 없는 것으로 간주하였다.

3 차원 좌표 측정기의 측정 오차에 영향을 주는 인자와 수준을 검토하기 위하여 요인 배치법이 선택되었다. 요인 배치법은 실험 변수들을 인자와 수준으로 나누고 이들의 모든 가능한 조합에 대하여 실험을 수행하고 그 결과를 분산 분석 기법에 의하여 분석하는 실험계획법의 한 종류이다.^{12,13}

Table 1에서 알 수 있듯이 길이 바의 방향(orientation, A)으로 두 개의 수준을 갖고, 길이 바의 길이(length, B)로는 세 개의 수준을 갖는 요인 배치법을 적용하였다. 여기서, A와 B는 각각 길이

바의 방향과 길이를 의미하며, 숫자 1, 2, 3 은 인자의 수준을 나타낸다. 또한, AB 는 A 와 B 의 수준을 동시에 변경하는 경우에 발생하는 교호작용을 의미한다. 길이 바의 방향을 위해서 선택된 수준은 작업 공간에서 직선 방향 형상 오차의 영향을 측정하기 위한 X 축 방향(수준 1)과, 부피 방향의 영향을 파악하기 위한 XYZ 대각선 방향(수준 2)이다. Fig. 1 은 CMM 의 작업 공간에 대한 이들 방향을 표시하였다. Fig. 1 에서 알 수 있듯이 XYZ 대각선 방향은 X 축으로 45°, Y 축으로 45°, Z 축으로 45° 경사를 나타낸다. 길이 바의 길이 인자의 수준은 좌표 측정기 축의 길이에 대하여 충분히 길게 선정되어야 하며, 짧은 길이(수준 1), 중간 길이(수준 2), 그리고 긴 길이(수준 3)로 선정되었다.

실험 순서는 임의의 순서대로 진행하여 고려하고자 하는 인자 외에 다른 원인들의 영향이 실험 결과에 편이 되는 것을 방지하였다. 각각의 실험은 3 회씩 반복되어 실험되었고, 따라서 총 18 회의 측정이 수행되었다.

실험의 특성치인 측정 오차 L 은 다음과 같은 모델을 통해서 구할 수 있다.

$$L = L_{\text{측정값}} - L_{\text{교정값}} \tag{1}$$

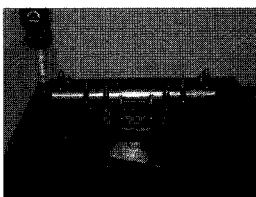
$$= \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} - L_{\text{교정값}}$$

Where,

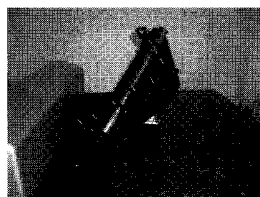
- x_1, x_2 ; 길이 바 양끝의 x 좌표값,
- y_1, y_2 ; 길이 바 양끝의 y 좌표값,
- z_1, z_2 ; 길이 바 양끝의 z 좌표값

Table 1 Factors and levels

	Factors	Levels		
		1	2	3
Orientation	A	X dir.	XYZ dir.	-
Length	B	Small	Medium	Large



(a) Level 1; X dir.



(b) Level 2; XYZ dir.

Fig. 1 Orientation(A) of length bar

요인 배치법이 적용된 선형 통계 모델은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 이 모델에서 y_{ijk} 는 종속변수로서 측정 오차 L 을 의미한다. μ 는 모평균으로써 측정 오차 실험의 평균값을 나타낸다. τ_i 는 인자 A 의 i 번째 수준에 대한 영향을, β_j 는 인자 B 의 j 번째 수준에 대한 영향을, $(\tau\beta)_{ij}$ 는 인자 A 와 B 의 교호작용에 대한 영향을 의미하며, ϵ_{ijk} 는 인자 A, B, AB 이외의 잔여오차에 대한 영향을 나타낸다. 또한, a 와 b 는 각각 인자 A, B 의 수준의 수를 나타내며, n 은 실험 반복 회수를 의미한다.

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk} \tag{2}$$

where,

$$i = 1, \dots, a, \quad j = 1, \dots, b, \quad k = 1, \dots, n$$

ϵ_{ijk} 가 평균이 0 이고 분산이 σ^2 인 정규분포를 따르며, τ_i 가 평균이 0 이고 분산이 σ_τ^2 인 정규분포를 따르고, β_j 가 평균이 0 이고 분산이 σ_β^2 인 정규분포를 따르며, τ_i 와 β_j 는 각각 잔여오차 ϵ_{ijk} 에 독립적이라고 가정하면 종속변수 y_{ijk} 의 분산 σ_y^2 은 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.¹³

$$\sigma_y^2 = \sigma_\tau^2 + \sigma_\beta^2 + \sigma_{\tau\beta}^2 + \sigma^2 \tag{3}$$

where,

- σ_y^2 ; y_{ijk} 의 분산,
- σ_τ^2 ; τ_i 의 분산,
- σ_β^2 ; β_j 의 분산,
- $\sigma_{\tau\beta}^2$; $(\tau\beta)_{ij}$ 의 분산,
- σ^2 ; ϵ_{ijk} 의 분산

식 (1)의 선형 통계 모델로부터 총 제곱합(total sum of squares, SS_T)을 구하면 식 (4)와 같다. 즉, 총 제곱합은 인자 A 에 대한 제곱합과 인자 B 에 대한 제곱합, 인자 A 와 B 의 교호작용에 대한 제곱합, 잔여오차에 대한 제곱합의 합으로 표현할 수 있다.¹²

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AB} + SS_E \tag{4}$$

분산 분석이란 특성치의 산포를 제곱합으로 나타내고 이 제곱합을 실험과 관련된 인자들의 제곱합으로 분해하여 오차에 비해 큰 영향을 주는 인

Table 2 Analysis of variance

Source of variation(SV)	Sum of squares(SS)	Degrees of freedom(DF)	Mean squares(MS)	F ₀
A	SS _A	a - 1	SS _A / DF _A	MS _A / MS _E
B	SS _B	b - 1	SS _B / DF _B	MS _B / MS _E
AB	SS _{AB}	(a - 1)(b - 1)	SS _{AB} / DF _{AB}	MS _{AB} / MS _E
Error	SS _E	ab(n - 1)	SS _E / DF _E	
Total	SS _T	abn - 1		

자가 무엇인가를 찾아내는 분석방법으로서 Table 2 와 같이 요약될 수 있다.¹⁰

분산 분석에서 F 검정은 인자 A, B 와 교호작용 AB 의 통계적 유의성을 확인하기 위하여 수행되며, 계산된 F₀ 값과 주어진 유의수준에 대한 F 분포도로부터 얻어지는 F 값을 비교함으로써 구할 수 있다. 평균제곱의 기대값은 식 (5)-(8)과 같이 인자와 교호작용, 분산의 오차 성분의 함수로 표시할 수 있다.¹³

$$E(MS_A) = \sigma^2 + br\sigma_\tau^2 \quad (5)$$

$$E(MS_B) = \sigma^2 + ar\sigma_\tau^2 \quad (6)$$

$$E(MS_{AB}) = \sigma^2 + r\sigma_{\tau\beta}^2 \quad (7)$$

$$E(MS_E) = \sigma^2 \quad (8)$$

3.3 실험 결과 및 고찰

3 차원 좌표 측정기의 측정 불확도 평가를 위하여 Table 3 에서 지시한 순서대로 실험을 수행하였다.¹⁴ 실험에 사용한 CMM 은 International Metrology Systems 사의 IMPACT 이며, 이를 Fig. 2 에 나타내었다. 실험을 위하여 길이 표준기로써 길이 바를 사용하였고, 짧은 길이의 길이 바의 길이는 175.0004mm 이고, 중간 길이는 250.0007mm 이고, 긴 길이는 375.0004mm 이며, 이들 길이 바는 모두 교정된 것을 사용하였다.

Fig. 2 에서 도시한 바와 같이 IMPACT 를 이용하여 길이 바의 길이가 측정되었고, Table 3 과 같이 측정 오차가 계산되었다. Table 3 에서 알 수 있듯이 가장 작은 측정 오차는 0.0 μm 로서 375.0004mm 길이 바를 XYZ 대각선 방향으로 측정할 때 발생

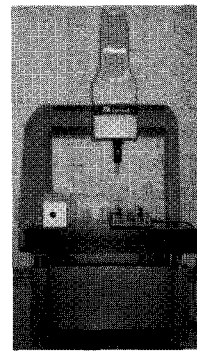


Fig. 2 IMPACT of International Metrology Systems

Table 3 Experimental runs and measured errors

Runs	A	B	Measured errors, μm
1	1	1	0.3
2		2	1.0
3		3	-0.5
4	2	1	-1.9
5		2	-1.8
6		3	-0.4
7	1	1	0.2
8		2	-0.4
9		3	-0.5
10	2	1	-1.9
11		2	0.3
12		3	0.1
13	1	1	1.8
14		2	-1.2
15		3	-1.1
16	2	1	-1.9
17		2	-2.3
18		3	0.0

하였다. 또한, 가장 큰 측정오차는 $-2.3 \mu\text{m}$ 이며 250.0007mm 의 길이 바를 XYZ 대각선 방향으로 측정 시 발생하였다. Table 3 에 나타난 측정 오차의 분포가 정규 분포인지를 확인하기 위하여 normality probability plot 을 구하였고 이를 Fig. 3 에 나타내었다.

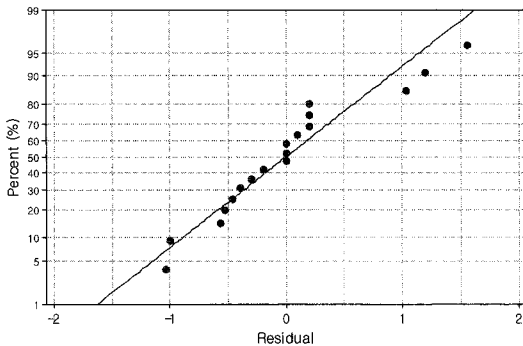


Fig. 3 Normal probability plot

Fig. 3 으로부터 알 수 있듯이 모든 데이터가 직선 주변에 분포한다. 이로부터 측정 오차가 정규 분포를 이루며, 3 회 반복 실험의 개수가 충분함을 예상할 수 있다.

실험 결과, 측정 오차의 평균은 $-0.60 \mu\text{m}$ 이고 표준편차는 $1.09 \mu\text{m}$ 이다. 측정 오차에 대한 분산 분석이 수행되었고, 계산된 자유도와 평균제곱, F_0 값을 Table 4 에 정리하였다. Table 4 로부터 알 수 있듯이 길이 바의 방향에 대한 F_0 값이 95% 유의 수준에 대한 F 값보다 크다. 따라서, 길이 바 방향이 측정 오차에 대하여 유의하다고 판단된다. 또한, 길이 바의 교호작용에 대한 F_0 값이 95% 유의 수준에 대한 F 값보다 크므로 길이 바의 교호작용도 유의하다고 판단된다.

인자 A 와 B 의 주 효과와 이들의 교호작용의 효과를 분석하여 Fig. 4 와 Fig. 5 에 나타내었다. Fig. 4 에서 알 수 있듯이 길이 바를 X 축 방향으로 놓을 경우 측정 오차가 $-0.05 \mu\text{m}$ 로 작고, XYZ 대각선 방향으로 놓을 경우 측정 오차가 $-1.09 \mu\text{m}$ 로 크음을 알 수 있다. 이는 측정 시 측정물을 X 축 방향으로 위치시키고 측정하는 것이 XYZ 축 방향으로 위치시키고 측정하는 것보다 측정 오차를 줄일 수 있음을 의미한다.

이로부터 임의의 3 차원 형상에 대한 측정 오차가 1 차원 형상에 대한 측정 오차에 비하여 상

Table 4 Analysis of variance results

SV	DF	MS	F_0	F	
				95%	99%
A	1	4.91	7.12*	4.75	9.33
B	2	0.17	0.24	3.89	6.93
AB	2	4.00	5.80*	3.89	6.93
Error	12	0.69			
Total	17				

당히 크다는 것을 예측할 수 있다. 또한, 중간 길이의 길이 바인 경우 측정 오차가 $-0.72 \mu\text{m}$ 로 크며, 긴 길이의 길이 바인 경우에 $-0.40 \mu\text{m}$ 로 가장 작은 측정 오차를 나타낸다. 그러나, 이들 측정 오차의 절대치가 $0.32 \mu\text{m}$ 이므로 상당히 작은 양이다. 교호작용의 경우 길이 바를 X 축 방향으로 놓고 실험한 경우는 짧은 길이와 긴 길이의 길이 바를 측정할 때 각각 $0.74 \mu\text{m}$, $-0.72 \mu\text{m}$ 의 큰 측정 오차를 나타내며, 중간 길이를 이용하여 측정할 경우 $0.23 \mu\text{m}$ 로서 가장 작은 측정 오차를 나타낸다. 또한, XYZ 대각선 방향의 측정 오차는 짧은 길이일 때가 $-1.87 \mu\text{m}$ 로서 가장 크며, 긴 길이일 경우가 $-0.19 \mu\text{m}$ 로서 가장 작다. 이로부터 X 축으로 측정할 경우는 중간 길이의 길이 바 정도 되는 길이를 갖는 측정물이 가장 정확히 측정되며, XYZ 축으로 측정할 경우는 가장 긴 길이의 길이 바와 유사한 길이의 측정물이 상대적으로 정확히 측정됨을 예상할 수 있다.

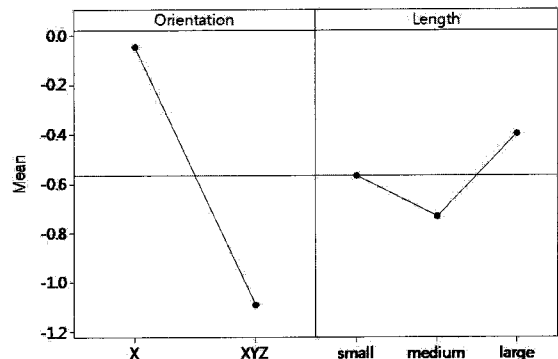


Fig. 4 Main effects plot

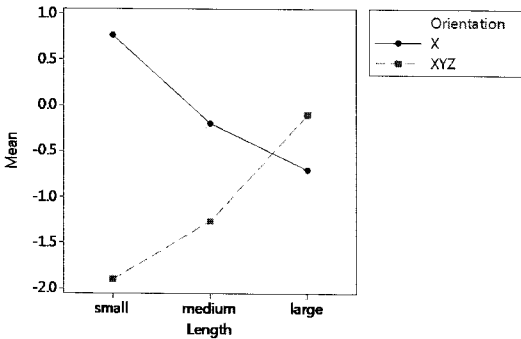


Fig. 5 Interaction effects plot

4. 측정 불확도

4.1 실험계획법을 이용한 표준 불확도

A 형 표준 불확도 평가에 대하여 통계적 방법으로 처리되어야 하는 매우 복잡한 경우가 많이 있다. 이런 경우에 불확도를 평가하기 위하여 실험 계획을 사용하며, 얻어진 자료에 대하여 소위 분산 분석이라는 통계적 분석을 통하여 불확도 성분을 산출할 수 있다.¹⁵

측정 불확도가 표준편차로부터 구할 수 있는 것과 같이, 각 분산 성분의 제곱근은 각각 표준 불확도로 간주할 수 있다. 식 (8)과 같이 잔여오차의 분산은 잔여오차의 평균제곱에 대한 기대값과 동일하다. 따라서, 분산 분석으로부터 계산된 잔여오차의 평균제곱에 대한 제곱근이 잔여오차의 표준 불확도라고 할 수 있다. 그러므로, 인자 A, B 와 교호작용 AB 에 대한 표준 불확도는 식 (9)~(11)과 같이 표현할 수 있다.

$$u_A = \sqrt{\frac{MS_A - MS_E}{br}} \tag{9}$$

$$u_B = \sqrt{\frac{MS_B - MS_E}{ar}} \tag{10}$$

$$u_{AB} = \sqrt{\frac{MS_{AB} - MS_E}{r}} \tag{11}$$

$$u_E = \sqrt{MS_E} \tag{12}$$

Table 5 는 위에서 제시한 방법에 의하여 계산된 측정 불확도의 결과를 나타낸다. 인자 A 와 B 에 대한 표준 불확도를 각각 식 (9)와 (10)으로부터 계산하였고, 이들의 교호작용에 대한 표준 불확도를 식 (11)로부터 계산하였다.

길이 바의 방향에 대한 표준 불확도는 Table 5 에서 알 수 있듯이 0.68 μm 이고, 교호작용에 의한 표준 불확도는 1.05 μm 이다. 또한, 잔여오차에 대한 표준 불확도는 0.83 μm 이며, 이는 샘플링에 대한 불확도, 위치 불확도, 온도 불확도 등의 영향을 포함한다. 분석 결과에 의하면 길이 바의 길이에 대한 평균제곱보다 잔여오차에 대한 평균제곱의 값이 크며, 따라서 길이 바의 길이에 대한 표준 불확도는 식 (10)로부터 알 수 있듯이 계산이 불가능하다.

Table 5 의 결과로부터 교호작용에 의한 표준 불확도 값이 가장 크다는 것을 알 수 있다. 즉, 길이 바의 방향과 길이를 동시에 변경하는 것은 측정 오차에 대한 불확도를 상당히 크게 하는 원인이 된다. 따라서, 측정 오차의 불확도를 줄이기 위하여 길이 바의 방향과 길이를 동시에 바꾸는 일은 피해야 함을 예상할 수 있다.

Table 5 Uncertainty budget

Quantity	Standard uncertainty	Probability distribution	Sensitivity coefficient	Uncertainty, μm	Degree of freedom
A	0.68	Normal	1	0.68	1
B	-	Normal	1	-	2
AB	1.05	Normal	1	1.05	2
E	0.83	Normal	1	0.83	12
$u_c(y)$	-	-	-	1.50	5.89
U	-	-	-	3.71	

4.2 합성 표준 불확도

분산 분석을 이용하여 보정된 길이 표준기의 방향과 길이에 대한 표준 불확도를 계산하였다. ISO 에 의하면 합성 표준 불확도는 분산 또는 표준 불확도 성분에 대한 제곱합의 제곱근법(Root Sum Square Method, RSSM)에 의하여 구할 수 있다.¹ u_A, u_B, u_{AB}, u_E 의 입력량 등은 서로 상관관계가 없이 독립적으로 구해졌으므로 공분산이 0 이 되며, 합성 표준 불확도 ($u_c(y)$)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2} \tag{13}$$

$$= \sqrt{(1 \times 0.68)^2 + (1 \times 1/05)^2 + (1 \times 0.83)^2}$$

$$= 1.50 \mu m$$

where, c_i ; 감도계수, $u(x_i)$; x_i 의 표준불확도

4.3 확장 불확도

확장 불확도(U)는 식 (14)와 같이 합성 표준 불확도 ($u_c(y)$)와 포함인자(coverage factor, κ)의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$U = \kappa u_c(y) \tag{14}$$

포함인자를 구하기 위하여 합성 표준 불확도의 유효 자유도(ν_{eff})를 추정하여야 하며, 이 유효 자유도는 Welch-Satterthwaite 공식을 이용하여 식 (15)와 같이 추정할 수 있다.

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{[c_i u(x_i)]^4}{\nu_i}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}}$$

$$= \frac{1.50^4}{\frac{0.68^4}{1} + \frac{1.05^4}{2} + \frac{0.83^4}{12}}$$

$$= 5.89 \tag{15}$$

식 (15)와 같이 계산된 유효 자유도를 이용하여 t-분포표에서 95% 신뢰수준으로 포함인자를 구하면 2.46 이 된다. 계산된 포함 인자와 합성 표준 불확도로부터 확장 불확도(U)를 계산하면 다음과

같다.

$$U = 2.46 \times 1.50 \mu m \tag{16}$$

$$= 3.71 \mu m$$

측정 오차의 평균이 $-0.60 \mu m$ 이므로 본 실험에 사용된 CMM 에 대한 측정 오차는 식 (17)과 같이 표현할 수 있다. 즉, 측정 오차는 $-4.31 \mu m$ 에서 $3.11 \mu m$ 의 구간에 분포되어 있을 것으로 기대할 수 있다.

$$-0.60 \mu m \pm 3.71 \mu m$$

at a level of confidence of 95% (17)

이를 Table 3 의 측정 오차 실험치와 비교해보면 모든 측정 오차값이 이 구간에 분포하므로 100%의 확률을 나타내며, 이로부터 측정 오차 실험과 불확도 분석이 의미가 있음을 예상할 수 있다.

5. 결론

실험계획법과 분산 분석과 같은 통계적 기법을 이용하여 3 차원 좌표 측정기의 측정 불확도를 평가하였다. 즉, CMM 성능 시험법인 ISO 10360 에 대하여 요인 배치법을 적용하였다. CMM 측정 성능에 영향을 주는 요인을 분석하고 불확도를 계산한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 분산 분석으로부터 길이 바의 방향이 측정 오차에 상당히 큰 영향을 끼침을 알 수 있었다. 또한, 길이 바의 방향과 길이의 교호작용도 CMM 측정 오차에 영향을 끼친다는 것을 알 수 있었다.

(2) 길이 바의 방향과 교호작용에 대한 표준 불확도는 각각 $0.68 \mu m, 1.05 \mu m$ 이다. 그리고, 합성 표준 불확도는 $1.50 \mu m$ 이고, 확장 불확도는 $3.71 \mu m$ 이다. 따라서, 본 실험에 사용된 3 차원 좌표 측정기의 측정 오차는 95%의 신뢰수준으로 $-0.60 \mu m \pm 3.71 \mu m$ 이며, $-4.31 \mu m$ 에서 $3.11 \mu m$ 의 구간에 분포되어 있을 것으로 기대할 수 있다.

참고문헌

1. ISO, "Guide to the Expression of Uncertainty in

- Measurement (GUM),” International Organization for Standardization(ISO), 1995.
2. Woo, I. H., “3 dimensional coordinate measuring machine technical trend and development status,” Journal of the Korean Society of Mechanical Engineering, Vol. 38, No. 5, pp. 45-48, 1998.
 3. Wilhelm, R. G., Hocken, R. and Schwenke, H., “Task specific uncertainty in coordinate measurement,” Annals of CIRP, Vol. 52, No. 2, pp. 553-563, 2001.
 4. Phillips S. D., Borchardt, B., Estler, W. T. and Buttress, J., “The estimation of measurement uncertainty of small circular features measured by coordinate measuring machines,” Precision Engineering, Vol. 22, No. 1, pp. 87-97, 1998.
 5. Piratelli-Filho, A. and Giacomo, B. D., “CMM uncertainty analysis with factorial design,” Precision Engineering, Vol. 27, No. 3, pp. 283-288, 2003.
 6. Feng, C. X., Saal, A. L., Salsbury, J. G., Ness, A. R. and Lin, G. C. S., “Design and analysis of experiments in CMM measurement uncertainty study,” Precision Engineering, Vol. 31, No. 2, pp. 94-101, 2007.
 7. Lee, G. J., Oh, S. L. and Kim, J. K., “A study on Measurement Uncertainty of 3-dimensional Coordinate Measuring machine used for Inspection of Precision Machined parts,” Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 14, No. 2, pp. 55-61, 2005.
 8. ISO 10360, “Coordinate metrology, part 1-2,” International Organization for Standardization (ISO), pp. 1-4, 1994.
 9. Basil, M. and Jamieson, A., “Uncertainty of Complex Systems by Monte Carlo Simulation,” Measurement and Control, Vol. 32, No. 1, pp. 16-20, 1999.
 10. Kwak, J. S. and Ha, M. K., “Optimization of Grinding Conditions and Prediction of Surface Roughness Using Taguchi Experimental Design,” Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 21, No. 7, pp. 37-45, 2004.
 11. Lim, P., Park, S. Y. and Yang, G. E., “A Study on tool life in the high speed machining of small-size end mill by factorial design of experiments and regression model,” Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 23, No. 2, pp. 73-80, 2006.
 12. Park, S. H., “Modern design of experiments,” Minyongsa, pp. 121-140, 2001.
 13. Montgomery, D. C., “Design and analysis of experiments,” Willey, pp. 228-249, 1991.
 14. Lee, S. P. and Ha, S. K., “Performance Evaluation for Coordinate Measuring Machine using Design of Experiments,” Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 17, No. 4, pp. 133-139, 2008.
 15. KS A 3000, “Guide to the expression of uncertainty in measurement,” Korean Standards Association(KS), pp. 7-33, 2005.