

# 실험계획법을 이용한 3차원 좌표 측정기의 성능 평가

이승표\*, 하성규<sup>+</sup>

(논문접수일 2008. 6. 17, 심사완료일 2008. 8. 9)

## Performance Evaluation for Coordinate Measuring Machine using Design of Experiments

Seung-Pyo Lee\*, Sung-Kyu Ha<sup>+</sup>

### Abstract

With the increasing demand for higher production quality and growing competition in the global market, coordinate measuring machine(CMM) has been widely used in industry to improve the efficiency and effectiveness of measurement. In this paper the performance evaluation of coordinate measuring machine is proposed using design of experiments. A factorial design is applied to carry out the performance test proposed by ISO 10360 with a length bar and to investigate CMM measurement errors associated to orientation and length in the work volume. The determination of the significance of effects in an experiment is made through the analysis of variance(ANOVA). The results show that the proposed method is suitable to analyze the factors which affect the CMM measurement performance.

**Key Words** : Coordinate measuring machine(3차원 좌표 측정기), CMM performance test(3차원 좌표 측정기 성능 시험), Design of experiment(실험계획법), Analysis of variance(분산 분석)

## 1. 서론

3차원 좌표 측정기(Coordinate Measuring Machine, CMM)는 서로 직교하는 안내와 안내의 이동량을 구하는 스케일 및 프로브를 가지고, 각각의 이동량에서 프로브의 3차원 좌표 값을 구할 수 있는 측정기이다<sup>(1)</sup>. 이 측정기는 1959년 영국 Ferranti사에 의하여 처음 개발되었다<sup>(2)</sup>. 초기에는 레이아웃

머신을 개조한 것으로 출발하여 오늘날까지 많은 발전을 이루고 있다. 즉, 공작기계 분야에서 NC 기술이 발전함에 따라서 초정밀 공작기계의 발전을 가져왔으며 이로 인하여 다양한 형태를 지닌 초정밀 제품들을 생산할 수 있게 되었다. 초정밀 제품을 제작하거나 수정, 보완하기 위해서는 고성능의 정밀기계도 필요하지만, 그 부품이 설계자의 의도대로 정확하게 가공되었는지를 판단하기 위해서 정밀 측정기에 의한

\* 한양대학교 기계설계학과 대학원 (chrisl@ihanyang.ac.kr)  
주소: 445-020 경기도 화성시 무송동 184-11

+ 한양대학교 기계정보경영공학부

측정기술이 필요하다<sup>(3,4)</sup>. 이러한 이유로 인하여 임의의 형상을 측정할 수 있는 3차원 좌표 측정기의 사용이 급속히 확산되고 있다.

3차원 좌표 측정기는 구조의 복잡성, 측정물 오차, 샘플링 기법, 측정 알고리즘과 기타 외부의 요인 등으로 인하여 측정에 영향을 미치는 수많은 측정 불확도(Measurement uncertainty) 원인들이 존재한다<sup>(5,6)</sup>. 이러한 불확도를 평가하는 방법은 크게 수학적 모델링 방법, 비교법 그리고 성능 시험법으로 나누어진다. 수학적 모델링 방법은 3차원 좌표 측정기의 이론적인 모델을 구성하고 이렇게 구성된 모델을 이용하여 불확도를 예측하는 방법을 의미한다. 비교법은 측정 부품과 동일한 보정된 길이표준기(Artifact)를 이용한 검사 방법을 의미한다. 성능 시험법은 지정된 길이 표준기를 이용하여 측정 오차를 평가하는 기준을 정의하고 이와 같이 정의된 기준을 이용하여 불확도를 평가하는 방법을 의미한다. 이 경우 일반적으로 두 점 사이의 거리가 성능 시험의 지표가 된다. 위의 세 가지 방법 중에서 성능 시험법이 상대적으로 평가 비용이 저렴하고 다른 시험에 비하여 간단하여 가장 많이 사용되고 있다<sup>(7,8)</sup>.

성능 시험법은 규격으로 정의되는 경우가 많으며 가장 널리 알려진 규격으로는 측정기 제조업체들이 연합하여 규정한 CMMA, 영국의 BS 6808, 독일의 VDI/VDE 2617, 미국의 ANSI/ASME B89, 일본의 JIS B 7449, 한국의 KS B 5542, 그리고 ISO 10360 등이 있다. 이러한 성능 시험법들은 각각 다른 시험 방법과 성능 평가 방법을 제시한다. 어떤 규격은 성능 평가 지표로서 측정된 길이의 최대 거리를 이용하고, 다른 규격은 표준편차를 이용하기도 한다. 측정 불확도는 성능 시험 시 얻어지는 데이터로부터 계산되며, 두 점에 대한 측정 불확도를 표시하는  $A + BL$ 의 형태로 표현되기도 한다.

이중에서 ISO 10360<sup>(9)</sup> 규격은 나라와 제조업체에 따라 각각 다른 성능 시험 규격을 통일하기 위하여 국제표준협회(ISO)에서 제정한 규격이다. 이 규격은 사용자 위주로 규정되어 있고, 포괄적으로 규정되어 있다. 또한 범위를 명확히 구분하고 현실성을 감안하여 규정되어 있다는 장점이 있기에 많이 사용되고 있다. ISO 10360 규격은 사용자가 지정하는 7군데의 시험위치와 방향에 대하여 각 위치에서 5개의 각기 다른 길이 표준기를 3회씩 측정하여 총 105 회를 측정한다. 측정 결과 모두가 조건을 초과하지 않으면 합격으로 판정한다.

본 연구는 실험계획법이라는 통계적인 방법을 통하여 3차원 좌표 측정기의 성능을 평가하는 방법을 제시한다. 기존의

성능 평가 방법들은 성능에 영향을 끼치는 인자들을 독립적으로 제어하고 그 결과를 정량적으로 파악하기가 용이하지 않다. 이에 비하여 실험 계획법은 3차원 좌표 측정기의 성능에 영향을 끼치는 요인들을 적절히 제어하고 그 결과를 동시에 고려하여 체계적인 성능 평가가 가능하다. 이러한 실험계획법을 이용한 성능 평가를 위하여 길이 표준기로는 길이 바를 사용하며 성능에 영향을 끼치는 변수로서 길이 바의 방향과 길이를 선정하였다. 측정 오차의 통계적인 분석을 위하여 분산 분석(Analysis of variance, ANOVA)이 사용되었고, 이를 통하여 측정 성능에 영향을 주는 요인을 분석하고 신뢰 구간을 결정하였다.

## 2. 실험계획법

### 2.1 요인 배치법

실험계획법이란 실험을 계획 및 수행하고 결과를 분석하는 방법으로서 초기에 농업 및 생물 분야에서부터 시작하여 최근에는 공학 분야까지 다 방면으로 적용되고 있다. 실험계획법에는 요인 배치법, 분할법, 교략법, 일부실시법, 불완비 블록계획법, 반응표면계획법, 혼합물 실험계획법 및 Taguchi 법 등의 여러 가지 기법들이 있다. 특히, 요인 배치법은 실험 변수들을 인자와 수준으로 나누고 이들의 모든 가능한 조합에 대하여 실험을 수행하고 그 결과를 분산 분석 기법에 의하여 분석하는 실험계획법이다<sup>(10,11)</sup>.

성능 시험을 수행하기 전에, 실험을 수행하는데 소요되는 총 시간을 고려하는 것이 필수적이다. 소요되는 총 시간은 실험 인자의 수와 각 인자들에 대한 수준의 수, 그리고 요구되는 데이터의 양과 밀접한 관련이 있다. 요인 배치법에서 전체 수행되는 실험의 회수( $N$ )는  $N = L^V$ 의 수식으로 계산할 수 있다. 여기서,  $L$ 은 각 인자의 수준 수이고,  $V$ 는 인자의 수이다. 예를 들어, 3개의 수준을 갖는 4개의 인자인 경우에, 전체 실험 수행 회수는  $3^4$ 로서 81회가 된다.

일반적으로 몇몇 인자들은 실험을 단순화하고 전체 실험 회수를 최소화하기 위하여 고정 값으로서 간주된다. 본 실험에서 길이 바를 측정하는 위치는 작업 공간의 중앙으로 고정시킨다. 즉, 길이 바는 지지대를 사용하여 3차원 좌표 측정기의 테이블 중앙에 위치시킨다. 또한, 프로브의 이동속도는 항상 일정하게 유지하며 전체 실험에 대하여 동일한 프로브를 사용한다.

측정 오차에 영향을 끼치는 3차원 좌표 측정기의 인자들을 고려하여 요인 배치법이 선택되었다. Table 1에서 알 수 있듯이 길이 바의 방향으로는 두 개의 수준을 갖고, 길이 바

**Table 1** Factors and levels of the experiment

Factors	Levels		
	1	2	3
Orientation(A)	X	XYZ	-
Length(B)	small	medium	large

의 길이로는 세 수준을 갖는 요인 배치법을 적용하였다. 여기서, A와 B는 각각 길이 바의 방향과 길이를 의미하며, 숫자 1, 2, 3은 인자의 수준을 나타낸다. 또한, AB는 A와 B의 수준을 동시에 바꿀 경우에 발생하는 교호 작용(Interaction)을 검증하기 위하여 검토되었다. Table 2는 요인 배치법의 실험 순서를 나타낸다. 이 배열에서 요인 배치법의 각 열은 실험적으로 구해지는 분산을 추정하기 위하여 모사될 수 있는 각각의 실험을 나타낸다.

길이 바의 방향(A)을 위하여 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. 1은 3차원 좌표 측정기의 작업 공간에서 이들 방향을 표시한다. 길이 바의 길이(B) 인자의 수준은 3차원 좌표 측정기 축의 길이에 대하여 충분히 길게 선정되어야 하며, 따라서 짧은 길이(수준 1), 중간 길이(수준 2), 그리고 긴 길이(수준 3)로 선정되었다.

실험 순서는 난수표를 사용하여 임의의 순서를 결정하고, 결정된 순서대로 진행하여 고려하고자 하는 인자 외에 기타 원인들의 영향이 실험 결과에 편의(Bias)되는 것을 방지한다. Table 2에서 알 수 있듯이, 첫 번째 실험은 XYZ 축을 따라서(인자 A, 수준 2) 짧은 길이의 길이 바(인자 B, 수준 1)로 수행된다. 각각의 실험은 3회씩 반복되어 실험되며, 따라서 총 18회의 측정이 수행된다. 실험의 특성치인 측정 오차는 측정된 길이 바와 교정된 길이 바의 길이 차이로 계산된다.

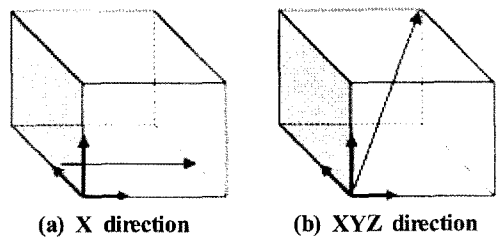
실험계획법에 의하여 발생한 측정 오차의 변화를 고찰하기 위하여 분산 분석이 수행되어지며 분산 분석의 결과로부터 중요한 인자와 요인의 효과와 그에 따른 영향이 고찰된다.

**2.2 분산 분석**

분산 분석이란 특성치의 산포를 제곱합(Sum of squares) 또는 변동(Variation)으로 나타내고 이 제곱합을 실험과 관련된 인자마다의 제곱합으로 분해하여 오차에 비해 특히 큰 영향을 주는 인자가 무엇인가를 찾아내는 분석방법<sup>(10)</sup>이다. 즉, 분산 분석은 전체 결과에 대한 분산을 각각 제곱합의 원

**Table 2** Factorial design and experimental runs

Runs	Randomized Order	A	B
1	4	1	1
2	3	1	2
3	2	1	3
4	16	2	1
5	10	2	2
6	8	2	3
7	18	1	1
8	7	1	2
9	9	1	3
10	17	2	1
11	11	2	2
12	13	2	3
13	6	1	1
14	12	1	2
15	15	1	3
16	1	2	1
17	14	2	2
18	5	2	3



**Fig. 1** Orientation of length bar

인과 관계된 분산들로 분류시켜준다. 요인 배치법이 두 개의 인자, A, B와 그들의 교호작용인 AB를 고찰하는 것이므로 총 제곱합(Total sum of squares,  $SS_T$ )은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 다시 말하면, 총 제곱합은 인자 A에 대한 제곱합( $SS_A$ ), 인자 B에 대한 제곱합( $SS_B$ ), 교호작용 AB에 대한 제곱합( $SS_{AB}$ ), 그리고 오차 제곱합( $SS_E$ )의 합으로서 표현된다<sup>(11)</sup>.

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AB} + SS_E \tag{1}$$

실험 인자들에 대하여 여러 수준이 존재하기 때문에 실험 오차에 대한 영향은 임의의 결과를 초래할 수 있다. 따라서 인자의 각 수준에서 특성치의 차이가 유의한가를 알아볼 필요가 있으며, 이를 위하여 F 검정을 수행한다. 단, 오차 성분은 표준정규분포  $NID(0, \sigma^2)$ 를 따르고 서로 독립인 변량이 된다.

요인 배치법이 적용된 선형 통계 모델은 식 (2)와 같다.

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk}, \quad \begin{matrix} i = 1, \dots, a \\ j = 1, \dots, b \\ k = 1, \dots, n \end{matrix} \quad (2)$$

where,

$y_{ijk}$ : 종속변수 또는 반응변수

$\mu$ : 모평균

$\tau_i$ : 인자 A의  $i$  번째 수준에 대한 영향

$\beta_j$ : 인자 B의  $j$  번째 수준의 영향

$(\tau\beta)_{ij}$ :  $\tau_i$ 와  $\beta_j$ 의 교호작용에 대한 영향

$\epsilon_{ijk}$ : 잔여오차

$a$ : 인자 A의 수준 수

$b$ : 인자 B의 수준 수

$n$ : 실험 반복 회수

$\tau_i$ 의 분산은  $\sigma_\tau^2$ 이고 표준정규분포  $NID(0, \sigma_\tau^2)$ 를 따르고  $\beta_j$ 의 분산은  $\sigma_\beta^2$ 이고 표준정규분포  $NID(0, \sigma_\beta^2)$ 를 따르며 이들은 서로 잔여 오차  $\epsilon_{ijk}$ 에 독립적이라고 가정하면 종속변수의 분산  $\sigma_y^2$ 은 식 (3)과 같이 표현할 수 있다. 즉 분산  $\sigma_\tau^2, \sigma_\beta^2, \sigma_{\tau\beta}^2, \sigma^2$ 은 총 분산  $\sigma_y^2$ 의 분산 성분들이며, 이 방정식은 분산 성분의 임의의 효과 모델과 같다.

$$\sigma_y^2 = \sigma_\tau^2 + \sigma_\beta^2 + \sigma_{\tau\beta}^2 + \sigma^2 \quad (3)$$

분산 분석은 Table 3과 같이 요약될 수 있다. 평균제공 (MS)은 분산의 추정치로서 고려될 수 있고, 제곱합(SS)을

각각의 자유도(DF)로 나눔으로써 계산된다. F 검정은 인자 A, B와 교호작용 AB의 통계적 유의성을 확인하기 위하여 수행된다.

$$E(MSA) = \sigma^2 + b\sigma_\tau^2 \quad (4)$$

$$E(MSB) = \sigma^2 + a\sigma_\beta^2 \quad (5)$$

$$E(MSAB) = \sigma^2 + r\sigma_{\tau\beta}^2 \quad (6)$$

$$E(MSE) = \sigma^2 \quad (7)$$

즉, 계산된  $F_0$  값과 주어진 유의수준에 대한 F 분포도로부터 얻을 수 있는 F 값을 비교함으로써 구할 수 있다.

평균제공이 모든 반응변수로부터 계산되는 것과 같이 각각의 분산 성분들도 계산된 평균제공으로부터 나타나는 잔차 변동의 보상이 요구된다. 즉, 평균제공의 기대값은 식 (4)~(7)과 같이 인자와 교호작용, 그리고 분산의 오차 성분의 함수로 표시할 수 있다<sup>(11)</sup>.

### 3. 실험 결과 및 고찰

3차원 좌표 측정기의 성능을 평가하기 위하여 Fig. 2와 같이 International Metrology Systems 사의 IMPACT를 이용하여 Table 2에 언급된 순서대로 실험을 수행하였다. IMPACT는 Moving bridge type으로 측정 구간(Measuring range)은 X축으로 500mm이고, Y축으로 600mm, 그리고 Z축으로 450mm이다. 그리고 ISO 10360에 의한 최대 허용 오차(Maximum Permissible Error, MPE<sub>E</sub>)는  $1.9+L/250 \mu m$ 이다. IMPACT의 분해능(Resolution)은 0.0001mm이다.

실험을 위하여 길이 표준기로써 길이 바를 사용하였다. 길이 바는 Fig. 3에서 알 수 있듯이 원통형상이며, 지시된 교정절차에 의해서 교정된 것을 사용하였다. 길이 바의 측정 불확도는 신뢰수준 95%, 포함인자  $k=2$ 에서  $\sqrt{(0.22)^2 + (0.8)^2} L^2 \mu m$ 이다. 길이 바의 길이는 Table 4에 나타내었다.

Table 3 Analysis of variance

Source of Variation(SV)	Sum of squares(SS)	Degrees of freedom(DF)	Mean squares(MS)	F <sub>0</sub>
A	SS <sub>A</sub>	a-1	SS <sub>A</sub> / DF <sub>A</sub>	MS <sub>A</sub> / MS <sub>E</sub>
B	SS <sub>B</sub>	b-1	SS <sub>B</sub> / DF <sub>B</sub>	MS <sub>B</sub> / MS <sub>E</sub>
AB	SS <sub>AB</sub>	(a-1)(b-1)	SS <sub>AB</sub> / DF <sub>AB</sub>	MS <sub>AB</sub> / MS <sub>E</sub>
Error	SS <sub>E</sub>	ab(n-1)	SS <sub>E</sub> / DF <sub>E</sub>	
Total	SS <sub>T</sub>	abn-1		

측정은 항온실에서 수행되었고, 항온실 온도는  $20^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$  이다. 3차원 좌표 측정기 구동 소프트웨어를 이용하여 측정을 실시하였고, 측정의 정확도를 위하여 반복 측정이 가능하도록 DMIS Code를 이용하여 프로그램을 작성하였다. 작성된 프로그램을 이용하여 길이 바의 길이를 측정할 때 프로브의 측정 위치는 Fig. 3에서 알 수 있듯이 좌우 원형 표면이다.

위에서 언급한 방법에 따라서 길이 바의 길이가 측정되었고, 측정 오차가 계산되었다. 계산된 측정 오차는 Fig. 4와 같이 표시하였다.

Fig. 4에서 알 수 있듯이, 가장 작은 측정오차는 0.0mm로서 375.0004mm 길이 바를 XYZ 방향으로 측정할 때 발생하였다. 또한 가장 큰 측정 오차는 -2.3mm로서 250.0007

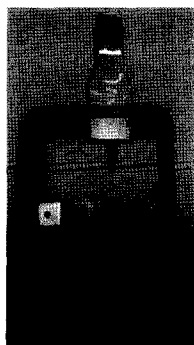


Fig. 2 IMPACT of International Metrology Systems

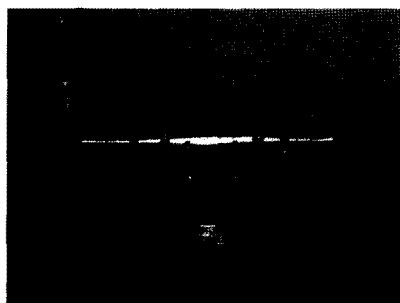


Fig. 3 Length bar

Table 4 Length of the length bar

Length bar	Length
small	175.0004mm
medium	250.0007mm
large	375.0004mm

mm의 길이 바를 XYZ 방향으로 측정 시 발생하였다. Fig. 5와 6은 각각 길이 바 방향과 길이에 따른 측정 오차를 나타낸다.

실험 결과, 측정 오차의 평균은  $-0.60\mu\text{m}$ 이고 표준편차는  $1.09\mu\text{m}$ 이다. 분산분석을 수행하기 전에 Normality 가정을

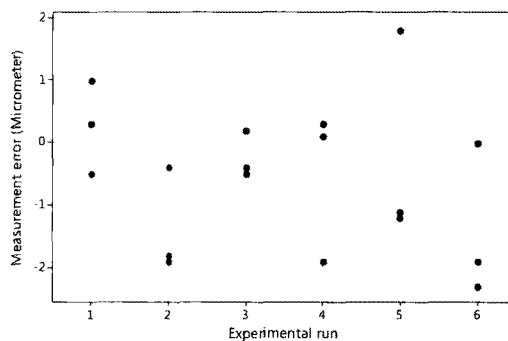


Fig. 4 Measurement errors in work volume

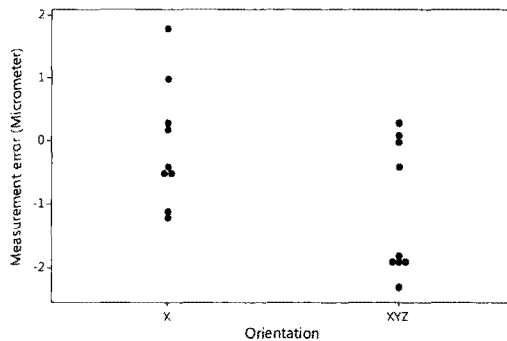


Fig. 5 Measurement errors at different length bar orientations in work volume

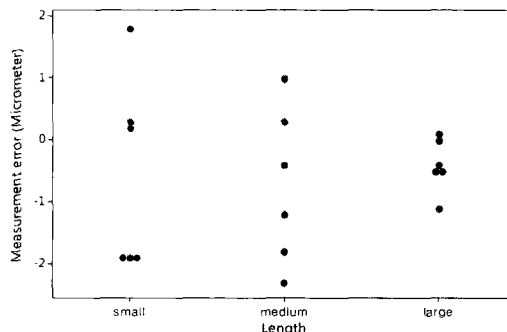


Fig. 6 Measurement errors of different length bar lengths

검증하기 위하여 측정 오차의 오차 성분에 대한 Normal probability plot을 Fig. 7에 도시하였다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 모든 데이터가 직선 주변에 분포한다. 이는 오차가 정규 분포를 이룬다는 것을 의미하며, 따라서 본 실험의 가설은 기각될 수 없고 의미 있는 실험임을 증명한다.

측정 오차에 대한 분산 분석이 수행되었고, 계산된 자유도와 평균제곱,  $F_0$  값을 Table 5에 정리하였다. Table 5로부터 알 수 있듯이 길이 바의 방향에 대한  $F_0$  값이 7.12로서 95%의 유의수준( $\alpha=0.05$ )에 대한 F 값인 4.75보다 크다. 또한, 길이 바의 방향과 길이의 교호작용에 대한  $F_0$  값이 5.80으로서 95%의 유의수준에 대한 F 값인 3.89보다 크다. 따라서 길이 바 방향의 수준 변화에 대하여 상당히 유의한 차가 있으며, 또한 길이 바의 방향과 길이의 교호작용도 유의하다. 즉, 길이 바의 방향과 길이 중에서 길이 바의 방향이 측정 오차에 미치는 영향이 크며, 길이 바의 방향과 길이의 교호작용도 길이 바의 길이에 비하여 큰 영향을 끼친다. 따라서 측정 시 측정물을 위치시키는 방향이 측정물의 길이에 비하여 중요함을 예상할 수 있다.

인자 A와 B, 그리고 이들의 교호작용의 효과를 분석하여 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다.

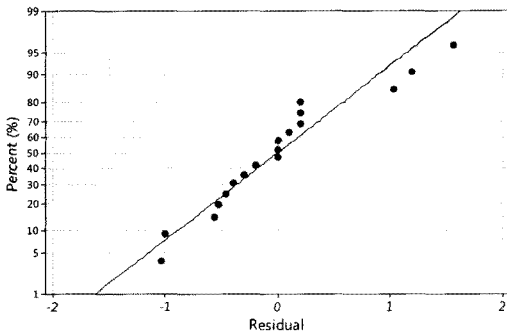


Fig. 7 Normal probability plot of measurement error

Table 5 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				

Fig. 8에서 알 수 있듯이 길이 바를 X축 방향으로 놓을 경우 측정 오차가 상대적으로 작고, XYZ 대각선 방향의 경우 측정 오차가 상대적으로 큼을 알 수 있다. 또한, 중간 길이의 길이 바인 경우 측정 오차가 가장 크며, 긴 길이의 길이 바인 경우가 상대적으로 가장 작은 측정 오차를 나타낸다. 그러나 이들 측정 오차의 차이가  $0.4\mu\text{m}$ 이므로 상당히 작은 양이다. 교호작용의 경우 길이 바를 X 축 방향으로 놓고 실험한 경우는 짧은 길이의 길이 바를 측정할 때 가장 큰 측정 오차를 나타내며, 중간 길이를 이용하여 측정할 경우 가장 작은 측정 오차를 나타낸다. 이 결과로부터 측정 시 측정물을 X 축으로 위치시키고 측정하는 것이 XYZ축 3차원으로 위치시키고 측정하는 것에 비하여 보다 정밀한 측정을 수행할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 측정물의 크기에 따라서 측정 오차가 선형적으로 변하는 것이 아니라 비선형적으로 변하며, 큰 측정물을 측정할 때가 다른 경우에 비하여 정밀한 측정 결과를 얻을 수 있음을 예상할 수 있다. 또한, XYZ 대각선 방향의 측정 오차는 짧은 길이일 때가 가장 크며, 긴

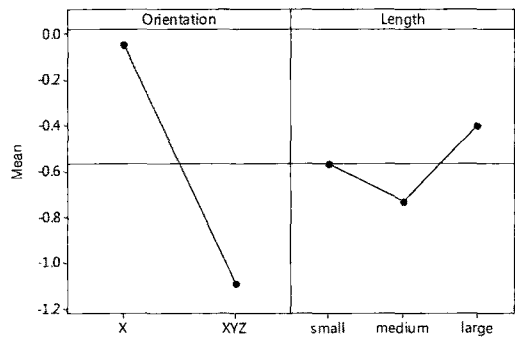


Fig. 8 Main effects plot

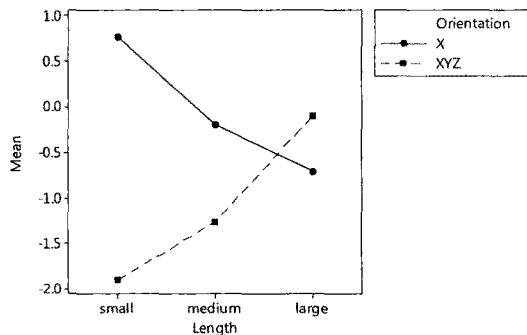


Fig. 9 Interaction effects plot

길이일 때가 가장 작다. 교호작용의 경우 측정 오차는 대략 선형 분포를 이룸을 알 수 있다.

실험 결과로부터 교호작용이 유의함을 알 수 있으며 따라서 인자 A, B의 조합에 의한 특별한 효과가 발생함을 예측할 수 있다. 이와 같은 경우 A, B 각 인자에 대하여 모평균을 추정하는 것보다 A, B 수준의 조합인 A<sub>i</sub>B<sub>j</sub>에 대한 모평균을 추정하여 최적 조건을 찾는 것이 의미가 있다. A<sub>i</sub>B<sub>j</sub>에서의 모평균  $\mu(A_iB_j)$ 의 점 추정값은  $\bar{x}_{ij}$ 이고, 유의수준(1- $\alpha$ )의 신뢰구간은 t 분포를 이용하면 식 (8)과 같다(10).

$$\bar{x}_{ij} \pm t \left( DF_E, \frac{\alpha}{2} \right) \sqrt{\frac{MS_E}{n}} \quad (8)$$

$\bar{x}_{ij}$ 를 가장 작게 하는 A<sub>i</sub>B<sub>j</sub>는 A<sub>2</sub>B<sub>3</sub>이며, 이 수준 조합에서 A<sub>2</sub>B<sub>3</sub>의 점 추정값은 0.0 $\mu$ m이며, 구간 추정값은 식 (8)로부터 -1.04 ~ 1.04 $\mu$ m이 얻어진다. 즉, 긴 길이의 길이 바를 XYZ 대각선 방향으로 놓고 측정했을 경우 측정 오차가 가장 작으며, 이 최적 조건에서의 측정오차는 -1.04 $\mu$ m에서 1.04 $\mu$ m 사이에 있을 것으로 기대된다. 또한 측정 오차의 평균이 -0.60 $\mu$ m이므로 평균에 대한 구간 추정값은 0.44 $\mu$ m에서 -1.64 $\mu$ m이다. 이를 Fig. 4의 측정 오차 실험치와 비교해 보면 많은 데이터가 구간 추정값 사이에 분포하고 있음을 알 수 있다. 즉, 전체 18개의 측정 오차값 중에서 11개가 이 구간 추정값 안에 분포하며 이는 확률 61.1%에 해당한다.

#### 4. 결론

3차원 좌표 측정기의 성능 시험 방법인 ISO 10360에 근거한 성능 평가에 요인 배치법을 적용하여 3차원 좌표 측정기의 측정 성능에 영향을 주는 요인을 분석하고 신뢰 구간을 결정하였다. 분산 분석을 이용하여 길이 바의 방향과 길이에 따른 측정 오차의 영향을 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 분산 분석을 수행한 결과 길이 바의 방향이 측정 오차에 상당한 영향을 끼침을 알 수 있었다. 또한 길이 바의 방향과 길이의 교호작용도 3차원 좌표 측정기의 측정 오차에 영향을 끼친다는 것을 알 수 있었다.
- (2) 주 효과와 교호작용 효과를 분석한 결과, 3차원 좌표 측정기의 측정 성능은 선형적으로 변하는 단순한 시스템이 아니라 비선형의 특성을 갖는 상당히 복잡한 현상임을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제안한 측정 오차 평가 방법을 이용하여 3차원 좌표 측정기의 측정 성능을

분석하는 것은 측정기의 성능 특성을 파악하는데 의미가 있다고 예상할 수 있다.

#### 참고 문헌

- (1) Korean Standards Association, 2006, *KS B 5542, Test code for accuracy of coordinate measuring machines*, Seoul, pp. 1~9.
- (2) Lee, J. D., 2000, *Theory and application for 3 dimensional measurement*, Sungandang, Seoul, pp. 2~3.
- (3) Lee, G. J., Oh, S. L., and Kim, J. K., 2005, "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.
- (4) Jung, P. G., Bae, G. H., Park, S. W., and Hong, S. W., 2007, "Comparison of Touch Trigger Probe and Atomic Force Probe for Coordinate Measuring Machines," *Proceedings of the KSMTE Spring Conference 2007*, No. 10, pp. 827~832.
- (5) Wilhelm, R. G., Hocken, R., and Schwenke, H., 2001, "Task specific uncertainty in coordinate measurement," *Annals of CIRP*, Vol. 52, No. 2, pp. 553~563.
- (6) Lee, G. T., Lee, D. J., Yoon, Y. S., Park, H. C., and Oh, J. M., 2003, "A Study on Measurement Uncertainty of Theodolite System," *Proceedings of the KSMTE Spring Conference 2003*, No. 1, pp. 229~233.
- (7) Bosch, J. A., 1995, *Coordinate measuring machines and systems*, Marcel Dekker, New York, p. 444.
- (8) Piratelli-Filho, A. and Giacomo, B. D., 1999, "Evaluation of coordinate measuring machines performance using design of experiments," *Proceedings of IMEKO World Congress*, Osaka.
- (9) International Organization for Standardization, 1994, *ISO 10360, Coordinate metrology, part 1~2*, Geneva, pp. 1~4.
- (10) Park, S. H., 2001, *Modern Design of Experiments*, Minyongsa, Seoul, pp. 121~140.
- (11) Montgomery, D. C., 1991, *Design and analysis of experiments*, Willey, New York, pp. 228~249.