

3 차원 좌표 측정기의 측정 성능에 대한 실험적 연구

An Experimental Study on the Measurement Performance of 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: 2008.7.21 / Revised: 2008.11.27 / Accepted: 2008.12.9

In the manufacturing industry, there has been a significant increase in the use of coordinate measuring machines(CMM). In this paper, the sources of CMM measurement performance are discussed. The effects of workpiece position, length and orientation are analyzed by using the design of experiments. Both a fractional factorial design and a factorial design are employed to conduct the experimental study. The analysis of variance is performed to determine the significance of factors in the experiment and regression analysis is applied to make the measurement approximate model. The results show that position along the Z axis, length and orientation affect the CMM measurement performance.

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

1. 서론

기존의 측정 및 검사는 버어니어 캘리퍼스, 마이크로미터, 하이트 게이지, 게이지 블록, 다이얼 인디케이터 등을 사용하였다. 이러한 측정은 경험 축적이 없으면 안정된 측정을 기대할 수 없고, 능률이 저하되며, 때로는 아날로그 계측에 의한 판독 실수가 발생할 수 있으므로 측정 담당자에 대해서 고도의 숙련을 요구해왔다. 이와 같은 품질 관리가 행해지고 있는 사이에 가공 분야에서 NC 공작기계가 도입되었다. 이에 따라 복잡하고 고정도의 부품을 가공할 수 있게 되었고, 따라서 임의의 형상을 정밀하게 측정할 수 있는 만능 측정기의 필요성이 인식되었다. 또한, 컴퓨터의 발전으로

인하여 측정 시스템의 디지털화 및 측정 데이터 처리에 이를 활용할 수 있게 됨으로써 3 차원 좌표 측정기(Coordinate measuring machine, CMM)의 사용이 급속히 확대되고 있다.

CMM의 측정 성능은 크게 측정기, 피측정물, 외부 환경, 작업자에 의한 요인 등으로 나눌 수 있다.^{1,2} 즉, CMM 사용자는 측정기의 온도 보정을 통하여 측정 정확도를 높일 수 있고, 피측정물의 가공 정도나 표면 거칠기를 고려함으로써 측정 성능을 향상시킬 수 있다. 또한, 작업자의 경험과 지식에 의하여 측정 성능을 높일 수 있다.

측정 성능의 향상과 함께 역공학(Reverse engineering)을 이용한 측정 모델 수립에 대한 필요성이 대두되고 있다.³ 역공학은 기존 시스템을 분

석 및 수정하여 그 관계를 모델로 표현하는 방법을 의미한다. 대부분의 역 공학은 기존 시스템을 분석하기 위하여 측정을 수행한다. 회귀 분석(Regression analysis)^{4,6} 등의 방법을 이용하여 측정 정밀도와 측정 변수와의 관계가 정의되면, 실험에 의한 측정 모델을 수립할 수 있다. 이와 같이 수립된 모델을 통하여 측정 성능을 향상시키고, 소요 비용과 측정 소요 시간을 감소시킬 수 있다.

CMM 에 대한 수많은 연구가 수행되었다. 이들 연구는 특히 측정기, 측정 알고리즘, 작업자, 외부 환경 등을 이용한 CMM 측정 성능 향상에 초점을 맞추고 있다. Osawa⁷ 등은 원통형 측정물에 대한 보정 방법에 대하여 연구하였고, Wechenmann² 등은 측정 시 작업자에 대한 영향에 대하여 연구하였다. Zhang⁸ 등은 CMM 의 오차 보정에 대하여 고찰하였고, Limaïem⁹ 등은 최적의 작업 순서와 자원 할당(Resource allocation)에 의한 CMM 측정 계획에 대하여 언급하였다. 이와 같이 CMM 측정 성능에 대한 많은 연구가 수행되었으나, 피측정물의 변화에 대한 영향을 고찰한 연구는 거의 없는 실정이다. 또한, 기존의 연구들은 측정 성능에 영향을 끼치는 여러 가지 요인들을 실험적 방법에 의하여 체계적으로 동시에 고려하지 않았다.

본 연구에서는 피측정물의 변화에 따른 영향을 실험계획법(Design of experiment, DOE)이라는 통계적인 방법을 적용하여 그 영향을 고찰하였다. 피측정물로는 보정된 길이 바(Length bar)를 사용하였고, 길이 바의 위치, 방향, 길이를 변화시키면서 그 영향을 고찰하였다. 이들이 측정 성능에 미치는 영향을 통계적으로 분석하기 위하여 분산 분석(Analysis of variance, ANOVA)이 수행되었다. 또한, 이들 요인들에 대한 측정 모델을 수립하기 위하여 회귀 분석이 수행되었다. 이를 통하여 피측정물의 변화에 대한 측정 성능을 평가하는 방법이 제안되었다.

2. CMM 측정 성능에 영향을 주는 요인들

CMM 측정 성능에 영향을 주는 요인들은 측정기, 피측정물, 외부 환경, 작업자 등으로 구분할 수 있다. 그 중에서 측정기와 관련된 요인들은 측정기의 구조와 형상, 스케일, 프로브 시스템, 동적 정도, 그리고 측정기가 놓여지는 환경 등이다. 이와 같은 요인들은 측정 환경 및 시간의 영향을 받지 않는 계통오차(Systematic error)와 그렇지 않은

우연오차(Random error)로 나눌 수 있다. 우연오차는 환경이나 시간 조건 이외에 작업자 개인의 특성에 기인하는 요인도 있어서 측정 성능 향상이 어렵지만 계통오차는 동일한 조건하에서는 항상 같은 값으로 발생하기 때문에 측정 성능 향상이 가능하다. CMM 의 계통오차는 X, Y, Z 좌표축이 이동하면서 발생하는 구조적 오차와 프로브 오차 등이 포함된다.¹⁰

피측정물의 측정 위치와 방향을 X, Y, Z 축이나 XY, YZ, ZX 축, 또는 XYZ, YZX, ZXY 축으로 변경하는 것은 이론적으로 동일한 측정값이 갖는다. 그러나, 위에서 언급한 구조적 오차로 인하여 그 측정값이 동일하지 않다. 또한, 피측정물의 크기를 변경하는 것도 외부 환경 요인을 포함한 여러 가지 오차 요인들로 인하여 일정한 측정 결과를 나타내지 않는다. 따라서, 피측정물의 측정 위치와 방향, 크기를 변경시키면서 측정 성능에 대한 영향을 파악하는 것은 의미가 있으며, 이를 통하여 측정 성능의 향상을 기대할 수 있다.

3. 실험계획법

3.1 순차적 실험계획법

본 연구에서는 피측정물의 변화에 따른 측정 성능 평가를 위하여 순차적 실험계획법(Sequential experiment approach)^{11,12} 을 적용하였다. 이 방법은 측정 성능에 영향을 주는 여러 인자들에 대하여 선행 실험(Screening experiment)를 수행하여 어느 인자가 중요한지를 파악한 후, 이들 중요한 인자들만을 대상으로 확인 실험(Confirmation experiment)를 수행하는 방법이다. 이러한 순차적 실험계획법은 실험 시간과 비용을 절약할 수 있는 장점이 있어서 많이 사용된다. 일반적으로 선행 실험은 확인 실험에 비하여 많은 인자들이 사용되며, 확인 실험은 선행 실험에 비하여 많은 요인수가 사용된다.

3.2 선행 실험

3.2.1 실험 방법

보정된 길이 바의 측정 성능에 대한 영향을 파악하기 위하여 실험계획법의 일종인 일부실시법(Fractional factorial design)이 수행되었다. 일부실시법은 불필요한 교호작용이나 고차의 교호작용은 구하지 않고, 각 인자의 조합 중에서 일부만 선택하여 실험을 실시하는 방법으로써 실험회수를 가

능한 적게 하고자 하는 경우에 사용한다.¹³

본 연구에서는 5 개의 인자(Factor)에 대하여 분석도(Resolution) III 의 1/4 일부실험법을 적용하였다. 이때 인자의 수준은 2 수준(Level)이고, 3 회 반복 실험하여, 총 24 회의 실험을 수행하였다. 선행 실험에 사용한 인자와 수준은 Table 1 과 같다. 즉, 피측정물의 위치에 따른 측정 성능을 평가하기 위하여 X, Y, Z 축으로 각각 두 개의 지점에서 측정을 수행하였다. Table 1 에서 알 수 있듯이 A, B, C 인자

Table 1 Factors and levels of screening experiment

Factors	Levels	
	-1	1
A. Position from x=0 along X axis	Left (1140mm)	Right (1640mm)
B. Position from y=0 along Y axis	Front (1420mm)	Back (1920mm)
C. Position from z=0 along Z axis	Low (290mm)	High (520mm)
D. Length	Small	Long
E. Orientation	X dir.	XYZ dir.

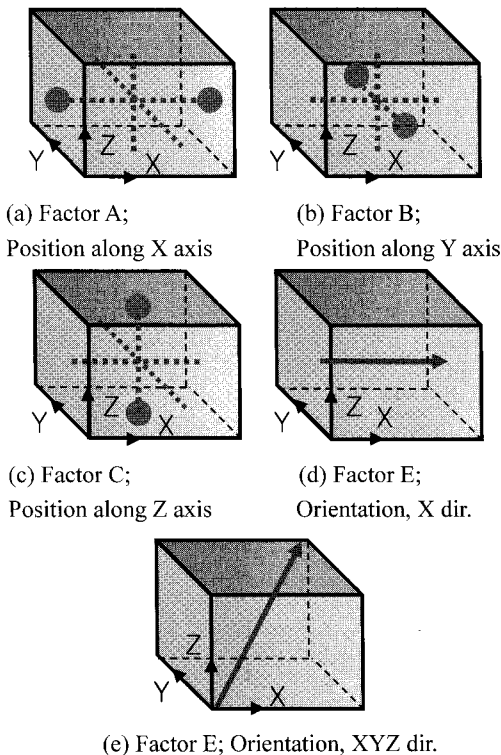


Fig. 1 Factors and levels of screening experiment

에서 표시한 수치는 각각 CMM 좌표 원점으로 부터의 거리를 의미한다. 작업 공간상에서 직선 방향과 대각선 방향이 측정 성능에 끼치는 영향을 파악하기 위하여 피측정물의 방향을 X 축 직선 방향과 XYZ 축 대각선 방향의 두 개의 방향으로 선정하였다. 그리고, 피측정물의 크기에 대한 측정 성능의 경향을 확인하기 위하여 짧은 길이 바와 긴 길이 바의 두 가지 경우에 대하여 측정을 수행하였다. Fig. 1 은 각 인자들과 수준을 도시한다.

측정 오차는 길이 바의 측정값에서 길이 바의 보정값을 뺀 값으로 구할 수 있다. 실험 순서는 Table 2 에 정리하였다.

Table 2 Experimental orders of screening experiment

Run	A	B	C	D	E
1	-1	1	-1	-1	1
2	-1	-1	1	1	-1
3	-1	-1	1	1	-1
4	1	1	-1	1	-1
5	-1	-1	-1	1	1
6	-1	1	1	-1	-1
7	-1	-1	-1	1	1
8	1	-1	-1	-1	-1
9	1	1	1	1	1
10	-1	1	-1	-1	1
11	-1	1	1	-1	-1
12	-1	1	1	-1	-1
13	1	-1	-1	-1	-1
14	1	1	1	1	1
15	1	-1	1	-1	1
16	-1	1	-1	-1	1
17	1	-1	1	-1	1
18	1	1	-1	1	-1
19	-1	-1	-1	1	1
20	1	1	-1	1	-1
21	1	1	1	1	1
22	-1	-1	1	1	-1
23	1	-1	1	-1	1
24	1	-1	-1	-1	-1

3.2.2 실험 결과 및 고찰

실험은 Fig. 2 에 나타난 바와 같이 International Metrology Systems 사의 PREMIER 를 사용하였다. PREMIER 는 브리지 이동형(Moving bridge type)으로

측정 구간(Measuring range)은 1000mm × 1000mm × 800mm 이다. 그리고, ISO 10360-2¹⁴ 에 의한 최대허용오차(Maximum permissible error, MPE_E)는 2.5 + L/300 μm 이고, 분해능(Resolution)은 0.1μm 이다.

측정 시 이동 속도는 200mm/s, 프로브의 접촉 속도는 5 mm/s, 이동 가속도는 500mm/s², 프로브의 접촉 가속도는 150mm/s² 이다. 프로브 헤드는 Renishaw 사의 PH10M 을, 프로브는 Renishaw 사의 TP20 을 장착하였다. 측정 시 온도는 20℃±1℃ 로서 항온실에서 측정을 수행하였다. 실험에 사용된 길이 바는 한국표준과학연구원에서 교정을 실시한 것으로서 짧은 길이의 길이 바는 175mm 이고, 실제 측정값은 175.0005mm 이다. 긴 길이의 길이 바는 375mm 이고, 실제 측정값은 375.0005mm 이다. 길이 바의 측정 불확도는 95% 유의수준으로 $\sqrt{(0.22)^2 + (0.8)^2} L^2 \mu m$ 이다.

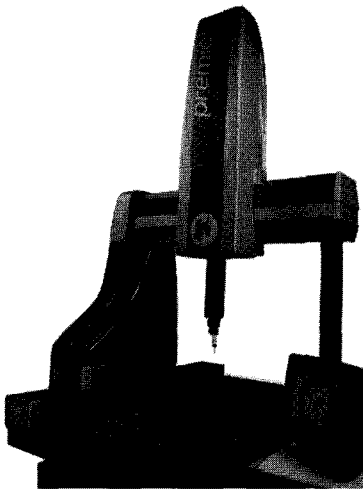


Fig. 2 PREMIER of International Metrology Systems

길이 바의 위치, 방향, 길이를 변화시키면서 측정을 수행한 결과, Fig. 3 과 같은 측정 오차값을 얻었다. 이 결과를 이용하여 파레토 차트(Pareto chart)를 그리면 Fig. 4 와 같다. 파레토 차트에서 나타나는 수직선은 유의수준을 나타내며, 수직선 오른쪽의 값들은 유의함을 의미한다. 이 결과로부터 알 수 있듯이 피측정물의 방향(E)과 Z 축 방향으로의 위치(C), Y 축 방향으로의 위치와 Z 축 방향으로의 위치의 교호작용(BC), 피측정물의 길이(D)가 유의수준 95%에 대하여 유의함을 알 수 있다. 이를 검증하기 위하여 정규확률분포 분석을 수행하였고,

그 결과를 Fig. 5 에 나타내었다. 정규확률분포도는 각 인자별로 높은 수준에서 낮은 수준을 뺀 값으로 유의하지 않은 효과는 직선 근처에 모이는 성질이 있다. 이는 수준이 변해도 그 값이 크게 변하지 않음을 의미하며, 직선과 멀리 떨어질수록 크게 유의함을 나타낸다. 정규확률분포 분석 결과, 파레토 차트의 결과와 동일한 결과를 얻었다.

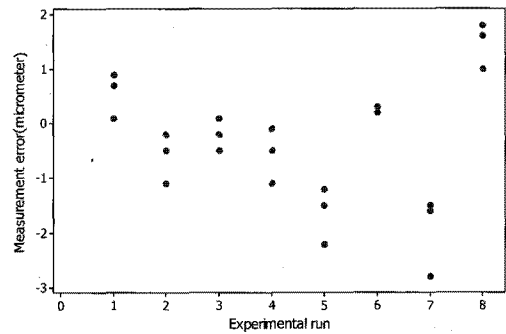


Fig. 3 Measurement error of screening experiment

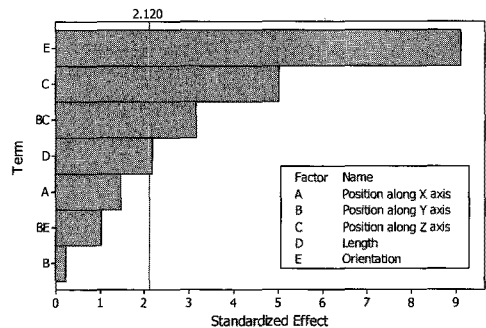


Fig. 4 Pareto chart of screening experiment

역 공학을 통한 측정 모델을 수립하기 위하여 회귀 분석을 Table 3 과 같이 수행하였다. 회귀 분석은 1 차식을 이용한 단순 회귀 분석을 수행하였고, 그 결과 식 (1)과 같은 5 가지 인자들에 대한 측정 성능의 근사 모델이 수립되었다.

$$Measurement\ error = -0.338 - 0.137A + 0.021B + 0.471C + 0.204D + 0.854E \quad (1)$$

식 (1)에 대한 결정계수(R-sq)값은 82.0%이다. 이는 전체 변동 중 회귀모델에 의해 설명되는 변

동이 82.0%임을 의미한다. 이 결과로부터 피측정물의 위치, 방향과 길이에 대한 측정 성능의 근사 모델은 충분히 유의하다고 판단할 수 있다.

Fig. 6 은 측정 성능에 대한 5 가지 인자에 대한 주 효과를 표시한 것이다. Z 축 방향으로의 위치(C)와 피측정물의 방향(E)의 기울기가 가장 급한 것으로부터 이들이 측정 성능에 가장 큰 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다.

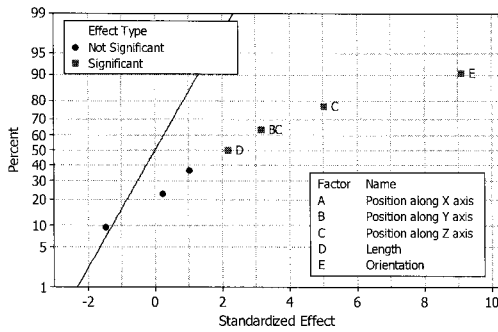


Fig. 5 Normal probability plot of screening experiment

Table 3 Regression analysis of the screening experiment

Predictor	Coeff.	SE Coeff.	T	P
Constant	-0.3375	0.1149	-2.94	0.009
A	-0.1375	0.1149	-1.20	0.247
B	0.0208	0.1149	0.18	0.858
C	0.4708	0.1149	4.10	0.001
D	0.2042	0.1149	1.78	0.092
E	0.8542	0.1149	7.44	0.000

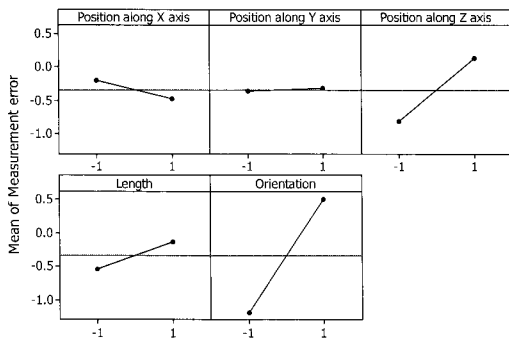


Fig. 6 Main effect plot of screening experiment

따라서 피측정물을 Z 축 위쪽에 위치시키고 측

정하는 것이 아래쪽에 위치시키고 측정하는 것에 비하여 측정 오차를 줄일 수 있음을 예상할 수 있다. 또한, 피측정물을 XYZ 축 방향으로 위치시키고 측정하는 것이 X 축 방향으로 위치시키고 측정하는 것이 비하여 측정 성능을 높일 수 있음을 알 수 있다. X 축 방향으로의 위치는 왼쪽, Y 축 방향으로의 위치는 뒤쪽, Z 축 방향으로의 위치는 위쪽, 피측정물의 길이는 긴 것, 피측정물의 방향은 XYZ 축 대각선 방향으로 놓고 측정하는 경우가 각각 반대 경우에 비하여 측정 오차가 작다는 것을 알 수 있다. 그러나, 측정 성능은 주 효과만으로 결정되는 것이 아니라 교호작용에 의한 효과에도 영향을 받는다. 따라서, 교호작용에 의한 효과를 분석하는 것은 의미가 있으며 이를 Fig. 7 에 나타내었다.

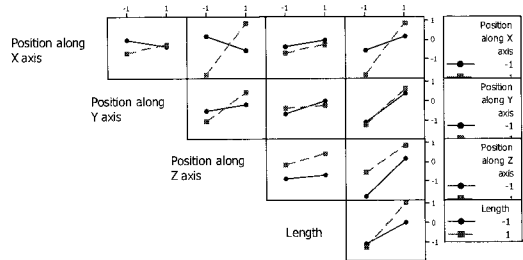


Fig. 7 Interaction effect plot of screening experiment

Fig. 7 의 결과로부터 알 수 있듯이 X 축 방향으로의 위치와 Z 축 방향으로의 위치의 교호작용(AC)과 X 축 방향으로의 위치와 피측정물의 방향의 교호작용(AE)은 두 개의 직선이 반대 방향의 기울기를 보여주고 있다. 즉, 인자의 수준이 바뀌는 경우에 반대의 영향이 발생한다고 예상할 수 있다. 교호작용 AC와 AE, BE, CE, DE 등은 그래프의 기울기가 가파르다. 이로부터 이들 교호작용들은 인자의 수준이 변경됨에 따라서 그 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 그리고, 피측정물의 방향이 포함된 교호작용들의 기울기가 대체로 급하다는 것으로부터 피측정물의 방향이 측정 오차에 큰 영향을 끼친다는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6 과 Fig. 7 의 결과로부터 본 연구에 사용된 CMM 의 경우는 피측정물을 X 축 방향으로 위치시키는 것보다 XYZ 축 방향으로 위치시키는 것이 측정 오차를 줄일 수 있음을 알 수 있다.

선행 실험의 결과를 Cube plot 으로 나타내면

Fig. 8 과 같다. 측정 오차가 가장 큰 값은 -1.96667 이며, 이는 피측정물의 위치를 X 축 오른쪽, Y 축 뒤쪽, Z 축 아래쪽에 위치시키고, 긴 길이의 길이 바를 X 방향으로 측정하는 경우에 발생한다. 또한, 측정 오차가 가장 작은 값은 -0.20000 이며, 이는 피측정물의 위치를 X 축 왼쪽, Y 축 뒤쪽, Z 축 아래쪽에 위치시키고 짧은 길이의 길이 바를 XYZ 축 방향으로 위치시키고 측정하는 경우에 발생한다.

3.3 확인 실험
3.3.1 실험 방법

선행 실험의 결과로부터 피측정물의 방향과 Z 축 방향으로의 위치, Y 축 방향으로의 위치와 Z 축 방향으로의 위치의 교호작용, 피측정물의 길이 가 유의함을 알 수 있었다.

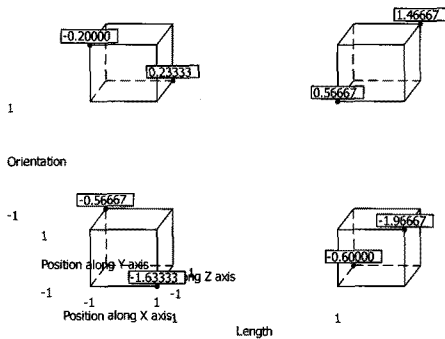


Fig. 8 Cube plot of screening experiment

유의한 요인들에 대한 보다 정확한 영향을 파악하기 위하여 확인 실험을 수행하였다. 확인 실험은 Z 축 방향으로의 위치와 피측정물의 길이, 방향에 대하여 각 수준의 모든 조합에 대한 실험을 수행하는 요인배치법(Factorial design)을 실시하였다.¹³ 이들 인자들에 대한 비선형성을 고려하기 위하여 3 수준을 고려하였다. 본 연구에 적용된 확인 실험은 3 인자와 3 수준을 가지며, 3 회 반복 실험을 수행하였다. 따라서, 총 실험 회수는 81 회이다. Table 4 에 확인 실험에 사용된 인자와 수준을 정리하였다. 그리고, 피측정물의 방향에 대한 수준을 Fig. 9 에 도시하였다. 확인 실험에 사용된 길이 바는 선행 실험과 마찬가지로 교정을 실시한 것으로서 짧은 길이 길이 바의 실제 측정값은 174.9970 mm 이고, 중간 길이의 길이 바는 375.0000mm, 긴

길이의 길이 바는 574.9990mm 이다.

Table 4 Factors and levels of confirmation experiment

Factors	Levels		
	1	2	3
A. Position from z=0	Low (290mm)	Middle (405mm)	High (520mm)
B. Length	Small	Medium	Large
C. Orientation	X dir.	XY dir.	XYZ dir.

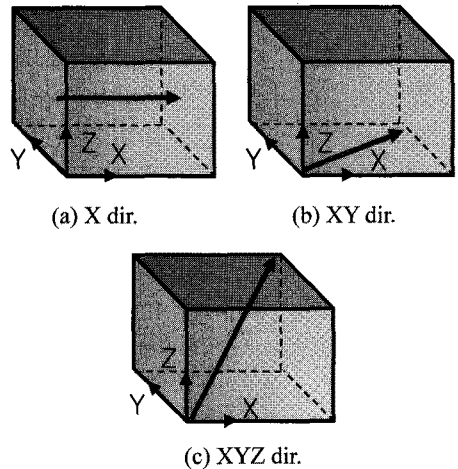


Fig. 9 Three levels for orientation of confirmation experiment

3.3.2 실험 결과 및 고찰

확인 실험은 선행 실험과 동일한 CMM 을 이용하여 동일한 방법으로 수행되었다. 실험 결과, 피측정물의 Z 축으로의 위치, 방향, 길이의 변화에 대한 측정 오차값은 Fig. 10 과 같다.

분산 분석을 수행하기 전에 Normality 가정을

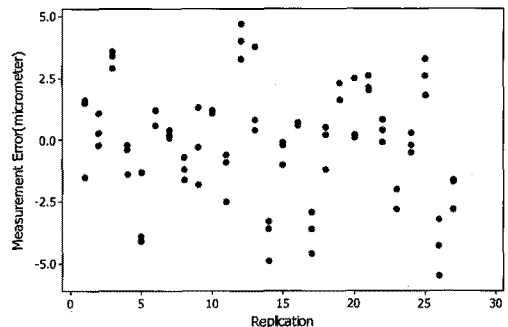


Fig. 10 Measurement error of confirmation experiment

검증하기 위하여 확인 실험의 오차 성분에 대한 Normal probability plot 을 Fig. 11 에 나타내었다. 이로부터 알 수 있듯이 모든 데이터가 직선 주변에 분포하며, 이는 오차가 정규 분포를 이룬다는 것을 의미한다. 따라서, 확인 실험은 의미 있는 실험임을 증명한다.

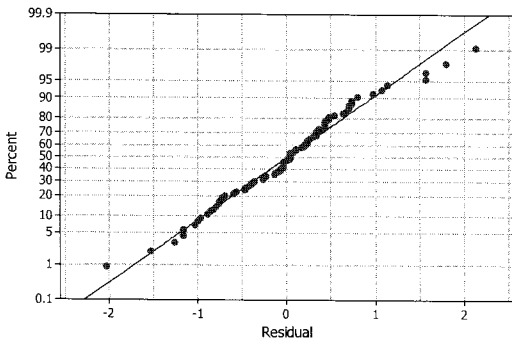


Fig. 11 Normal probability plot of confirmation experiment

Table 5 는 확인 실험에 대한 ANOVA 분석 결과를 나타낸다. Table 5 로부터 알 수 있듯이 피측정물의 길이(B), 방향(C), Z 축으로의 위치와 방향의 교호작용(AC), 피측정물의 길이와 방향의 교호작용(BC), 그리고 Z 축으로의 위치와 피측정물의 길이와 방향의 교호작용(ABC)이 유의수준 99%에 대하여 유의함을 알 수 있다.

확인 실험에 대한 주 효과와 교호작용에 대한 효과를 각각 Fig. 12 와 Fig. 13 에 도시하였다. Fig. 12 에서 알 수 있듯이 피측정물의 길이는 중간 길이 또는 긴 길이의 경우가 짧은 길이에 비하여 측정 오차값이 작다. 피측정물의 방향은 X 축 또는 XYZ 축 방향의 경우가 XY 축 방향에 비하여 상대적으로 작은 측정 오차값을 보인다. 이 결과로부터 피측정물의 측정 성능을 향상 시키기 위하여 중간 길이나 긴 길이의 피측정물을 X 축 또는 XYZ 축 방향으로 위치시키고 측정하는 것이 합리적이라는 것을 예상할 수 있다.

Fig. 13 으로부터 알 수 있듯이 교호작용은 비선형 특성이 존재한다. 즉, Z 축으로의 위치와 피측정물의 크기, 방향이 정비례하지 않고, 아래로 볼록한 형태를 보인다. Z 축으로의 위치와 피측정물의 길이의 교호작용(AB)의 경우, Z 축 아래쪽에 위치하고 피측정물의 길이가 가장 짧은 경우의 측정 오차가 가장 크다. 그리고, Z 축으로 중간에 위치하

고 피측정물의 길이가 중간 길이인 경우의 측정 오차가 가장 크다. Fig. 6 과 Fig. 12 를 비교한 결과로부터 피측정물의 방향에 대한 선행 실험과 확인 실험의 주 효과가 상이한 경향을 보임을 알 수 있다. 즉, 확인 실험의 경우 피측정물을 XY 축 방향으로 측정된 경우가 X 축, XYZ 축 방향으로 측정된 경우에 비하여 다른 경향을 보이며, 상대적으로 큰 측정 오차를 보인다.

Table 5 ANOVA results of confirmation experiment

SV	DF	MS	F ₀	F	
				95%	99%
A	2	0.467	0.58	3.18	5.06
B	2	50.428	62.46**	3.18	5.06
C	2	79.899	98.96**	3.18	5.06
AB	4	0.993	1.23	2.56	3.72
AC	4	8.469	10.49**	2.56	3.72
BC	4	9.924	12.29**	2.56	3.72
ABC	8	3.171	3.93**	2.13	2.89
Error	54	0.807			
Total	80				

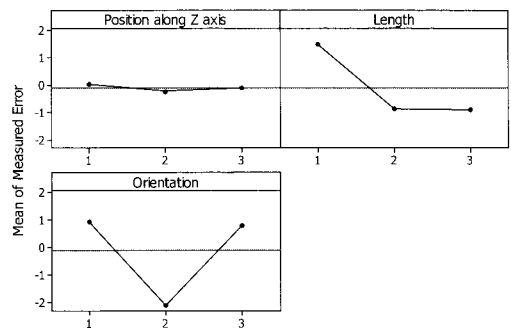


Fig. 12 Main effect plot of confirmation experiment

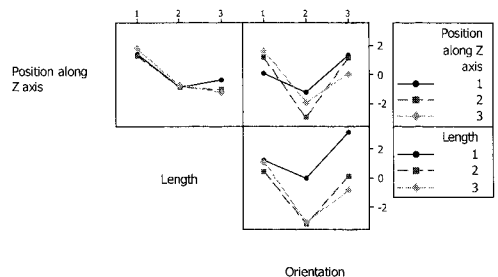


Fig. 13 Interaction effect plot of confirmation experiment

이로부터 피측정물의 방향은 측정 성능에 대하여 비선형 성질을 띠고 있음을 예상할 수 있다. 위의 결과로부터 측정 오차는 복잡한 비선형 성질을 보이며, 측정 성능을 향상 시키려면 한 두 개인자의 분석이 아닌 전체적인 분석이 필요함을 예상할 수 있다.

4. 결론

3 차원 좌표 측정기의 측정 성능에 영향을 주는 요인들을 분석하고, 그 중에서 피측정물의 변화에 대하여 실험계획법과 분산 분석, 회귀 분석 등의 통계적 기법을 적용하여 측정 오차를 평가하였다. 피측정물의 위치, 방향, 크기가 측정 성능에 어떠한 영향을 주는지를 선행 실험과 확인 실험을 통하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 선행 실험 결과, 피측정물의 방향과 Z 축 방향으로의 위치, Y 축 방향으로의 위치와 Z 축 방향으로의 위치의 교호작용, 피측정물의 길이가 측정 성능에 큰 영향을 끼친다는 것을 알 수 있었다. 그리고, 회귀 분석을 통하여 5 가지 인자들에 대한 측정 성능 근사 모델을 수립하였다.

(2) 확인 실험 결과, 피측정물의 길이, 방향, X 축으로의 위치와 방향의 교호작용, 피측정물의 길이와 방향의 교호작용, 그리고 X 축으로의 위치와 피측정물의 길이와 방향의 교호작용이 측정 성능에 큰 영향을 끼친다는 것을 알 수 있었다. 그리고, 이들 인자들은 비선형 특성이 존재한다. 따라서, CMM 측정 성능을 향상시키기 위해서 피측정물의 길이, 방향, 위치를 동시에 고려한 분석이 필요함을 예상할 수 있다.

참고문헌

1. 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.
2. Weckenmann, A., Knauer, M. and Kunzmann, H., "The influence of measurement strategy on the uncertainty of CMM-measurements," *Annals of CIRP*, Vol. 47, No. 1, pp. 451-454, 1998.
3. Feng, C. X. and Shang, X., "Computer-aided reverse engineering with CMM for digitization and LOM for duplication," *Proceedings of the 4th International Conference on Frontiers of Design and Manufacturing*, pp. 256-262, 2000.
4. Kim, E. S., Lee, J. M. and Kim, B. M., "Selection of the Optimum Seaming Condition for Spin Drum Using Statistical Method," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 25, No. 1, pp. 99-107, 2008.
5. Baek, S. H., Hong, S. H., Joo, W. S., Kim, C. K., Jeong, Y. Y. and Shin, S. W., "Optimization of Process Parameters for Mill Scale Recycling Using Taguchi Method," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 25, No. 2, pp. 88-95, 2008.
6. Hwang, Y. K., Chung, W. J. and Lee, C. M., "Experimental Study of Cutting Force and Surface Roughness Prediction in MQL Turning of Al 6061," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 25, No. 6, pp. 159-167, 2008.
7. Osawa, S., Busch, K., Franke, M. and Schwenke, H., "Multiple orientation technique for calibration of cylindrical workpieces on CMMs," *Precision Engineering*, Vol. 29, No. 1, pp. 56-64, 2005.
8. Zhang, G., Veale, R., Charlton, T., Borchardt, B. and Hocken, R., "Error compensation of coordinate measuring machines," *Annals of CIRP*, Vol. 34, No. 1, pp. 445-448, 1985.
9. Limaicm, A. and Elmaraghy, H. A., "Integrated assessibility analysis and measurement operations sequencing for CMMs," *J. Manuf. Syst.*, Vol. 19, No. 2, pp. 83-93, 2000.
10. Lee, E. S., "A Study on the Volumetric Error Equation of Coordinate Measuring Machines and their Application," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 19, No. 6, pp. 1545-1553, 1995.
11. Montgomery D. C., "Design and analysis of experiments," Wiley, pp. 228-249, 1991.
12. Emanuel, J. T. and Muruganandan, P., "Sequential experimentation using two-level fractional factorials," *Quality Engineering*, Vol. 13, No. 3, pp. 335-346, 2000.
13. Park, S. H., "Modern design of experiments," *Minyongsa*, pp. 121-140, 2001.
14. International Organization for Standardization, "ISO 10360, Coordinate metrology, part 2," pp. 1-4, 1994.