

테오드라이트 시스템의 측정 정확도에 대한 연구(II) -기준자 측정 높이에 따른 측정 정확도

윤용식*, 이동주⁺, 정종길⁺⁺

(논문접수일 2004. 2. 25, 심사완료일 2004. 4. 13.)

A Study on Measurement Accuracy of Theodolite System(II) -A Measurement Accuracy for a Height of Scale Bar

Yong-Sik Yoon*, Dong-Ju Lee⁺, Jong-Gill Cheong⁺⁺

Abstract

A measurement accuracy of theodolite system may be affected by a measurement environment, a measurement distance change and so on. This study was performed for measuring an accuracy when the height of scale bar is changed 0.05m, 0.5m, 1m and 1.5m under the distance 3m between two theodolites, the distance 4m from the theodolite system to scale bar and the distance 5m from the theodolite system to the horizontal target bar. And we could know that the best height is 0.05m and 1m.

Key Words : Theodolite(테오드라이트), Scale Bar(기준자), Target Bar(타겟 바), Measurement Error(측정오차), Standard Deviation(표준 편차), Confidence(신뢰구간)

1. 서론

현재 1.5m³ 이하의 정밀 좌표 측정을 위한 장비는 CMM 등 다양하고 많은 제품이 개발되어 사용되고 있으나, 1.5m³~10m³ 혹은 이 이상의 크기를 갖는 측정 대상물에 대하여 0.5mm 이하의 정밀 측정을 위한 장비는 디지털 테오드라이트 측정시스템(digital theodolite measurement system),

레이저 추적기(laser tracker), 레이저 스캐너(laser scanner) 및 사진 측정기(photogrammetry system) 등으로 매우 제한적이다⁽¹⁾. 이들 장비는 광학과 전자 장치가 결합되어 있어 온도, 습도 및 기타 주변의 여러 가지 측정 환경에 따라 자체 성능에 따른 측정 정확도를 얻어내기 힘들다. 또한 측정 대상물의 초정밀화 및 고도화 등에 따라 요구되는 측정 정확도는 이들 측정 장비의 측정 정확도를 넘어서고 있는

* 한국항공우주연구원 우주시험그룹 (ysyoon@kari.re.kr)
주소: 305-333 대전광역시 유성구 어은동 45번지

+ 충남대학교 기계공학과

++ 대전기능대학 메카트로닉스과

실정이다. 이에 따라 상기 측정 장비에 대한 정확도를 제고하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 스위스의 Markendorf는 레이저 추적기의 안정된 측정을 위하여 측정 장비의 회전 축을 개선하기 위한 연구를 수행하였다⁽²⁾. 또한, 측정 장비의 측정 환경, 즉 온도 및 상대 습도 등과 측정 절차에 따른 불확도 및 측정 정확도에 대한 기초 연구로 데오드라이트 시스템의 경우에는 Yoon과 Lee⁽³⁾에 의해 수행되고 있고, 레이저 추적기의 경우에는 Dold와 Markendorf⁽⁴⁾에 의하여 수행되고 있다.

데오드라이트 시스템의 경우 측정 절차 및 측정 형상에 따라 측정 정확도에 많은 영향이 발생할 수 있다. 이러한 요인은 두 대의 데오드라이트 사이의 거리, 기준자의 높이, 데오드라이트 시스템과 기준자간의 거리 그리고 데오드라이트 시스템과 측정 타켓의 거리 등이다. 특히, 데오드라이트 시스템의 측정에 있어서 측정 대상물의 다양한 형상으로 인하여 기준 길이를 설정하는 기준자의 높이를 결정하는데 많은 어려움이 있다.

이에 따라 본 연구에서는 Yoon과 Lee에 의하여 수행된 결과에 따라⁽⁵⁾ 두 대의 데오드라이트 사이의 거리를 3m로 하고 기준자의 높이를 각각 0.05m, 0.5m, 1m 그리고 1.5m로 하여 측정 오차와 측정 정확도를 고찰하고 최적의 기준자 높이를 구하고자 하였다.

2. 데오드라이트 시스템의 관련 이론

2.1 데오드라이트 시스템의 측정 절차

먼저 2대 이상의 데오드라이트를 측정하고자하는 3차원 공간의 점들이 모두 보이는 곳에 위치시키고 데이터 처리 시스템에 RS-232 선으로 연결한다. 그리고 Fig. 1의 절차에 따라 두 데오드라이트를 마주 보면서 대물 렌즈부에 설치되어 있는 십자 선을 맞추어 서로의 기준을 확인하는 시준(collimation) 작업을 한다. 다음에 기준 자에 부착된 두 개 이상의 타켓을 데오드라이트로 동시에 측정하여 표준 길이 설정을 완료한 후 Fig. 2와 같이 타켓 번호 순서대로 데오드라이트를 측정 점에 맞추어 측정을 한다. 이때 데오드라이트의 시준 선(line of sight)이 3차원 공간의 측정 점을 교차하면서 삼각형이 형성된다. 이 측정 점은 수평 각 α_1 과 α_2 로, 수직 각 β_1 과 β_2 로 정의되고 이 값들은 데이터 처리시스템의 오리엔테이션(orientation) 기능을 통하여 데오드라이트 1을 기준으로 하는 3차원 좌표 값들로 변환된다⁽⁶⁾.

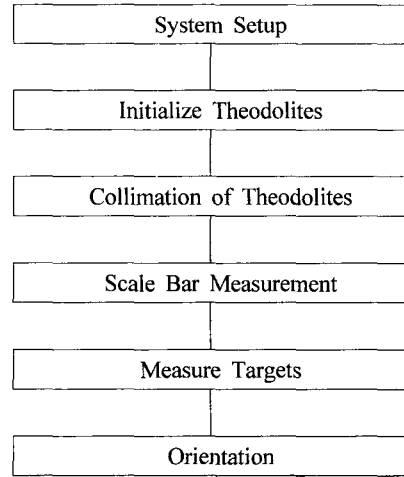


Fig. 1 Measurement procedure of theodolite system

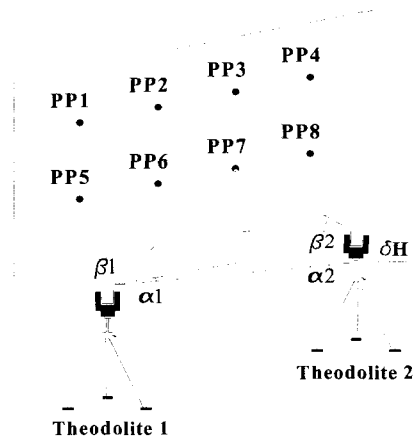


Fig. 2 Measurement process of target points

2.2 측정 각도의 좌표 변환

2.2.1 측정각의 좌표 변환

1대의 데오드라이트가 Fig. 3에 나타난 바와 같이 하나의 타켓에 맞추어졌을 때 시준선 V에 대한 수평각 AH와 수직각 AV는 동일 좌표계의 단위 벡터로 다음 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 i &= \cos(AH) \sin(AV) \\
 j &= \sin(-AH) \sin(AV) \\
 k &= \cos(AV)
 \end{aligned} \tag{1}$$

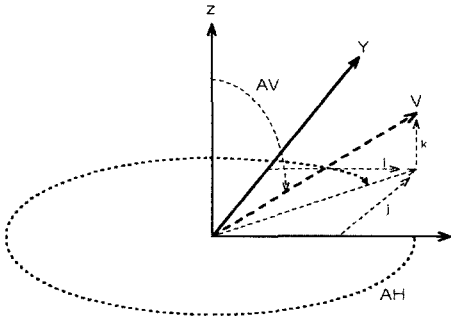


Fig. 3 Unit vector for the line of sight

이 방정식을 이용하여 두 선의 방향과 두 선의 각 원점 좌표가 동일좌표계에 나타난 경우에 각 선이 교차하는 점을 계산한다.

테오드라이트 T로부터 임의의 점 P까지의 시준선 V를 따라 이동하는 단위 벡터 v 는 축척(scaling) s 의 크기만큼 시준선 V와 동일선상(collinear)에 있다고 할 수 있고 임의의 좌표계 $[X \ Y \ Z]$ 를 사용하여 다음 식(2)로 구한다.

$$\begin{bmatrix} X_v \\ Y_v \\ Z_v \end{bmatrix} = s \begin{bmatrix} X_v \\ Y_v \\ Z_v \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (1)에서 구한 단위 벡터 $[i \ j \ k]$ 는 3축의 회전 운동 행렬 M에 대하여 다음 식 (3)과 같이 단위벡터 v 에 대한 좌표계로 표시한다.

$$\begin{bmatrix} X_v \\ Y_v \\ Z_v \end{bmatrix} = M^{-1} \begin{bmatrix} i \\ j \\ k \end{bmatrix} \quad (3)$$

이때 임의의 점 P의 좌표와 테오드라이트 T의 위치로 벡터 V를 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X_P - X_T \\ Y_P - Y_T \\ Z_P - Y_T \end{bmatrix} = sM^{-1} \begin{bmatrix} i \\ j \\ k \end{bmatrix} \quad (4)$$

식 (4)를 통하여 테오드라이트의 매개변수가 결정되면 미지수는 임의의 점 P의 좌표와 축척 s 가 된다. 식 (4)를 이용하여 식 (2)와 식 (3)을 나누면 축척 s 는 축척을 통하여 2개의 독립 방정식을 만들어져 소거된다.

그러나, 한 대의 테오드라이트를 사용하여 2개의 방정식

을 만들어 3개의 미지수를 결정하는 것은 불가능하므로 2대의 테오드라이트를 이용하여 한 점을 측정하는 경우 그 점에 대한 3개의 좌표는 상기의 방법에 의하여 4개의 방정식을 만들어 구할 수 있다. 이때 최적의 교차 점 좌표를 구하기 위하여 최소 자승법을 사용한다⁽⁷⁻⁸⁾.

2.3 측정 분석 관련 이론

2.3.1 측정 범위 및 산술 평균

측정 범위(measurement range)는 측정 결과의 최대 값과 최소 값의 차이를 나타낸다. 즉 측정 범위가 큰 것은 측정값에 대하여 그 만큼 큰 분산을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 측정 범위를 측정의 안정도 즉 측정 오차 0의 값을 기준으로 한 측정의 안정성을 고찰하는데 활용하였다.

산술 평균(mean)은 측정값의 집합에 대한 산술 평균 값으로 아래 식 (5)와 같이 일반적인 평균을 의미한다. 본 연구에서 산술 평균은 측정 오차 0의 값을 기준으로 각 측정 형상별 측정 오차의 차이 즉, 측정 오차 0 값을 기준으로 한 값에 대한 측정 정확성 및 안정성을 고찰하는데 사용하였다.

$$x' = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad (5)$$

여기서 x' 은 평균, n 은 표본 개수를 의미한다.

2.3.2 측정 정확도

측정 정확도(confidence)는 다음 식 (6)과 같이 구할 수 있다⁽⁹⁾.

$$\delta = \pm \alpha \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

여기서, δ 는 측정 정확도로 표시할 수 있는 신뢰 구간이고, α 는 신뢰도 95%인 경우 0.05의 상수이고, σ 는 표본 표준 편차, n 은 표본의 크기로 데이터의 개수이다.

3. 측정 및 결과

3.1 측정 기준

본 연구를 위한 기준 환경은 온도 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 및 상대 습도 $50 \pm 15\text{RH}\%$ 를 기준으로 하였다. 테오드라이트는 자체 검정 절차를 통하여 수평, 수직 및 편심도 등을 측정 전에 점

검하였고 지면에서 망원경부까지를 1.5m 높이로 하였다. 그리고, 데오드라이트의 설치 위치는 교정이 완료된 데오드라이트에 의하여 정확한 거리를 측정된 후 바닥 면에 위치 확인용 타켓을 설치하였다. 이 타켓을 이용하여 데오드라이트 자체에 내장된 위치 확인용 렌즈를 통하여 타켓의 중심에 맞추어 ±0.5mm의 오차율로 설치하였다.

본 측정에서 사용된 기준 자는 20℃에서 $1 \sim 2(10^{-6}K^{-1})$ 의 열 팽창율을 가진 인바(invar)의 재질로 제작된 것으로 한국표준과학연구원의 교정을 통하여 확장 불확도 ±0.01mm의 교정 검사를 완료한 후 사용하였다.

측정용 타켓은 인바 재질로 된 3m 길이의 타켓 바(target bar) 위에 0.01mm의 중심 지름을 가진 24개의 타켓을 임의로 부착하였다. 이들 타켓 간 길이는 한국표준과학연구원의 교정을 통하여 1번 점을 기준으로 24번 점까지 각 점에 대한 상대 길이를 ±0.01mm의 정확도로 측정된 결과를 기준으로 하였다.

그리고 측정 중 자체의 진동이나 외부로부터의 진동에 따른 측정 외란 등을 감시하기 위하여 진동 센서를 바닥에 설치하여 측정 중 수시로 감시하였고, 측정 완료 후 진동치가 많은 경우 재 측정하였다.

또한, 측정 중 기준자와 타켓 바가 설치되는 측정 위치는 데오드라이트의 위치 확인용 타켓 설치와 같이 데오드라이트에 의하여 정확한 거리를 측정된 후 측정 점을 표시하였다.

3.2 측정

기준자 높이에 따른 측정 정확도 연구를 위하여 Fig. 4와 같이 2대의 데오드라이트 사이의 거리를 3m, 데오드라이트 시스템과 기준 자 사이의 거리를 4m, 데오드라이트 시스템과 타켓 바 사이의 거리를 5m에 위치시켰다. 이때 기준자의 높이가 각각 0.05m, 0.5m, 1m 그리고 1.5m인 경우 타켓 바의 높이를 0.05m, 0.5m, 1m 그리고 1.5m로 변화시키면서 각 측정 형상에 따른 측정을 수행하였다. 본 측정에서 각 항목 당 4회의 반복 측정을 수행하였고, 측정 오차 결과에 있어서 많은 차이가 나는 항목은 재 측정하였다.

본 논문에서는 측정 형상을 간단히 표시하기 위하여 2대의 데오드라이트 사이의 거리를 'T거리(m)'로 나타내었다. 그리고 데오드라이트 시스템과 기준 자 사이의 측정 거리는 'TS거리(m)'로, 기준자의 높이는 'SH높이(m)'로, 타켓 바의 높이는 'PH높이(m)'로, 데오드라이트 시스템과 타켓 바의 거리는 'TP거리(m)'로 표시하였다. 이때, 타켓 바는 Fig. 5와 같이 수평으로 하였고, 위치는 2대의 데오드라이트 중간

점을 기준으로 타켓 바의 중간점을 일치시켜 측정하였다.

3.3 측정 결과

상기의 측정 조건에 따라 데오드라이트 시스템을 설치하여 기준자 높이에 따른 타켓의 측정 데이터를 Fig. 6~Fig. 9에, 측정 정밀도와 측정 정확도는 Table 1~Table 4에 나타내었다. 이때 각 Fig.의 횡축은 타켓 바의 측정 점을 나타내고 종축은 측정 오차를 나타낸다. 여기에서 측정 오차는, 검정된 타켓 바의 1번 점을 기준으로, 각 점과의 길이에서 본 시험에서 측정된 길이로 뺀 값을 의미한다.

각 측정 점에 따른 측정 오차의 차이는 두 대의 데오드라이트를 사용하여 측정함으로써 발생하는 데오드라이트 각각의 계기 오차와 두 측정자 간의 측정 점 시준 차이에 의한 개인오차에 기인하는 것으로 판단되며, 이러한 오차를 포함한 측정 오차를 본 연구의 측정오차로 하였다.

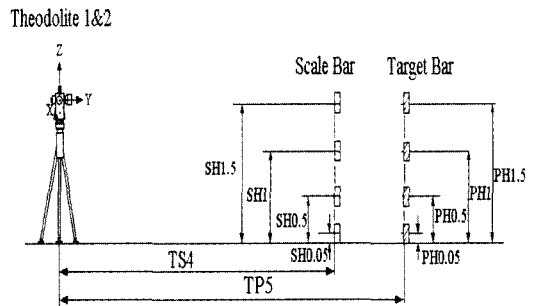


Fig. 4 Measurement scheme for height difference of scale bar on T3, TS4 and TP5



Fig. 5 Measurement scheme of horizontal target bar

3.3.1 SH0.05에서의 측정 결과

기준 자 높이를 0.05m 즉 SH0.05에서 기준 길이를 설정하고 타켓 바 높이를 0.05m, 0.5m, 1m 및 1.5m 높이로 변화시키면서 측정한 결과를 Fig. 6 및 Table 1에 나타내었다. PH0.05와 PH0.5인 경우 측정 오차 범위가 0.107~0.143(mm), 측정 오차 평균값은 0.041~0.046(mm) 그리고 측정 정확도도 $\pm 0.017\text{mm}$ 와 $\pm 0.012\text{mm}$ 의 측정 결과를 나타내고 있다. PH1 및 PH1.5에서는 측정 오차 범위가 0.061~0.064(mm)로 비교적 안정되고 측정 오차 평균도 0.069~0.070(mm)으로 비교적 측정 오차의 0 값에 근접하는 것을 알 수 있다. 특히 PH1.5에서의 측정 정확도는 $\pm 0.007\text{mm}$ 로 양호한 측정 결과를 얻었다.

3.3.2 SH0.5에서의 측정 결과

기준 자 높이를 0.5m 즉 SH0.5에서 기준 길이를 설정한 경우 Fig. 7 및 Table 2에서와 같이 타켓 바의 높이가 0.05m인 PH0.05에서 측정 오차 범위 0.067mm와 측정 정확도 $\pm 0.008\text{mm}$ 로 안정된 값을 나타내지만 측정 오차 평균값이 0.115mm로 측정 오차 0의 값의 값과 차이가 나는 것을 알 수 있다. PH0.5인 경우에는 측정 오차 범위가 0.046mm, 측

정 오차 평균값이 0.078mm이고 측정 정확도도 $\pm 0.005\text{mm}$ 로 비교적 양호한 측정 결과를 얻었다.

그러나 PH1 및 PH1.5인 경우 측정 오차 범위가 0.209mm, 0.244mm로 다른 측정 조건에 비하여 크고, 측정 오차의 평균값도 0.187mm, 0.244mm로 측정 오차 0의 값과 차이를 나타내고 있고 이에 따라 측정 정확도도 $\pm 0.027\text{mm}$ 와 $\pm 0.032\text{mm}$ 로 다른 측정 결과에 비하여 좋지 않음을 알 수 있었다. 여기서 기준자 높이를 0.5m로 한 경우 측정용 타켓의 높이가 1m, 1.5m에서 측정 정확도가 좋지 않은 것은 데오드라이트 자체의 계기 오차에 기인한 것으로 판단된다.

3.3.3 SH1에서의 측정 결과

기준 자 높이를 1m 즉 SH1로 하여 기준 길이를 설정한 상태에서 타켓 바의 높이 변화에 따른 측정 오차 결과를 Fig. 8과 Table 3에 나타내었다. PH0.05, PH0.5 및 PH1에서 측정한 경우 측정 오차 범위가 0.119~0.150(mm)로 측정 안정성이 불안하고 측정 정확도도 PH0.05에서 $\pm 0.019\text{mm}$, PH1에서 $\pm 0.017\text{mm}$ 로 나타나고 있다. 그러나 측정 오차 평균이 PH0.05에서 0.001mm, PH1에서 -0.001mm로 측정 오차 0의 값에 근접하고 있다. PH1.5에서는 측정

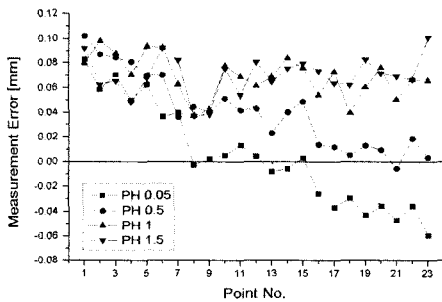


Fig. 6 Measurement error for height difference of target bar on SH0.05

Table 1 Measurement accuracy for height difference of target bar on SH0.05(unit : mm)

Measurement Configuration	Range	Mean	Measurement Accuracy	
SH0.05	PH0.05	0.143	0.046	± 0.017
	PH0.5	0.107	0.041	± 0.012
	PH1	0.061	0.069	± 0.007
	PH1.5	0.064	0.070	± 0.007

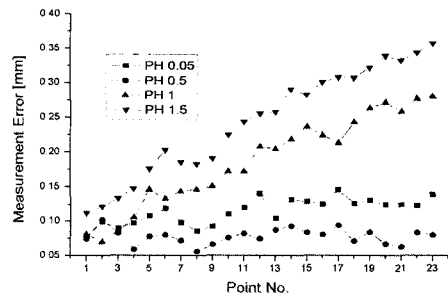


Fig. 7 Measurement error for height difference of target bar on SH0.5

Table 2 Measurement accuracy for height difference of target bar on SH0.5(unit : mm)

Measurement Configuration	Range	Mean	Measurement Accuracy	
SH0.05	PH0.05	0.067	0.115	± 0.008
	PH0.5	0.046	0.078	± 0.005
	PH1	0.209	0.187	± 0.027
	PH1.5	0.244	0.244	± 0.032

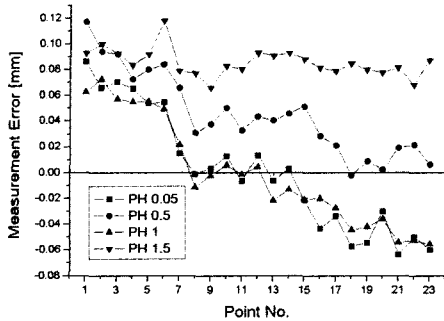


Fig. 8 Measurement error for height difference of target bar on SH1

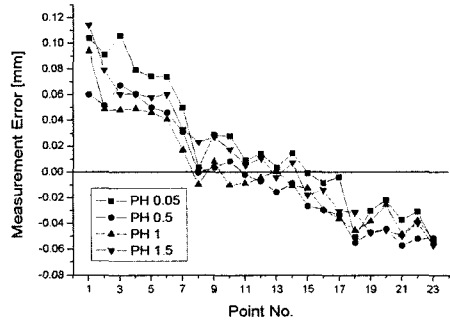


Fig. 9 Measurement error for height difference of target bar on SH1.5

Table 3 Measurement accuracy for height difference of target bar on SH1(unit : mm)

Measurement Configuration		Range	Mean	Measurement Accuracy
SH1	PH0.05	0.150	0.001	±0.019
	PH0.5	0.119	0.046	±0.013
	PH1	0.128	-0.001	±0.017
	PH1.5	0.052	0.086	±0.004

Table 4 Measurement accuracy for height difference of target bar on SH1.5(unit : mm)

Measurement Configuration		Range	Mean	Measurement Accuracy
SH1.5	PH0.05	0.161	0.019	±0.020
	PH0.5	0.125	-0.002	±0.017
	PH1	0.146	-0.001	±0.016
	PH1.5	0.171	0.010	±0.019

오차 범위가 0.052mm로 측정 안정성이 좋지만 측정평균은 0.086mm로 오차 평균 0의 값과 차이를 나타내고 있다. 그러나 측정 정확도가 ± 0.004mm로 다른 측정 형상에 비하여 양호한 결과를 나타내고 있다.

3.3.4 SH1.5에서의 측정 결과

기준 자 높이를 1.5m 즉 SH1.5로 하여 기준 길이를 설정하고 타켓 바의 높이 변화에 따른 측정 오차 결과가 Fig. 9와 Table 4에 나타나 있다. 이 경우에 전체적인 PH 형상 변화에 따른 측정 오차 범위는 0.125~0.171(mm)로 다른 측정 형상에 비하여 측정 안정성이 좋지 않음을 알 수 있다. 여기에서 PH0.5와 PH1에서 측정 평균이 -0.002~-0.001(mm)로 측정 오차 0 값에 근접해 있으나 측정 오차 범위가 크므로 측정 정확도가 ±0.017mm와 ±0.016mm로 비교적 좋지 않음을 알 수 있다. 이러한 측정 결과로부터 타켓 보다 높은 위치에서 기준자의 길이 기준 설정을 하는 경우에 측정 정확도가 감소하는 것을 알 수 있다.

4. 결론

비접촉식 3차원 정밀 측정 장비인 데오드라이트 시스템의 측정 정확도에 대한 기초 연구로 본 연구가 수행되었다. 데오드라이트 시스템의 정밀 측정에 있어서 측정 정확도에 영향을 미칠 수 있는 요인 중 하나인 기준자 높이 변화에 따른 측정 정확도에 대한 연구를 수행하였고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 기준 자를 가능한 바다 면(SH0.05)에 위치시키고 측정용 타켓의 높이를 약 1m(PH1), 1.5m(PH1.5)로 하여 측정하는 경우 안정적이고 높은 측정 정확도를 얻을 수 있다.
- (2) 기준 자 높이를 0.5m(SH0.5)에 위치시키고 측정용 타켓의 높이를 동일하게 하여 측정하는 경우(PH0.5) 비교적 안정적이고 양호한 측정 정확도를 얻을 수 있다.
- (3) 기준 자 높이를 1m(SH1)로 하고 측정용 타켓을 1.5m(PH1.5) 높이에서 측정하는 경우에도 비교적 안정적이고 양호한 측정 정확도를 얻을 수 있음을 있다.

- (4) 그러나 기준 자 높이를 측정용 타겟보다 높게 하여 기준 길이를 설정하는 경우 즉 SH1에서 PH0.05 및 PH0.5의 측정 형상이나 SH1.5에서 PH0.05의 측정 형상과 같은 경우에는 측정 안정성 및 측정 정확도가 다른 측정 형상에 비하여 좋지 않음을 알 수 있다.
- (5) 이상과 같은 측정 결과에 따라 측정 자의 높이를 0.05 m ~ 1m의 높이에서 기준 길이를 설정하여 타겟을 측정하는 경우 측정 안정성과 측정 정확도를 높일 수 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) Yoon, Y. S., and Lee, D. J., 2002, "Measurement Technology and Trend of Non-contacted 3-Dimension Precision Coordinate Measurement of Middle · Large Structure," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 11, No. 1, pp. 7 ~ 13.
- (2) Markendorf, A., 1999, "Simpler and Faster Alignment Procedures for Laser Tracker," Annual Conference of Coordination Measurement System Committee.
- (3) Yoon, Y. S., and Lee, D. J., 2003, "A Study on Measurement Error Factors of Theodolite System," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 12, No. 4, pp. 36 ~ 42.
- (4) Dold, J., and Markendorf, M., 1998, "Expression of Measurement Uncertainty for Laser Tracker based on Distance Measurement," Annual Conference of Coordination Measurement System Committee.
- (5) Yoon, Y. S., and Lee, D. J., 2004, "A Study on Measurement Accuracy of Theodolite System(I)-A Measurement Accuracy according to a Theodolite Collimation Distance," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 13, No. 2, pp. 61 ~ 68.
- (6) Yoon, Y. S., Lee, J. Y., Cho, C. R., and Lee, S. S., 2001, "3-Dimensional Precision Measurement of Spacecraft Structure Test Model," Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Spring Conference 2001, pp. 131 ~ 134.
- (7) Sandwith, Scott C., 1993, *Gageless Tool Building with Computer-Aided Theodolites*, Leica Practice Report, Leica co. Ltd.
- (8) Guillon, F., 1999, "Triangulation and Autocollimation Measurement System," *ESIC*, pp. 68 ~ 71.
- (9) Jung, R. S., 1998, *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, KRISS, pp. 77 ~ 88.