

# 테오도라이트 시스템의 측정 정확도에 대한 연구(I) - 테오도라이트 시준 거리에 따른 측정 정확도

윤용식\*, 이동주<sup>+</sup>

(논문접수일 2003. 7. 2, 심사완료일 2003. 11. 6)

## A Study on Measurement Accuracy of Theodolite System(I) - A Measurement Accuracy According to a Theodolite Collimation Distance

Yong-Sik Yoon\*, Dong-Ju Lee<sup>+</sup>

### Abstract

A non-contact precision measurement system is a theodolite system, a laser tracker and a photogrammetry system, etc. Nowadays, the system reaches to a limit of measurement accuracy required from industrial product of middle and large scale. The one of the solutions for this problem is to maximize the accuracy of the existing measurement system. According to it, we performed the study for a measurement accuracy of theodolite system when the distance between two theodolites is changed 1m to 5m. We could know that the changes of distance affect the measurement accuracy of theodolite system and that the maximum measurement accuracy is  $\pm 0.02$  mm on theodolite distance 3~4 m.

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

## 1. 서론

3차원 정밀 측정 시스템에는 디지털 테오도라이트 시스템(Digital theodolite system), 레이저 추적기(Laser tracker) 및 사진 측정기(Photogrammetry system) 등 주로 광학 응용기기가 있다. 광학기술에 의한 3차원 좌표 측정 기술은

1990년대에 전자기술과의 결합으로 측정 정확도가 더욱 높아지게 되었다. 이들 측정 시스템은 항공기, 인공위성, 통신용 레이더 등 복잡한 형상의 중·대형 시스템의 조립 및 제작 등에 제한되어 사용되었으나 현재 그 활용 범위를 다양화하고 있다. 현재 사용되고 있는 디지털 테오도라이트의 경우 0~100 m에서  $\pm 0.5$  mm의 측정 정확도를

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

+ 충남대학교 기계공학과

나타내고 있고, 사진 측정 시스템은 약 9 m의 거리에서  $\pm 0.2$  mm, 레이저 추적기의 경우 9 m에서  $\pm 0.1$  mm의 측정 정확도를 나타내고 있다.

데오도라이트 시스템은 인공위성 및 항공기의 제작·조립에 요구되는 최대 측정 정확도  $\pm 0.5$  mm를 만족시키는데 사용되고 있다. 또한, 사진 측정기는 통신위성용 안테나를  $-160^{\circ}\text{C} \sim +175^{\circ}\text{C}$  범위의 열 변형을 측정 시 측정 요구치인  $\pm 0.2$  mm 까지 측정하는데 사용되고 있다. 그리고 레이저 추적기는 행성의 핵폭발 등을 모사하기 위한 시험장치인 미국 National Ignition Facility의 건설시 192개의 레이저 광선을 400 m 떨어진 지름 0.5 mm의 표적에 맞추기 위하여 설비 및 건물에  $\pm 0.25$  mm 이내로 정렬 시키는데 사용되고 있다. 이러한 중·대형 장비 및 시설 등에 대한 정밀 측정 요구 정확도는 앞으로도 계속 높아질 것이고 이에 따른 측정 장비도 계속 개발될 것이다<sup>(1,2)</sup>.

그러나 현재까지 개발된 비접촉식 3차원 정밀 측정 장비보다 더 정확한 측정 요구를 하는 경우 이를 만족시키기 위한 새로운 측정 장비를 개발해야하는 등 많은 어려움이 산재해 있다. 이러한 어려움을 해소하기 위한 방법의 하나로 현재 사용되는 측정 장비가 대부분 광학 센서를 사용하고 있고, 측정 범위가 큰 경우의 측정 정확도만이 사용자에게 제시되므로 측정 거리에 따른 측정 정확도를 극대화하는 것도 한 가지 방법이 될 수 있다<sup>(3)</sup>. 즉 데오도라이트 시스템의 경우 데오도라이트 사이의 거리와 데오도라이트 시스템과 스케일 바(scale bar)사이의 거리 그리고 데오도라이트와 타겟 간의 거리 요인 등이 측정 정확도에 큰 영향이 있을 것으로 판단된다.

본 논문에서는 상기의 요인들 중, 데오도라이트 시스템의 필수 측정 과정 중 하나인 2 대의 데오도라이트 사이의 시준(collimation) 거리 변화에 따른 측정 정확도에 대한 연구를 수행하였다.

본 연구를 위하여 두 대의 데오도라이트 사이의 거리를 1 ~ 5 m까지 1 m 간격으로 하여 측정을 수행하였다. 이때 데오도라이트 시스템과 기준자 간의 거리를 2 m, 3 m, 6 m로 하고 데오도라이트 시스템과 타겟까지의 거리를 3 m를 기준으로 하여 측정하였다. 특히 3 m 길이의 타겟 바를 수평과 수직으로 하여 측정을 수행함으로써 최대 측정 정확도를 얻을 수 있는 최적의 데오도라이트 사이의 시준 거리를 구하고자 하였다.

## 2. 데오도라이트 시스템의 관계 이론

### 2.1 데오도라이트 시스템의 측정 절차

데오도라이트 시스템은 2대 이상의 데오도라이트를 데이터 처리시스템에 RS-232 선으로 연결하여 측정을 수행하여야 한다. 먼저 2대 이상의 데오도라이트를 측정하고자하는 3차원 공간의 점들이 모두 보이는 곳에 위치시킨다. 다음에 Fig. 1과 같이 두 데오도라이트를 마주 보면서 대물렌즈부에 설치되어 있는 십자 선을 맞추어 서로의 기준을 확인한다. 이를 시준이라고 한다. 다음에 기준 자에 부착된 두 개 이상의 타겟을 Fig. 2와 같이 데오도라이트로 동시에 측정하여 표준 길이를 설정한다. 표준 길이 설정이 완료되면, Fig. 3과 같이 타겟 번호 순서대로 데오도라이트를 측정점에 맞추어 측정을 한다. 이때 데오도라이트의 시준 선(line of sight)이 3차원 공간의 측정 점을 교차하면서 삼각

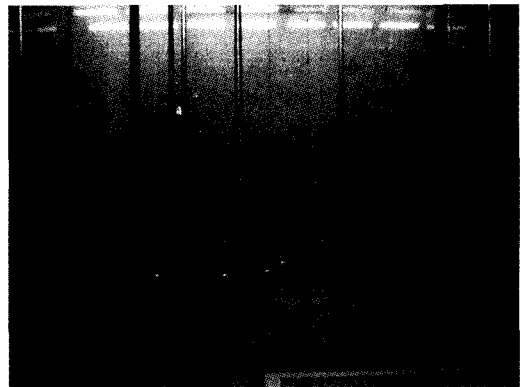


Fig. 1 Collimation Process



Fig. 2 A Process of Scale Bar Measurement

형이 형성된다. 이 측정 점은 수평 각  $\alpha_1$ 과  $\alpha_2$ 로, 수직 각  $\beta_1$ 과  $\beta_2$ 로 정의되고 이 값들은 데이터 처리시스템의 오리엔테이션(orientation) 기능을 통하여 데오도라이트 1을 기준으로 하는 3차원 좌표 값들로 변환된다<sup>(4,5)</sup>.

## 2.2 측정 각도의 좌표 변환

### 2.2.1 시준선

1 대의 데오도라이트가 Fig. 4에 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.

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

이 방정식을 이용하여 두 선의 방향과 두 선의 각 원점

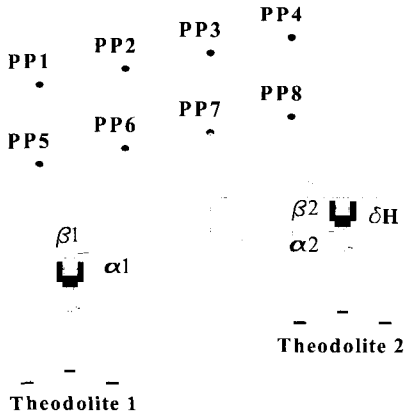


Fig. 3 Measurement Process of Target Points

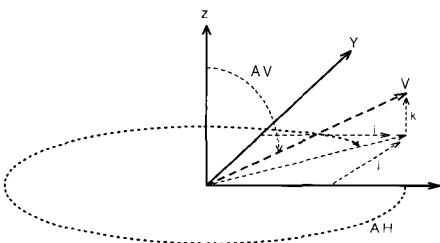


Fig. 4 Unit Vector for the Line of Sight

좌표가 동일좌표계에 나타난 경우에 각 선이 교차하는 점을 계산할 수 있게 된다.

또한, 데오도라이트의 방향은 3개의 축을 따라 병진운동(translation) 및 회전 운동(rotation)하는 6개의 변수 향으로 나타낼 수 있다.

### 2.2.2 측정각의 좌표 변환

데오도라이트 T로부터 임의의 점 P까지의 시준선 V를 따라 이동하는 단위 벡터 v는 축척(scaling) s의 크기만큼 시준선 V와 동일선상(collinear)에 있다고 할 수 있다. 그리고 이것은 임의의 좌표계 [X Y Z]를 사용하여 다음 식 (2)로 표현할 수 있다.

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

2.2.1절의 식 (1)에서 구한 단위 벡터 [i j k]는 3축의 회전 운동 행렬 M과 관련하여 다음 식 (3)과 같이 단위벡터 v에 대한 좌표계로 표시될 수 있다.

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

이때 벡터 V가 임의의 점 P의 좌표와 데오도라이트 T의 위치로 표현된다면, 다음 식 (4)과 같이 나타낼 수 있다.

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

식 (4)를 통하여 데오도라이트의 매개변수가 결정되면 미지수는 임의의 점 P의 좌표와 축척 s가 된다. 식 (4)를 이용하여 식 (2)와 식 (3)을 나누면 축척 s는 측정을 통하여 2개의 독립 방정식을 만들어 소거될 수 있다.

그러나, 한 대의 데오도라이트를 사용하여 2개의 방정식을 만들어 3개의 미지수를 결정하는 것은 불가능하므로 2대의 데오도라이트를 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<sup>(6)</sup>.

### 3. 측정 정밀도와 정확도

#### 3.1 측정 정밀도

측정 정밀도는 측정값의 산포(dispersion)의 정도로 표시할 수 있다. 측정값의 정밀도는 식 (5)와 같이 표본 표준 편차(standard deviation)로 나타낼 수 있다.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

여기서  $s$ 는 표본 표준 편차이고,  $n$ 은 표본 개수,  $x_i$ 는 측정값이다. 이때,  $\bar{x}$ 은 표본 평균(sample mean)으로 일반적으로 참값이나 모평균(population mean)을 모르는 경우 측정값  $x_i$ 의 평균값으로 사용되는데 본 논문에서는 한국표준과학연구원의 표준 측정기로  $\pm 0.01$  mm의 정확도로 측정된 결과를 표본 평균으로 하여 계산하였다.

#### 3.2 측정 정확도

측정 정확도는 측정 결과를 표본으로 하여 평균을 중심으로 한 일정 범위를 나타내는 신뢰구간(confidence)으로 표현될 수 있고 식 (6)과 같이 구할 수 있다<sup>(7,8)</sup>.

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

여기서,  $\delta$ 는 측정 정확도로 표시할 수 있는 신뢰 구간이고,  $\alpha$ 는 신뢰도 95%인 경우 0.05의 상수,  $s$ 는 표본 표준 편차,  $n$ 은 표본의 크기로 데이터의 개수이다.

## 4. 측정 및 결과

#### 4.1 측정 기준

본 연구를 위한 기준 환경은 온도  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  및 상대 습도  $50 \pm 15$  RH%을 기준으로 하였다. 데오도라이트는 자체 교정 절차를 통하여 수평, 수직 및 편심도 등을 측정 전에 점검하였다. 또한 지면에서부터 데오도라이트의 망원경부까지의 높이는 1.5 m로 하였다. 그리고, 데오도라이트를 정확한 위치에 설치하기 위하여 데오도라이트에 의해 거리를 측정 후 바닥 면에 위치 확인용 타켓을 부착하였다. 이 타켓을 이용하여 데오도라이트 자체에 내장된 위치 확인용 렌즈를 통하여 타켓의 중심에 맞추어  $\pm 0.5$  mm의 오차로 데오도라이트를 설치하였다.

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

측정용 타켓은 인바 재질로 된 3 m 길이의 타켓 바(target bar) 위에 0.01 mm의 중심 지름을 가진 24개의 타켓을 임의로 부착하였다. 이들 타켓 간 길이는 한국표준과학연구원의 표준 측정기로 1번 점을 기준으로 24번 점까지 각 점에 대한 상대 길이를  $\pm 0.01$  mm의 정확도로 측정된 결과로 얻을 수 있었다. 이 측정 결과는 3.1 절에서의 측정 정확도 계산에서 표본 평균으로 사용하였고, 본 논문의 Fig. 6에 나타난 측정 오차를 구하기 위하여 데오도라이트의 4회 측정 평균값을 빼는 표본 평균으로 사용하였다.

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

또한, 측정 중 기준자와 타켓 바가 설치되는 측정 위치는 데오도라이트의 위치 확인용 타켓 설치와 동일한 방법으로 측정 점을 표시하였다. 그리고 기준자와 타켓 바의 높이는 모두 1.5 m의 높이에서 수행하였다.

#### 4.2 측정

2 대의 데오도라이트 간의 시준 거리에 따른 측정 정확도 연구를 위하여 2 대의 데오도라이트를 1~5 m까지 1 m 간격으로 측정을 수행하였다. 본 논문에서는 Fig. 5와 같이 데오도라이트의 거리에 대한 측정 형상을 간단히 표시하기 위하여 'T거리(m)'로 나타내었다. 그리고 데오도라이트 시스템과 기준 자 사이의 거리를 2 m, 3 m, 6 m 거리에서 시준을 하였다. 이 측정 형상은 'TS거리(m)'로 표시하였다. 그리고 각 시준 거리별 데오도라이트 시스템과 타켓 바를 3 m 거리에 위치시켜 24개의 측정 점을 측정하였다. 이 형상은 'TP거리(m)'로 표시하였다. 이때, 타켓 바는 각각 Fig. 6와 같이 수평으로, Fig. 7과 같이 수직으로 측정하였다. 이때, 타켓 바의 위치는 2 대의 데오도라이트 중간점을 기준으로 타켓 바의 중간점을 일치시켜 측정하였다. 또한 타켓 바를 수직 측정할 경우 고정용 스탠드를 이용하여 측정 중 변위 변화가 없도록 하였다. 본 측정에서 각 항목 당 4회의 반복 측정을 수행하였고, 측정 오차 결과에 있어서 많은 차이가 나는 항목은 재 측정하였다.

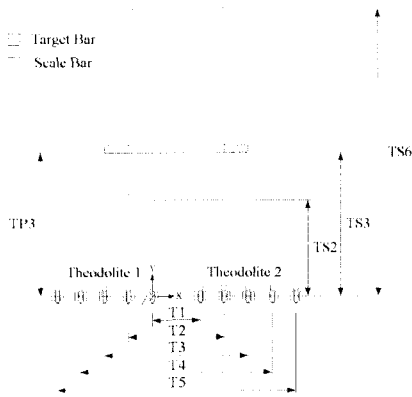


Fig. 5 Measurement Configuration for a Measurement Accuracy according to Theodolite Distance

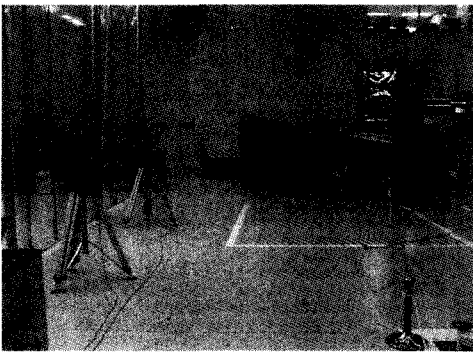


Fig. 6 Measurement Scheme of Horizontal Target Bar

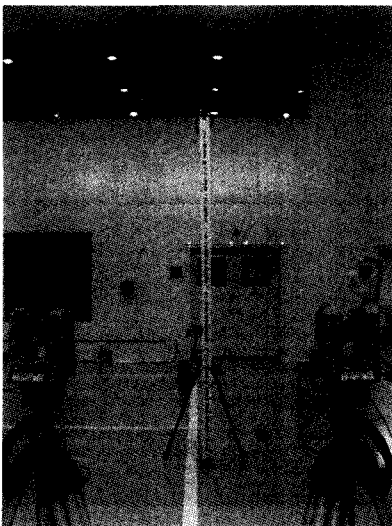


Fig. 7 Measurement Scheme of Vertical Target Bar

### 4.3 측정 결과

상기의 측정 조건에 따라 데오도라이트 측정 시스템을 설치하여 데오도라이트의 시준 거리별 차이에 따른 타겟의 측정 정확도를 Fig. 8 ~ Fig. 13과 같이 얻을 수 있었다. 이때 각 Fig의 횡축은 1번 타겟 점을 기준으로 24번 타겟 점까지의 23 개 길이에 대한 번호를 나타내고 종축은 4회 측정된 측정값 평균에서 표준측정기의 표본 평균을 뺀 측정 오차를 나타내고 있다.

각 측정 점에 따른 측정 오차는 두 대의 데오도라이트를 사용하여 측정함으로써 발생하는 데오도라이트 각각의 계기 오차와 두 측정자 간의 측정 점 시준 차이에 의한 개인 오차에 기인하는 것으로 판단되며, 이러한 오차를 포함한 측정 오차를 본 연구의 측정오차로 하였다.

#### 4.3.1 수평 측정에 따른 측정오차

TS2TP3H인 측정 조건에서 T1 ~ T5를 측정된 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 여기에서 T1, T3, T5일 때 0.05 mm 이내의 측정 정밀도를 얻었다. T2인 경우에 측정 결과의 최

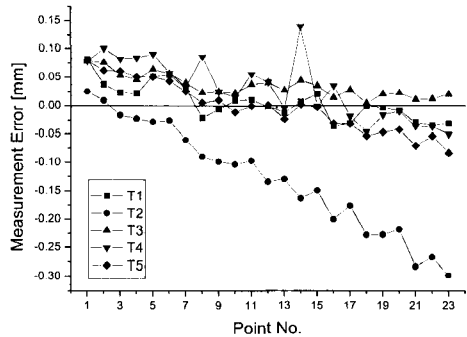


Fig. 8 Measurement Error of TS2TP3H

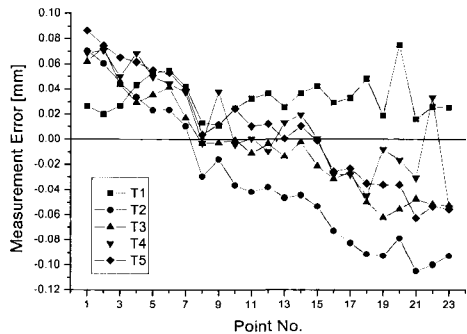


Fig. 9 Measurement Error of TS3TP3H

대 값과 최소 값의 차이가 0.32 mm로 가장 크고 측정 결과 분포도 다른 경우와 비교하여 좋지 않은 결과를 나타내고 있다. 그리고 T4 형상에서 14번의 경우 측정값이 갑자기 커진 것은 측정 인원 2인이 측정 중 지름 0.01 mm의 측정 타켓의 중심점을 맞추는데 차이가 생기는 개인오차에 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 9와 같이 TS3TP3H인 측정 조건에서의 T1 ~ T5에 대한 측정 결과를 얻을 수 있었다. 여기에서 T2를 제외한 테오도라이트의 거리 변화에 따른 측정 결과가 0.05 mm 이내의 측정 정밀도를 나타내고 있다. 특히 T1인 경우에 약 0.015 mm의 측정 정밀도를 나타내고 있으나 측정 결과 분포가 매우 불안정함을 알 수 있다. T2에서의 측정 결과는 TS2TP3의 측정 오차보다는 좋아졌으나 다른 측정 조건의 결과와 차이가 나는 것을 알 수 있다.

TS6TP3H의 경우 Fig. 10과 같이 T3, T4, T5에서 0.05 mm 이내의 측정 정밀도를 얻었다. 그러나 T1의 경우 TS2와 TS3의 경우와는 달리 측정 정밀도가 T2보다 더 나빠지는 것을 알 수 있다. T2의 경우에도 TS2와 TS3의 경우와

비슷한 측정 정확도를 나타내고 있다.

이상과 같이 TS2TP3H, TS3TP3H 및 TS6TP3H의 측정 결과 T1과 T2의 경우 TS의 거리가 멀어짐에 따라 측정 정확도가 나빠지는 경향을 보이고 있다. 이것은 두 대의 테오도라이트 사이가 가깝고 기준 길이 설정을 위한 기준자의 측정 거리가 멀어지는 경우 측정 정확도가 떨어지는 계기 오차에 기인한 것으로 판단된다.

#### 4.3.2 수직 측정에 따른 측정 오차

타켓 바를 수직으로 하여 TS2TP3V를 측정한 결과 Fig. 11과 같이 T3, T4에서 0.05 mm 이내의 측정 정밀도를 얻었다. 그러나 T1과 T2인 경우 측정 정밀도가 0.06 mm 이상으로 특히 T1의 경우에는 수평 측정의 경우보다 0.03 mm의 차이를 나타내고 있다. T5의 경우에도 수평에서의 측정 정밀도가 0.05 mm 이내였으나 0.05 mm 이상으로 나타나고 있다.

TS3TP3V의 경우 Fig. 12와 같이 T3 및 T4에서 0.05 mm 이내의 측정 정밀도를 얻었다. 그리고 TS2TP3V의 경

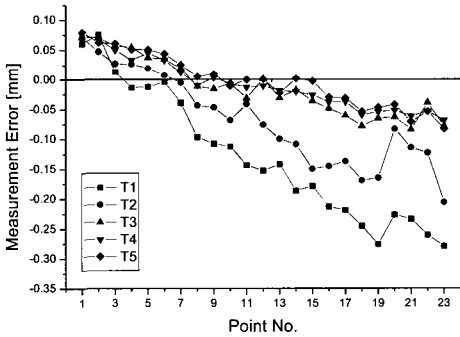


Fig. 10 Measurement Error of TS6TP3H

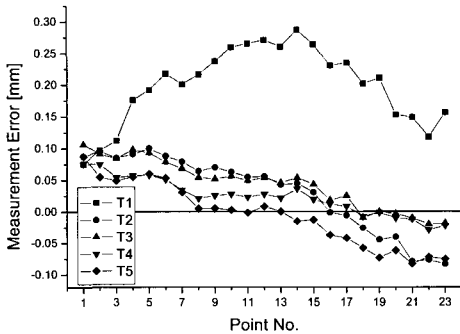


Fig. 11 Measurement Error of TS2TP3V

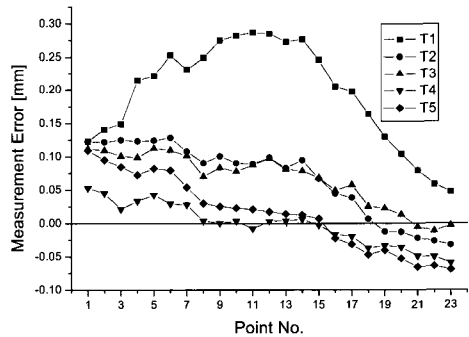


Fig. 12 Measurement Error of TS3TP3V

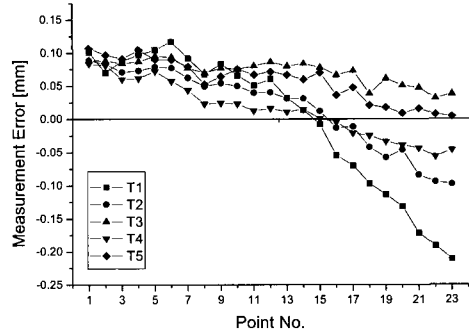


Fig. 13 Measurement Error of TS6TP3V

우와 마찬가지로 T1과 T2에서 측정 정확도가 좋지 않음을 알 수 있다. T5의 경우도 TS2TP3V와 같이 0.05 mm 이상의 측정 정밀도를 나타내고 있고 TS3TP3H에서의 측정 정밀도와도 차이를 나타내고 있다. 이것은 본 측정에서 사용된 테오도라이트가 수직 방향으로  $\pm 70^\circ$ (decimal degree)의 유효 측정 각을 가지므로 테오도라이트와 타겟 바의 거리가 가까운 경우  $\pm 70^\circ$ 의 범위를 벗어나게 되어 측정 오차가 많이 발생하는 것으로 판단된다.

TS6TP3V의 경우 Fig. 13과 같은 측정 결과를 나타내고 있다. T3에서 0.01 mm의 측정 정밀도를 나타내고 있고 측정 분포도 매우 안정적인 것을 알 수 있다. T4와 T5에서도 0.05 mm이내의 측정 정밀도를 나타내고 있다. 그러나 T1,

T2의 경우 TS6TP3H와 유사한 측정 정밀도를 나타내고 있다.

### 4.3.3 측정 결과 분석

식 (5)와 식 (6)을 이용하여 측정 정밀도와 측정 정확도를 구하고, 이를 타겟 바를 수평으로 한 경우에는 Table 1에, 타겟 바를 수직으로 한 경우에는 Table 2에 나타내었다.

타겟 바를 수평으로 한 경우, Table 1에 나타난 바와 같이 T1TS2TP3H와 T1TS3TP3H의 측정에서는 측정 정확도가  $\pm 0.0127 \sim \pm 0.0062$  (mm)로 좋았으나, T1TS6TP3H의 경우  $\pm 0.045$  mm로 기준자 측정 거리에 따라 측정 정확도 및 정밀도에 영향을 주는 것을 알 수 있었다. T2의 경우에는 TS2, TS3, TS6의 변화에 따라서 측정 정확도가 다른 측정 조건에 비하여 좋지 않은 결과를 나타내고 있다. 이것은 4.3.1절에 언급한 바와 같이 두 대의 테오도라이트 사이가 가깝고 기준 길이 설정을 위한 기준자의 측정 거리가 멀어지는 경우 측정 정확도가 떨어지는 계기 오차에 기인한 것으로 판단된다. T3의 경우에 TS의 거리 변화에 대한 측정 정확도가  $\pm 0.082 \sim \pm 0.0186$  (mm)이고, T4의 경우에는  $\pm 0.0152 \sim \pm 0.0218$  (mm), T5의 경우에는  $\pm 0.0181 \sim \pm 0.0186$  (mm)으로 안정된 측정 정확도를 얻을 수 있었다.

타겟 바를 수직으로 한 경우의 측정 정밀도와 측정 정확도는 Table 2에 나타내었다. T1, T2의 경우 기준자의 위치에 따라 측정 정확도는  $\pm 0.003 \sim \pm 0.043$  (mm)로 변화가 심하고, 측정 정밀도도 0.056 mm 이상으로 나타나고 있

Table 1 Standard Deviation and Confidence for Horizontal Target Bar(unit : mm)

		Standard Deviation	Confidence
TS2TP3H	T1	0.0311	$\pm 0.0127$
	T2	0.0963	$\pm 0.0394$
	T3	0.0201	$\pm 0.0082$
	T4	0.0534	$\pm 0.0218$
	T5	0.0456	$\pm 0.0186$
TS3TP3H	T1	0.0151	$\pm 0.0062$
	T2	0.0546	$\pm 0.0223$
	T3	0.0393	$\pm 0.0161$
	T4	0.0373	$\pm 0.0152$
	T5	0.0442	$\pm 0.0181$
TS6TP3H	T1	0.1102	$\pm 0.0450$
	T2	0.0780	$\pm 0.0319$
	T3	0.0495	$\pm 0.0202$
	T4	0.0430	$\pm 0.0176$
	T5	0.0456	$\pm 0.0186$

Table 2 Standard Deviation and Confidence for Vertical Target Bar(unit : mm)

		Standard Deviation	Confidence
TS2TP3V	T1	0.0604	$\pm 0.0247$
	T2	0.0612	$\pm 0.0250$
	T3	0.0395	$\pm 0.0161$
	T4	0.0293	$\pm 0.0120$
	T5	0.0508	$\pm 0.0208$
TS3TP3V	T1	0.0775	$\pm 0.0032$
	T2	0.0565	$\pm 0.0231$
	T3	0.0406	$\pm 0.0166$
	T4	0.0322	$\pm 0.0132$
	T5	0.0561	$\pm 0.0229$
TS6TP3V	T1	0.1059	$\pm 0.0433$
	T2	0.0605	$\pm 0.0247$
	T3	0.0186	$\pm 0.0076$
	T4	0.0427	$\pm 0.0175$
	T5	0.0328	$\pm 0.0134$

다. 또한 T5TS2TP3V와 T5TS3TP3V의 경우 측정 정확도가  $\pm 0.013 \sim \pm 0.023$  (mm)으로 양호하지만 측정 정밀도에서 0.05 mm 이상을 나타내고 있다. 이것은 테오도라이트의 유효 수직 측정 각이  $\pm 70^\circ$ 이므로 기준자의 거리가 너무 짧거나 길어지는 경우에 수직 측정 각을 벗어나 측정된 것에 기인하기 때문이다. T3와 T4의 경우 TS의 거리에 관계없이  $\pm 0.007 \sim \pm 0.017$  (mm)의 측정 정확도를 나타내고 있고, 측정 정밀도도 0.018 ~ 0.041 (mm)의 안정된 결과를 나타내고 있다.

## 5. 결론

비접촉식 3차원 정밀 측정 장비인 테오도라이트 측정 시스템의 측정 정확도에 대한 기초 연구로 본 연구가 수행되었다. 테오도라이트 측정 시스템의 정밀 측정에 있어서 측정 정확도에 영향을 미칠 수 있는 세 가지 요인은 두 대의 테오도라이트 사이의 거리, 테오도라이트 시스템과 기준자 간의 거리 및 테오도라이트 시스템과 측정 타켓의 거리에 대한 측정 정확도이다. 이들 중 본 연구에서는 두 대의 테오도라이트 사이의 거리에 대한 측정 정확도 및 정밀도에 대한 연구를 수행하였고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) T1, T2의 경우 TS의 거리 변화에 따라 타켓 바가 수평인 조건에서  $\pm 0.006 \sim \pm 0.045$  (mm), 수직인 조건에서  $\pm 0.032 \sim \pm 0.043$  (mm)으로 측정 정확도의 변화가 심하다.
- (2) T3, T4의 TS의 거리 변화에서는 타켓 바가 수평인 조건에서  $\pm 0.008 \sim \pm 0.022$  (mm), 수직인 조건에서  $\pm 0.008 \sim \pm 0.017$  (mm)로 측정 정확도의 변화가 작고 안정적인 측정 정확도를 얻을 수 있다.
- (3) T5인 경우에 타켓 바가 수평인 조건에서  $\pm 0.018$  mm, 수직인 조건에서  $\pm 0.013 \sim \pm 0.023$  (mm)으로 안정된 측정 정확도를 나타내고 있으나 측정 정밀도에서 수직 조건의 경우  $\pm 0.032 \sim \pm 0.056$  (mm)으로 다른 경우와 비교하여 상대적으로 측정 정밀도가 좋지 않다.
- (4) 따라서, 테오도라이트 시스템으로 부터 3 m 거리에 있는 가로 3 m, 세로 3 m의 평면 공간을 측정하는 경우 두 대의 테오도라이트의 거리가 1~2 (m)의 너무 짧은 거리에 위치하거나 5 m 이상의 긴 거리에 위치하는 것

보다 3~4 (m)의 거리에서 시준하여 타켓을 측정하는 것이 안정된 측정 정밀도와 최대  $\pm 0.02$  mm 이상의 측정 정확도를 얻을 수 있다.

## 참고 문헌

- (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) Kim, Y. S., Song, I. S., Jung, J. P., Han, J. H., and Youn, W. J., 2003, "A Study on Measurement of Linear Cycle Plane Positioning Accuracy of NC Lathe", *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 12, No. 2, pp. 53~58.
- (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) 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.
- (5) Sandwith, S. C., 1993, *Gageless Tool Building with Computer-Aided Theodolites*, Leica Practice Report, Leica co. Ltd.
- (6) Guillon, F., 1999, "Triangulation and Autocollimation Measurement System", *ESIC*, pp. 68~71.
- (7) Kim, S. H., Yoon, K. S., and Lee, M. H., 2003, "Contour Error Analysis and Feed Controller Optimization for Machining Center", *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 12, No. 3, pp. 17~24.
- (8) Jung, R. S., 1998, *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, KRISS, pp. 77~88.