

테오드라이트 시스템의 측정 정확도에 대한 연구(III) - 시준거리 3 m에서 기준자 거리에 따른 측정 정도

윤용식*, 이동주⁺, 윤인진⁺⁺
(논문접수일 2004. 9. 3, 심사완료일 2005. 2. 3)

A Study on Measurement Accuracy of Theodolite System(III)
- A Measurement System Accuracy depending on a Distance of Scale Bar on the Distance 3 m between two Theodolites

Yong-Sik Yoon*, Dong-Ju Lee⁺, In-Jin Yoon⁺⁺

Abstract

The theodolite system consists of two theodolites, a scale bar and a target bar. A measurement accuracy of theodolite system is affected by a measurement distance of each equipment. This study was performed for measuring an accuracy when the distance from theodolite to scale bar was changed 2~6 m on two theodolites distance 3 m. The results showed that the measurement accuracy could be ± 0.021 mm when the distance from theodolite to target was 2, 3 and 6 m. Specially, it was found that the maximum measurement accuracy was ± 0.017 mm on theodolite collimation distance 3m and the distance 4 m of the theodolite and scale bar.

Key Words : Theodolite(테오드라이트), Scale Bar(기준자), Target Bar(타겟 바), Measurement Accuracy(측정 정확도), Measurement Precision(측정 정밀도), Collimation(시준), Line of Sight(시준선)

1. 서론

1.5m³ 이상의 크기로 다양한 형상을 갖는 측정 대상물에 대하여 ± 0.5 mm이하의 측정 정도로 비접촉 정밀 측정이 가능한 장비 중 하나인 디지털 테오드라이트 시스템(digital

theodolite system)이 사용되고 있다¹⁾. 그러나 현재 항공·우주, 원자력 및 광가속기 등 첨단 산업기기의 고정밀화에 따라 측정 정도의 요구가 높아짐에 따라 측정 장비의 측정 정도를 넘어서고 있는 실정이다. 이에 따라 상기 측정 장비에 대한 측정 정도를 제고하기 위한 연구가 수행되

* 한국항공우주연구원 우주시험그룹 (ysyoon@kari.re.kr)

주소: 305-333 대전광역시 유성구 어은동 45번지

+ 충남대학교 기계공학과

++ 홍성기능대학 자동화시스템과

고 있다. 특히, 데오드라이트 시스템의 경우 측정 정도에 영향을 미칠 수 있는 요인으로 온도, 조도 등 측정 환경뿐 아니라 기준자의 높이, 2대 데오드라이트 사이의 시준 거리, 데오드라이트 시스템과 기준자 사이의 거리 및 타켓 사이의 거리 등이 있다. 이러한 요인에 대한 연구는 Yoon과 Lee에 의해 측정 온도와 조도 그리고 측정자의 숙련도에 따른 측정 환경에 대한 연구가 수행된 바 있고, 데오드라이트 시준 거리 및 기준자 높이에 따른 측정 정도에 대한 연구가 수행된 바 있다⁽²⁻⁴⁾.

본 연구에서는 Yoon과 Lee에 의하여 수행된 연구 결과에 따른 측정 환경 즉, $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 의 온도와 $300 \pm 15\text{Lux}$ 의 조도로 6개월 이상의 숙련자에 의해 기준자의 높이를 1m로 하여 측정을 수행하였다. 그리고 2대의 데오드라이트 사이의 시준 거리를 3m로 하고 데오드라이트 시스템으로부터 타켓 바 사이의 거리를 2m, 3m 및 6m에 위치시켜 수평과 수직으로 타켓 바 위에 부착된 24개의 타켓을 측정하였다. 이때 데오드라이트 시스템과 기준자 사이의 거리를 2~6m 범위에서 각 1m 간격으로 기준 거리를 정하여 최적의 데오드라이트 시스템과 기준자 사이의 거리를 구하고자 하였다.

2. 데오드라이트 시스템의 관련 이론

2.1 데오드라이트 시스템의 측정 절차

먼저, Fig. 1과 같이 데오드라이트 2대를 데이터 처리시스템에 RS-232 선으로 연결하고 측정하고자 하는 3차원 공간의 점들이 모두 보이는 곳에 위치시킨다. 그리고 2대의 데오드라이트를 마주 보면서 대물 렌즈부에 설치되어 있는 십자 선을 맞추어 각각의 기준을 확인하는 시준(collimation) 작업을 한다. 다음에 기준 자에 부착된 2개 이상의 타켓을

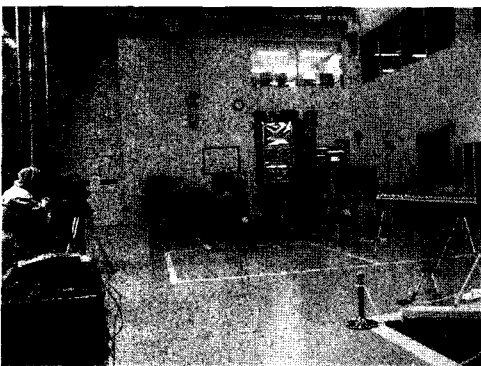


Fig. 1 Measurement of Target Points

데오드라이트로 동시에 측정하여 표준 길이를 설정한 후 타켓 번호 순서에 따라 데오드라이트를 측정 중앙 점에 맞추어 측정한다. 이때 데오드라이트의 시준 선(line of sight)이 3차원 공간의 측정 점을 교차하면서 삼각형이 형성된다. 이 측정 점은 수평 각과 수직 각으로 측정되고 이 값들은 데이터 처리시스템의 오리엔테이션(orientation) 기능을 통하여 데오드라이트 1을 기준으로 하는 3차원 좌표 값들로 변환된다⁽⁵⁻⁷⁾.

2.2 측정 데이터의 계산

2.2.1 측정 정확도

본 연구에서의 측정 정확도는 임의의 측정 조건에서 데오드라이트로 4회 반복 측정된 측정 평균값에서 표준 측정기로 측정된 표준 길이를 뺀 측정 오차에 대한 산술 평균(mean)으로 표현하였다. 산술 평균은 아래 식 (1)과 같이 구하였고, 측정 오차 0의 값을 기준으로 한 측정 정확도를 고찰하는데 사용하였다.

$$\begin{aligned} x' &= \frac{(x_1 - y) + (x_2 - y) + \dots + (x_n - y)}{n} \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - y)}{n} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 x' 은 산술 평균, x 는 데오드라이트에 의한 측정값, y 는 한국 표준과학연구원의 표준 측정기를 사용하여 확장 불확도 $\pm 0.01\text{mm}$ 로 측정된 표준 길이, n 은 표본 개수를 의미한다.

2.2.2 측정 정밀도

측정 정밀도는 측정값 산포(dispersion)의 정도로 표시할 수 있다. 이 때 측정값의 정밀도는 식 (2)와 같이 표본 표준 편차(standard deviation)로 나타낼 수 있다⁽⁸⁾.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - y)^2} \quad (2)$$

여기서 σ 는 표본 표준 편차이고, n 은 표본 개수이다. 그리고 x_i 는 데오드라이트에 의한 측정값이고 y 는 표준 측정기에 의한 표준 길이이다.

2.2.3 측정 정도

측정 정도는 측정 정확도와 측정 정밀도 모두를 포함하는 것으로 측정 결과를 표본으로 하여 산술 평균을 중심으로

일정 범위를 나타내는 신뢰 구간(confidence)으로 표현될 수 있다^(9~10). 이에 따라 식 (2)의 표준 편차를 이용하여 각각의 측정 거리 조건 별로 계산된 측정 오차 값의 표본에 대한 측정 정도를 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$\delta = \pm t(\phi, \frac{\alpha}{2}) \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

여기서, δ 는 측정 정도로 표시할 수 있는 신뢰 구간, α 는 신뢰도 95%로 하여 0.05의 상수, σ 는 표본 표준 편차, n 은 표본의 크기로 측정값의 개수를 나타낸다. $t(\phi, \alpha/2)$ 는 자유도 $\phi = n - 1$ 일 때 신뢰 수준에 따른 t 인자의 값으로 2.074 값으로 계산한다.

3. 측정 및 결과

3.1 측정 준비

본 연구를 위하여 테오드라이트는 측정 전에 자체 교정 절차를 통하여 수평, 수직 및 편심도 등을 점검하였고 지면에서 망원경부를 1.5m 높이에 설치하였다. 그리고, 테오드라이트의 설치 위치는 테오드라이트 자체에 내장된 위치 확인용 렌즈를 통하여 바닥면에 설치된 타겟의 중심에 $\pm 0.5\text{mm}$ 의 오차로 설치하였다.

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

측정용 타겟은 인바 재질로 된 3m 길이의 타겟 바(target bar) 위에 0.01mm의 중심 지름을 가진 24개의 타겟을 임의의 길이로 부착하였다. 이들 타겟 사이의 길이는 한국표준과학연구원의 교정을 통하여 1번 점을 기준으로 24번 점까지 각 점에 대한 상대 길이를 $\pm 0.01\text{mm}$ 의 정확도로 측정된 결과를 기준으로 하였다.

3.2 측정

테오드라이트 시스템과 기준자 사이의 거리에 따른 측정 정도 연구를 위하여 Fig. 2와 같이 2대의 테오드라이트를 3m, 기준자 높이를 1m 그리고 타겟의 높이를 1.5m로 위치시킨 상태에서 기준 자를 2~6m까지 1m 간격으로 하여 각 기준 길이를 설정한 후 각 측정 조건에서 타겟 바를 2m, 3m 및 6m에 위치시켜 4회 반복 측정하였다.

본 논문에서는 이러한 측정 조건을 간단히 표시하기 위하

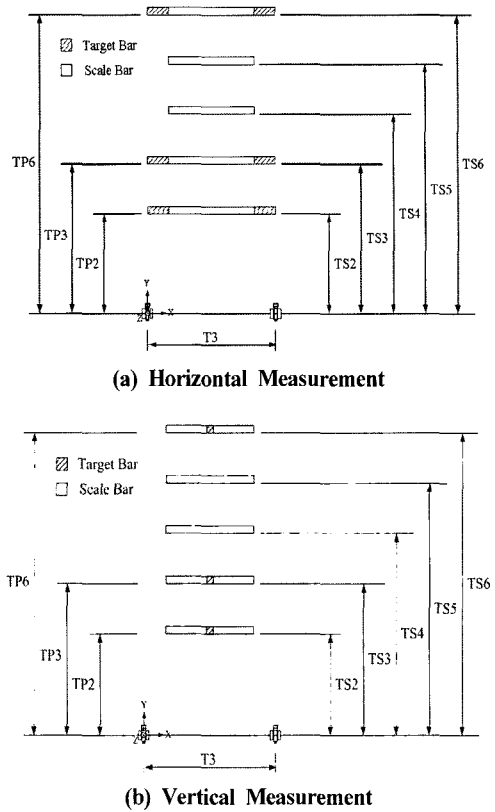


Fig. 2 Measurement Scheme of Distance Variables between Theodolite and Scale Bar in T3SH1PH1.5

여 2 대의 테오드라이트 사이의 거리를 'T거리(m)', 기준자 높이를 'SH높이(m)' 그리고 타겟의 높이를 'PH높이(m)'로 나타내었다. 또한 테오드라이트 시스템과 기준 자 사이의 측정 형상은 'TS거리(m)'로 표시하였고 테오드라이트 시스템과 타겟 바의 형상은 'TP거리(m)'로, 타겟 바의 수평 측정을 'H', 수직 측정을 'V'로 표시하였다.

3.3 측정 결과

3.3.1 T3TP2에서의 측정 결과

T3TP2H의 측정 결과를 Fig. 3 및 Table 1에 나타내었다. TS2~TS6의 경우 측정 정밀도가 0.0284~0.2297mm를 나타내고 있다. 여기서 TS6의 측정 결과가 다른 측정 조건의 결과와 차이가 크게 나타남으로 다른 측정 조건의 측정 결과를 자세히 나타내기 위하여 Fig. 3에서 생략하였다. Fig. 3에서 나타난 바와 같이 TS2~TS5의 측정 조건 모두

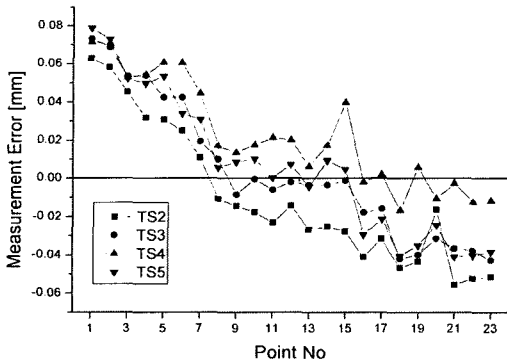


Fig. 3 Measurement Errors depending on TS of T3S-H1PH1.5TP2H

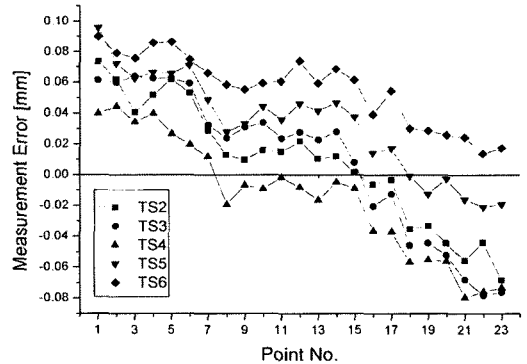


Fig. 4 Measurement Errors depending on TS of T3S-H1PH1.5TP2V

타켓 거리 1번~7번까지의 측정 결과가 좋지 않게 나타나고 있다. 이것은 테오드라이트와 타켓 바 사이의 거리를 너무 가깝게 하여 측정함으로써 생기는 계기 오차로 판단된다. 그리고 TS2~TS5까지의 측정 정확도는 $-0.0103 \sim 0.0224\text{mm}$ 로 측정 오차 0의 값에 근접하고 있다. 특히, TS4의 경우 측정 정확도가 0.0224mm , 측정 정밀도가 0.0284mm , 측정 정도가 $\pm 0.0123\text{mm}$ 로 다른 조건에 비하여 양호한 결과를 나타내고 있다.

T3TP2V의 측정 결과를 Fig. 4 및 Table 1에 나타내었다. TS2의 경우 측정 정확도 0.0078mm , 측정 정밀도 0.0340mm , 측정 정도 $\pm 0.0173\text{mm}$ 로 비교적 양호한 측정 결과를 나타내고 있다. TS3의 경우 측정 정밀도는 0.0483mm 로 불안정한 측정 결과를 나타내고 있으나 측정 정확도는 0.0088mm 로 측정 오차 0의 값에 근접해 있다. TS4의 경우 측정 정확도 -0.0144mm , 측정 정밀도 0.0390mm 및 측정 정도 $\pm 0.0168\text{mm}$ 로 다른 측정 조건과 비교하여 양호한 측정 결과를 나타내고 있다. 그리고 TS5 및 TS6의 경우 측정 정밀도가 0.0330mm 및 0.0231mm 로 비교적 안정적인 측정 결과를 나타내고 있으나 측정 정확도가 0.0328mm 와 0.0560mm 로 다른 측정 조건에 비하여 측정 오차 0의 값과 차이를 나타내고 있다.

3.3.2 T3TP3에서의 측정 결과

T3TP3H의 측정 결과를 Fig. 5 및 Table 2에 나타내었다. TS2~TS6에서의 측정 정밀도가 $0.0201 \sim 0.0495\text{mm}$ 이고, T3TP2H와 마찬가지로 타켓 거리 1번~7번까지의 측정 정밀도가 좋지 않지만 T3TP2H의 측정 결과보다 좋아지는 경향을 보이고 있다. 특히, TS2 및 TS4의 경우 Table 2에

Table 1 Measurement System Accuracy depending on TS of T3SH1PH1.5TP2(unit : mm)

Measurement Configuration	Measurement Accuracy	Measurement Precision	Measurement System Accuracy	
T3TP2H	TS2	- 0.0103	0.0361	± 0.0156
	TS3	0.0031	0.0365	± 0.0158
	TS4	0.0224	0.0284	± 0.0123
	TS5	0.0061	0.0373	± 0.0161
	TS6	0.1584	0.2297	± 0.0994
T3TP2V	TS2	0.0078	0.0340	± 0.0173
	TS3	0.0088	0.0483	± 0.0209
	TS4	- 0.0144	0.0390	± 0.0168
	TS5	0.0328	0.0330	± 0.0143
	TS6	0.0560	0.0231	± 0.0100

서와 같이 측정 정확도가 0.0348mm , 0.0341mm , 측정 정밀도가 0.0201mm , 0.0234mm 그리고 측정 정도가 $\pm 0.0087\text{mm}$, $\pm 0.0101\text{mm}$ 로 비교적 양호한 결과를 나타내고 있다. TS5 및 TS6의 경우 측정 정밀도가 0.0378mm 와 0.0495mm 로 불안정하지만 측정 정확도는 0.0055mm 와 -0.0142mm 로 다른 측정 조건에 비하여 양호한 측정 결과를 나타내고 있다. 그러나 측정 정도는 $\pm 0.0163\text{mm}$ 와 $\pm 0.0214\text{mm}$ 로 낮게 나타나고 있다. 이것은 기준 길이 설정을 5~6m의 먼 거리에서 하고, 타켓 측정을 3m의 가까운 위치에서 측정했을 경우 발생하는 계기 오차에 의한 것으로 판단된다.

T3TP3V의 측정 결과를 Fig. 6 및 Table 2에 나타내었다. TS2, TS3 및 TS5의 경우 측정 정밀도가 $0.0395 \sim 0.0600$

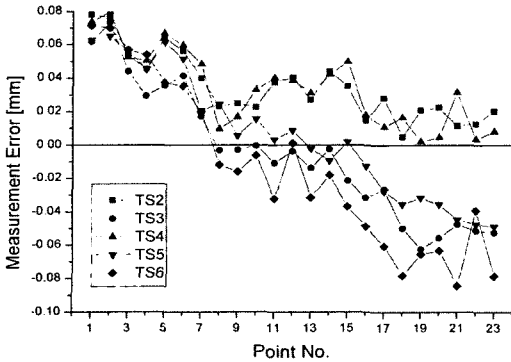


Fig. 5 Measurement Errors depending on TS of T3S-H1PH1.5TP3H

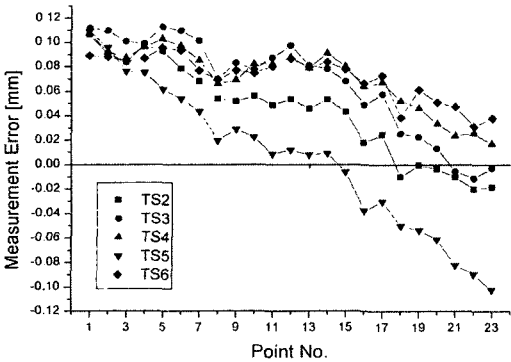


Fig. 6 Measurement Errors depending on TS of T3S-H1PH1.5TP3V

Table 2 Measurement System Accuracy depending on TS of T3SH1PH1.5TP3(unit : mm)

Measurement Configuration	Measurement Accuracy	Measurement Precision	Measurement System Accuracy	
T3TP3H	TS2	0.0348	0.0201	± 0.0087
	TS3	- 0.0059	0.0393	± 0.0170
	TS4	0.0341	0.0234	± 0.0101
	TS5	0.0055	0.0378	± 0.0163
	TS6	- 0.0142	0.0495	± 0.0214
T3TP3V	TS2	0.0436	0.0395	± 0.0171
	TS3	0.0667	0.0406	± 0.0175
	TS4	0.0711	0.0263	± 0.0114
	TS5	0.0047	0.0600	± 0.0260
	TS6	0.0717	0.0186	± 0.0080

mm의 불안정한 측정 결과를 나타내고 있고 측정 정도도 $\pm 0.0171 \sim \pm 0.0260\text{mm}$ 로 다른 측정 조건의 결과에 비하여 낮게 나타나고 있다. TS4와 TS6의 경우 측정 정확도가 0.0711mm, 0.0717mm로 비교적 낮게 나타나지만 측정 정밀도가 0.0263mm와 0.0186mm, 측정 정도 $\pm 0.0114\text{mm}$ 및 $\pm 0.0080\text{mm}$ 로 비교적 안정된 측정 결과를 나타내고 있다.

3.3.3 T3TP6에서의 측정 결과

T3TP6H의 측정 결과를 Fig. 7 및 Table 3에 나타내었다. TS2~TS5의 거리 변화에 따라 기준 길이를 설정하고 타켓을 측정하는 경우 0.0144~0.0198mm로 안정된 측정 정밀도를 얻을 수 있었다. 특히, TS2~TS4의 경우 측정 정확도가 0.0564~0.0607mm이고 측정 정도도 $\pm 0.0062 \sim \pm 0.0073\text{mm}$ 를 나타내고 있다. TS6의 경우에는 측정 정확도가 -0.0007mm이지만 측정 정밀도가 0.0510mm, 측정 정도가 $\pm 0.0220\text{mm}$ 로 측정 결과가 불안하고 측정 정도가 다른 측정 조건에 비하여 낮게 나타나고 있다. 이것은 테오드라이트로부터 기준자와 타켓 바가 먼 거리에서 측정이 수행된 것에 기인한 것으로 판단된다.

T3TP6V의 측정 결과는 Fig. 8 및 Table 3에 나타내었다. TS2 및 TS3의 경우 측정 정확도 0.0664mm와 -0.0136mm, 측정 정밀도 0.0386mm, 0.0460mm, 그리고 측정 정도 $\pm 0.0167\text{mm}$ 및 $\pm 0.0199\text{mm}$ 로 T3TP2V와 T3TP3V의 경우와 비슷한 결과를 나타내고 있다. 또한 TS4의 경우 측정 정확도 0.0691mm, 측정 정밀도 0.0268mm 그리고 측정 정도 $\pm 0.0116\text{mm}$ 로 T3TP2V의 측정 결과보다는 좋아지고 T3TP3V의 측정 결과와는 비슷하게 나타나고 있다. TS5 및 TS6의 경우 측정 정확도 0.0002mm 및 -0.0962mm, 측정 정밀도 0.0682mm 및 0.0897mm 그리고 측정 정도 $\pm 0.0295\text{mm}$ 및 $\pm 0.0388\text{mm}$ 로 나타나고 있다. 이것은 T3TP2V 및 T3TP3V의 결과와 비교하여 측정 정확도 및 측정 정밀도가 감소하는 경향을 보이고 있어 측정 거리에 따라 측정 결과의 안정성 및 측정 정도가 불안함을 알 수 있었다. 이러한 이유로 수평 측정 조건과 마찬가지로 테오드라이트와 기준자 사이의 거리가 먼 상태에서 기준 길이를 설정한 후 측정을 수행함으로써 나타나는 계기 오차에 기인한 것으로 판단된다.

또한 T3TP2V, T3TP3V 및 T3TP6V의 수직 측정인 경우 TS2와 TS3의 측정 정밀도와 측정 정도가 TS4의 결과에 비하여 좋지 않은 것을 알 수 있었다. 이것은 테오드라이트 시준 거리가 가깝고, 기준자의 거리가 가까운 경우에도 타켓 측정에 대한 측정 정도가 낮게 나타나는 계기 오차에 기

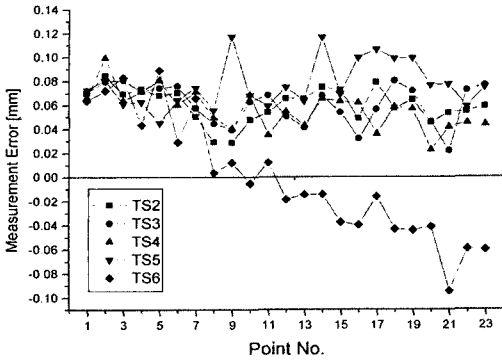


Fig. 7 Measurement Errors depending on TS of T3S-H1PH1.5TP6H

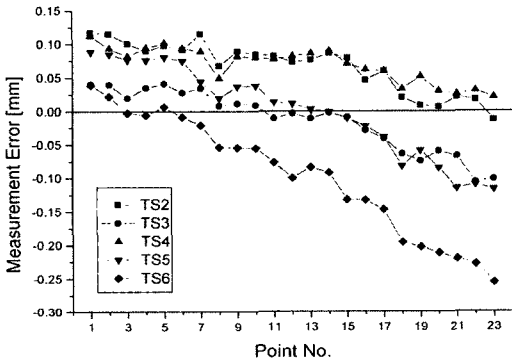


Fig. 8 Measurement Errors depending on TS of T3S-H1PH1.5TP6V

Table 3 Measurement System Accuracy depending on TS of T3SH1PH1.5TP6(unit : mm)

Measurement Configuration	Measurement Accuracy	Measurement Precision	Measurement System Accuracy
T3TP6H	TS2	0.0602	0.0144 ± 0.0062
	TS3	0.0607	0.0168 ± 0.0073
	TS4	0.0564	0.0170 ± 0.0073
	TS5	0.0772	0.0198 ± 0.0086
	TS6	- 0.0007	0.0510 ± 0.0220
T3TP6V	TS2	0.0664	0.0386 ± 0.0167
	TS3	- 0.0136	0.0460 ± 0.0199
	TS4	0.0691	0.0268 ± 0.0116
	TS5	0.0002	0.0682 ± 0.0295
	TS6	- 0.0962	0.0897 ± 0.0388

인한 것으로 판단된다.

3.4 측정 결과 고찰

3.3 절의 테오드라이트 시준 거리 3m에서 기준자 거리 변화에 따른 측정 결과로부터 타켓 바의 수평 및 수직 조건 모두를 포함한 TP2, TP3 및 TP6에서의 측정 정확도, 측정 정밀도 및 측정 정도를 얻을 수 있었다. 이들 측정 조건 중 TS2, TS3 및 TS4에서의 측정 결과가 TS5 및 TS6에 비해 양호한 것을 알 수 있었다.

여기서 타켓의 수평 및 수직 측정 모두를 포함한 TS2, TS3 및 TS4의 각 측정 조건 중 측정 결과가 양호한 상위 3개의 측정 조건의 최대 값을 대표 값으로 하여 Table 4에 나타내었다. Table 4에서와 같이 T3TP2, T3TP3 및 T3TP6의 측정 조건에서 TS2, TS3 및 TS4에 대한 측정 정확도는 0.0088~0.0711mm, 측정 정밀도는 0.0263~0.0483mm 그리고 측정 정도는 ±0.0114~±0.0209mm의 양호한 측정 결과를 얻을 수 있었다. 특히, TS4의 측정 조건만을 고려할 때 측정 정확도 0.0224~0.0711mm, 측정 정밀도 0.0263~0.0390mm 그리고 측정 정도 ±0.0114~±0.0168mm로 안정적이고 양호한 측정 정도를 나타내고 있다. TS4의 특정 결과로부터 테오드라이트와 기준자 사이의 거리가 안정적으로 유지되고 있다는 것을 알 수 있다.

또한 일정한 테오드라이트 시준 거리를 유지할 때 기준자의 기준 길이 설정을 위한 거리가 6m 이상인 경우 타켓에

Table 4 Measurement System Accuracy depending on TS in TP2, TP3 and TP6 of T3SH1PH1.5HV(unit : mm)

Measurement Configuration	Measurement Accuracy	Measurement Precision	Measurement System Accuracy
T3TP2	TS2	- 0.0103	0.0361 ± 0.0173
	TS3	0.0088	0.0483 ± 0.0209
	TS4	0.0224	0.0390 ± 0.0168
T3TP3	TS2	0.0436	0.0395 ± 0.0171
	TS3	0.0667	0.0406 ± 0.0177
	TS4	0.0711	0.0263 ± 0.0114
T3TP6	TS2	0.0664	0.0386 ± 0.0167
	TS3	0.0607	0.0460 ± 0.0199
	TS4	0.0691	0.0268 ± 0.0116

대한 측정 정도가 낮아지는 것도 알 수 있었다.

4. 결론

비접촉식 3차원 정밀 측정 장비인 테오드라이트 측정 시스템의 측정 정확도에 대한 기초 연구로 본 연구가 수행되었다. 본 연구에서는 2대의 테오드라이트 사이의 시준 거리를 3m로 하여 테오드라이트 시스템과 기준자 간의 거리에 대한 측정 정도에 대한 연구를 수행하였고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 시준 거리가 3m인 측정 조건에서 TS2, TS3 및 TS4의 측정 조건 즉, 테오드라이트로부터 기준자 사이의 거리가 2m, 3m 그리고 4m에서 양호한 측정 결과를 얻을 수 있다.
- (2) 이때 상기의 측정 조건에서 테오드라이트로부터 타겟까지의 거리를 2m, 3m 및 6m에 위치시켜 측정하는 경우 최대 측정 정도는 $\pm 0.021\text{mm}$ 이내로 나타난다.
- (3) 특히, 시준 거리가 3m이고, 테오드라이트로부터 기준자 사이의 거리가 4m인 경우 $\pm 0.017\text{mm}$ 의 측정 정도로 측정이 가능하다.

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 KSMTE*, Vol. 11, No1, pp. 7~13.
- (2) Yoon, Y. S., and Lee, D. J., 2003, "A Study on

Measurement Error Factors of Theodolite System," *Transactions of the KSMTE*, Vol. 12, No. 4, pp. 36~42.

- (3) 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 KSMTE*, Vol. 13, No. 2, pp. 61~68.
- (4) Yoon, Y. S., Lee, D. J., and Cheong, J. G., 2004, "A Study on Measurement Accuracy of Theodolite System(II) - A Measurement Accuracy for a Height of Scale Bar," *Transactions of the KSMTE*, Vol. 13, No. 4, pp. 37~43.
- (5) 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 KSPE Spring Conference*, pp. 131~134.
- (6) Yoon, Y. S., *A Study on Measurement Accuracy Improvement of Theodolite System*, Chungnam Univ. Ph. D. Thesis.
- (7) Sandwith, S. C., 1993, "Gageless Tool Building with Computer-Aided Theodolites," *Leica Practice Report*, Leica co. Ltd.
- (8) Jung, R. S., 1998, *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, KRISS, pp. 83~88.
- (9) Hong, J. H., 1998, *The Fundamental of Measurement Engineering*, Sigma Press.
- (10) Nakazawa. H., 1994, *Principles of Precision Engineering*, Oxford Univ. Press.