

테오드라이트 시스템의 측정 정확도에 대한 연구(IV) - 시준거리 4m에서의 기준자 거리에 따른 측정 정도

윤용식*, 이동주⁺, 박요창⁺⁺

(논문접수일 2004. 10. 27, 심사완료일 2004. 12. 27)

A Study on Measurement System Accuracy of Theodolite System(IV)

- A Measurement System Accuracy depending on a Distance of Scale Bar
on the Distance 4 m between two Theodolites

Yong-Sik Yoon*, Dong-Ju Lee⁺, Yo-Chang Park⁺⁺

Abstract

An accuracy of theodolite system may be affected by a measurement environment and a measurement distance change from theodolite to scale bar and/or targets. This study was performed for measuring an accuracy when the distance from theodolite system to scale bar was changed 2~6m on the distance 4m between two theodolites. The results showed that an accuracy was $\pm 0.025\text{mm}$ or better when the distance from theodolite system to targets was 3, 4 and 5m. According to the results, it was found that the best distance from theodolite system to scale bar was 3~4m when the collimation distance was 3~4m.

Key Words : Theodolite(테오드라이트), Scale Bar(기준자), Target Bar(타겟 바), Collimation(시준), Measurement Accuracy(측정 정확도), Measurement Precision(측정 정밀도), Measurement System Accuracy(측정 정도)

1. 서 론

테오드라이트 시스템은 1.5m³ 이상의 복잡한 형상을 갖는 측정 대상물을 비접촉식으로 3차원 정밀 측정이 가능한 장비이다. 이 시스템의 최대 측정 정도는 0~100m의 거리에 있는 측정 대상물에 대하여 $\pm 0.5\text{mm}$ 까지 측정이 가능하

다⁽¹⁾. 그러나 현재 인공위성 및 항공기와 핵발전소 등과 같은 선진형 산업제품의 경우 초정밀화로 발전되고 있어 요구되는 측정 정도가 측정 시스템의 측정 정도를 추월하는 실정이다. 이에 따라 테오드라이트 시스템과 같은 기존의 측정 시스템으로 구현할 수 있는 최대 측정 정도에 대한 기초 연구가 활발히 수행되고 있다.

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

주소: 305-333 대전광역시 유성구 어은동 45번지

+ 충남대학교 기계공학과

++ 특허청 기계금속심사국 일반기계과

Yoon과 Lee⁽²⁻⁵⁾는 데오드라이트 시스템의 측정 환경에 대한 연구를 수행하여 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 온도 환경과 $300 \pm 15\text{Lux}$ 의 조도 환경이 최적의 측정 정도를 얻을 수 있음을 밝혀낸 바 있다. 그리고 데오드라이트 시스템의 측정 결과에 따른 측정 정도 결과에 따라 기준 길이를 설정하는 기준자의 최적 높이가 1m이고, 2대 데오드라이트의 최적 시준 거리가 3~4m인 것도 알아내었다. 또한 데오드라이트의 시준 거리가 3m일 때 데오드라이트와 기준자 사이의 거리가 2, 3 및 4m에서 비교적 양호한 측정 정도를 구할 수 있었다.

본 연구에서는 상기의 연구 결과에 따른 측정 환경 및 조건에서 데오드라이트의 시준 거리가 4m일 때 데오드라이트와 기준자 사이의 거리에 따른 측정 정도를 구하고자 하였다. 또한 시준 거리가 3m인 측정 조건에서의 측정 정도 결과와 비교하여 최적의 측정 조건을 구하고자 하였다.

2. 데오드라이트 시스템의 관련 이론

2.1 데오드라이트 시스템의 측정 절차

데오드라이트 시스템은 2대 이상의 데오드라이트를 데이터 처리시스템에 RS-232 선으로 연결하여 측정을 수행한다. 먼저 2대 이상의 데오드라이트를 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 데오드라이트로 동시에 측정하여 표

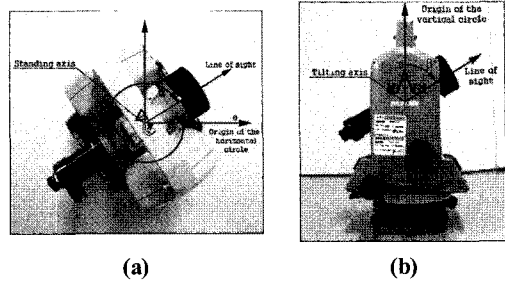


Fig. 2 Horizontal Angle(α) and Vertical Angle(β) of Theodolite

준 길이설정을 완료한 후 Fig. 1과 같이 타켓 번호 순서에 따라 데오드라이트를 측정 점에 맞추어 측정을 한다. 이때 데오드라이트의 시준 선(line of sight)이 3차원 공간의 측정 점을 교차하면서 삼각형이 형성된다. 이 측정 점은 Fig. 2의 (a)와 (b)와 같이 데오드라이트 기기 중심을 기준으로 시준 점까지 수평으로 이동한 수평 각 α_1 과 α_2 로 정의되고, 기기 중심을 기준으로 대물렌즈가 시준 점의 수직으로 이동한 수직 각 β_1 과 β_2 로 정의된다. 이 값들은 데이터 처리시스템의 오리엔테이션(orientation) 기능을 통하여 데오드라이트 1을 기준으로 하는 3차원 좌표 값들로 변환된다^(6,7). 본 연구에서는 Axyz라는 프로그램을 사용하여 측정된 3차원 좌표 값의 변환을 수행하였다.

2.2 측정 데이터의 계산

2.2.1 측정 정확도

본 연구에서의 측정 정확도는 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 고찰하는 데 사용하였다.

$$x' = \frac{(x_1 - y) + (x_2 - y) + \dots + (x_n - y)}{n} \quad (1)$$

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

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

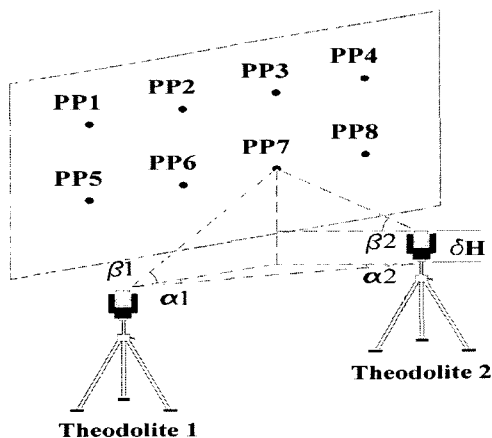


Fig. 1 Measurement Process of Target Points

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 테오드라이트에 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. 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^(9,10).

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

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 표본 크기로 측정값의 개수를 나타낸다. $t(\phi, \alpha/2)$ 는 자유도 $\phi = n - 1$ 일 때 신뢰 수준에 따른 t 인자의 값으로 측정 정도 계산 시 2.074로 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 망원경부까지를 1.5m 높이에 설치하였다. 그리고 테오드라이트의 설치 위치는 교정이 완료된 테오드라이트에 의하여 정확한 거리를 측정한 후 바닥 면에 타켓을 설치하였다. 이 타켓을 이용하여 테오드라이트 자체에 내장된 위치 확인용 렌즈를 통하여 타켓의 중심에 맞추어 $\pm 0.5\text{mm}$ 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 타켓은 기준자의 재질과 동일한 인바 재질로 된 3m 길이의 타켓 바(target bar) 위에 0.01mm의 중심 지름을 가진 24개의 타켓을 임의의 길이로 부착하였다. 이들 타켓 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 간의 거리에 따른 측정 정확도 연구를 위하여 Fig. 3과 같이 2대의 테오드라이트를 4m, 기준자 높이를 1m 그리고 타켓의 높이를 1.5m로 위치시킨 상태에서 기준 자를 2 ~ 6m까지 1m 간격으로

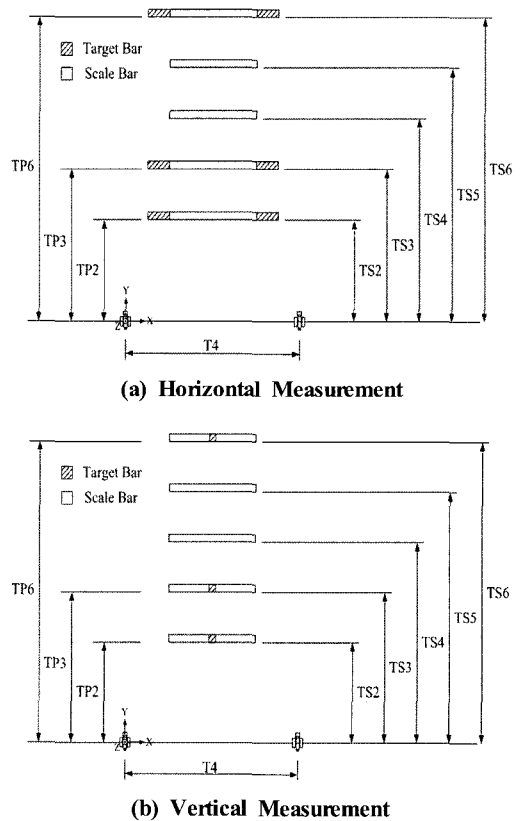


Fig. 3 Measurement Scheme of Distance Variables between TS of T4SH1PH1.5

하여 각 기준 길이를 설정하고 이에 따라 타켓 바를 2m, 3m, 6m에 위치시켜 각 측정 조건 당 4회의 반복 측정을 수행하였다. 테오드라이트로부터 타켓 바 사이의 측정 거리 중 4m와 5m를 생략한 것은 테오드라이트와 기준자 간에 기준 설정 거리에 따라 2m와 3m의 가까운 거리와 6m의 먼 거리에서의 측정값으로 측정 정확도를 알아낼 수 있을 것으로 판단하였기 때문이다.

본 논문에서는 이러한 측정 조건을 간단히 표시하기 위하여 2대의 테오드라이트 사이의 거리를 'T거리(m)', 기준자 높이를 'SH높이(m)' 그리고 타켓의 높이를 'PH높이(m)'로 나타내었다. 그리고 테오드라이트 시스템과 기준자 사이의 측정 형상은 'TS거리(m)'로 표시하였다. 또한 테오드라이트 시스템과 타켓 바의 형상은 'TP거리(m)'로 표시하였고, 타켓 바를 수평으로 한 경우 'H', 수직으로 한 경우 'V'로 표시하였다.

3.3 측정 결과

3.3.1 T4TP2에서의 측정 결과

T4TP2H의 측정 결과를 Fig. 4와 Table 1에 나타내었다. TS2~TS6에서 측정 정확도 -0.0214 ~ 0.0094mm, 측정 정밀도 0.0419 ~ 0.0506mm, 그리고 측정 정도 ±0.0181 ~ 0.0219mm를 나타내고 있다. 특히, TS3 ~ TS5에서 측정 정밀도가 높고 측정 정도가 비교적 양호한 것으로 나타나고 있다. TS2와 TS3의 경우 측정 정확도가 -0.0210mm와 -0.0214mm로 다른 측정 조건에 비하여 측정 오차 0의 값과 차이를 나타내고 있지만, TS4와 TS5의 경우 측정 정밀도는 TS3와 비슷하고 측정 정확도가 측정 오차 0의

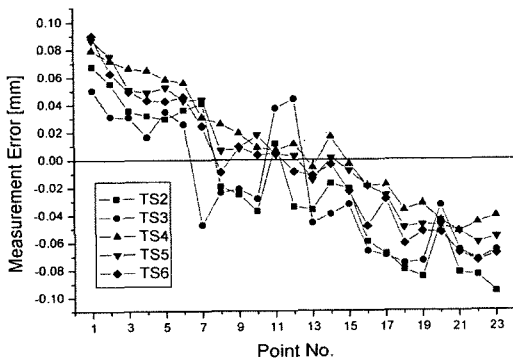


Fig. 4 Measurement Errors depending on TS of T4SH-1PH1.5TP2H

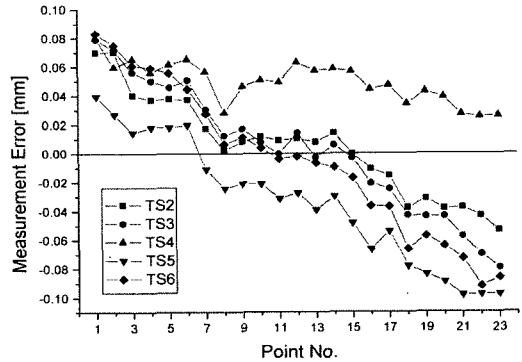


Fig. 5 Measurement Errors depending on TS of T4SH-1PH1.5TP2V

Table 1 Measurement System Accuracy depending on TS of T4SH1PH1.5TP2(unit : mm)

Measurement Configuration	Measurement Accuracy	Measurement Precision	Measurement System Accuracy	
T4TP2H	TS2	- 0.0210	0.0506	± 0.0219
	TS3	- 0.0214	0.0446	± 0.0193
	TS4	0.0094	0.0419	± 0.0181
	TS5	0.0026	0.0441	± 0.0191
	TS6	- 0.0059	0.0468	± 0.0202
T4TP2V	TS2	0.0045	0.0347	± 0.0150
	TS3	0.0021	0.0450	± 0.0195
	TS4	0.0494	0.0146	± 0.0063
	TS5	- 0.0341	0.0438	± 0.0189
	TS6	- 0.0055	0.0528	± 0.0228

값에 보다 근접하는 것으로 나타나고 있다.

T4TP2V의 측정 결과를 Fig. 5 및 Table 1에 나타내었다. TS4를 제외한 TS2, TS3, TS5 및 TS6에서 측정 정밀도가 0.0347 ~ 0.0528mm로 불안정한 측정 결과를 나타내고 있고, 측정 정도도 ±0.0150 ~ ±0.0228mm를 나타내고 있다. 이에 비하여 TS4에서는 0.0146mm의 측정 정밀도와 ±0.0063mm의 측정 정도를 나타내고 있어 비교적 양호한 결과를 확인할 수 있으나 측정 정확도는 0.0494mm로 비교적 낮게 나타나고 있다. 그러나 이것은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 다른 측정 조건에서의 측정 정밀도가 낮고 불안정한 측정 정확도가 아니라, 안정된 측정 결과에 따른 측정 정확도로 사료된다.

3.3.2 T4TP3에서의 측정 결과

T4TP3H의 측정 결과를 Fig. 6 및 Table 2에 나타내었다. TS2 ~ TS6의 측정 조건에 따른 측정 결과는 측정 정확도 $-0.0093 \sim 0.0306\text{mm}$, 측정 정밀도 $0.0373 \sim 0.0534\text{mm}$, 측정 정도 $\pm 0.0161 \sim \pm 0.0231\text{mm}$ 로 T4TP2H와 비슷한 결과를 나타내고 있다. 여기서 TS2의 경우 다른 측정 조건에 비하여 측정 정도가 낮게 나타나고 있다. TS3의 경우 측정 정밀도가 0.0373mm 로 다른 측정 조건에 비하여 안정적인 측정이 수행되었음을 나타내고 있으나 측정 정확도가 0.0116mm 로 다른 측정 조건의 측정 결과와 차이를 나타내고 있다. TS4 및 TS5의 경우 비교적 양호한 측정 정확도와 측정 정밀도를 나타내고 있다.

T4TP3V의 측정 결과를 Fig. 7 및 Table 2에 나타내었다. TS2, TS3, TS5 및 TS6에서 측정 정밀도 $0.0241 \sim 0.0427\text{mm}$, 측정 정도는 $\pm 0.0104 \sim \pm 0.0185\text{mm}$ 로 나타

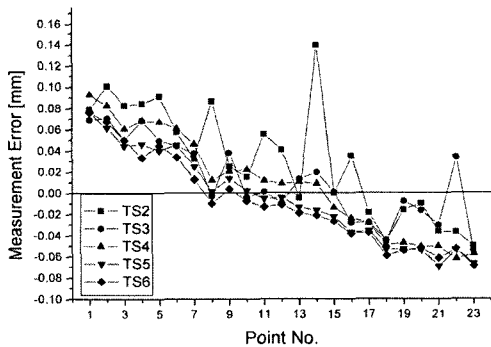


Fig. 6 Measurement Errors depending on TS of T4SH1PH1.5TP3H

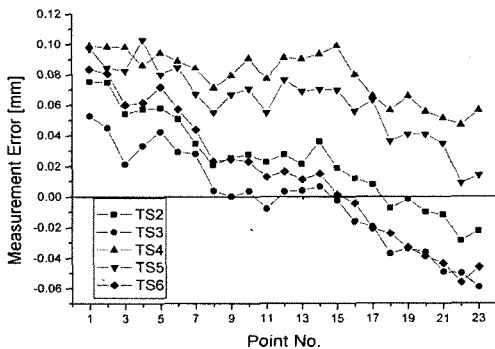


Fig. 7 Measurement Errors depending on TS of T4SH-1PH1.5TP3V

Table 2 Measurement System Accuracy depending on TS of T4SH1PH1.5TP3(unit : mm)

Measurement Configuration	Measurement Accuracy	Measurement Precision	Measurement System Accuracy	
T4TP3H	TS2	0.0306	0.0534	± 0.0231
	TS3	0.0116	0.0373	± 0.0161
	TS4	0.0081	0.0488	± 0.0211
	TS5	- 0.0057	0.0435	± 0.0188
	TS6	- 0.0093	0.0430	± 0.0186
T4TP3V	TS2	0.0234	0.0293	± 0.0127
	TS3	- 0.0018	0.0322	± 0.0139
	TS4	0.0789	0.0169	± 0.0073
	TS5	0.0619	0.0241	± 0.0104
	TS6	0.0138	0.0427	± 0.0185

나고 있어 T4TP2V의 조건과 비교하여 측정 결과가 좋아지는 것을 알 수 있다. 또한 TS4에서는 측정 정확도 0.0789mm , 측정 정밀도 0.0169mm 그리고 측정 정도 $\pm 0.0073\text{mm}$ 를 나타내고 있어 측정 정밀도 및 측정 정도에 있어서는 T4TP2V와 비슷하지만 측정 정확도에 있어서는 비교적 좋지 않은 결과를 나타내고 있다. 그러나 T4TS4TP3V의 측정 조건이 T4TS4TP2V에 비하여 안정적인 측정 거리인 것으로 판단되며, 이 두 가지 측정 조건에서 TS4의 측정 정확도 차이가 약 0.03mm 로 무시할 수 있는 측정 오차로 판단된다.

3.3.3 T4TP6에서의 측정 결과

T4TP6H의 측정 결과를 Fig. 8 및 Table 3에 나타내었다. TS2 ~ TS6의 경우 측정 정확도가 $-0.0234 \sim 0.0239\text{mm}$, 측정 정밀도가 $0.0272 \sim 0.0571\text{mm}$ 그리고 측정 정도가 $\pm 0.0118 \sim \pm 0.0247\text{mm}$ 를 나타내고 있다. 여기서 TS2의 경우 측정 정밀도가 0.0272mm 로 안정적으로 나타나고 있으나 측정 정확도가 0.0239mm 로 측정 오차 0의 값과 차이를 나타내고 있다. TS4의 경우 측정 정확도 0.0048mm , 측정 정밀도 0.0392mm , 그리고 측정 정도 $\pm 0.0170\text{mm}$ 로 안정된 측정 결과를 나타내고 있다. 그러나 TS3, TS5 및 TS6의 경우 측정 결과가 TS4와 비교하여 불안정한 것으로 나타나고 있다. 특히, 시준거리가 4m이고 데오드라이트와 기준자 사이의 거리가 2m, 3m 및 6m인 모든 측정 조건에서 TS2 및 TS6의 측정 결과가 좋지 않은 것

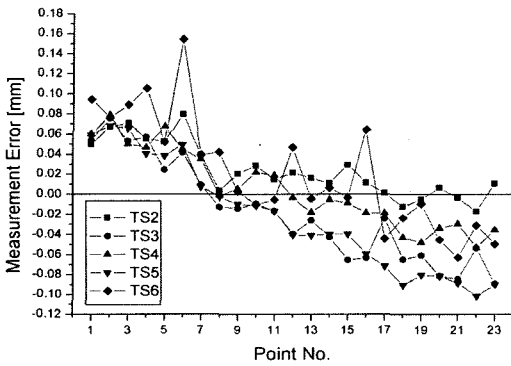


Fig. 8 Measurement Errors depending on TS of T4SH1PH1.5TP6H

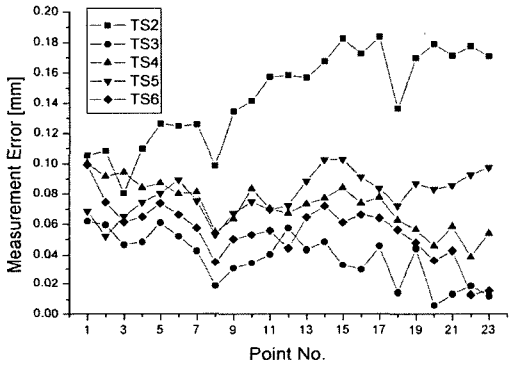


Fig. 9 Measurement Errors depending on TS of T4SH1PH1.5TP6V

Table 3 Measurement System Accuracy depending on TS of T4SH1PH1.5TP6(unit : mm)

Measurement Configuration	Measurement Accuracy	Measurement Precision	Measurement System Accuracy	
T4TP6H	TS2	0.0239	0.0272	± 0.0118
	TS3	- 0.0189	0.0500	± 0.0216
	TS4	0.0048	0.0392	± 0.0170
	TS5	- 0.0234	0.0559	± 0.0242
	TS6	0.0209	0.0571	± 0.0247
T4TP6V	TS2	0.1452	0.0306	± 0.0132
	TS3	0.0374	0.0170	± 0.0074
	TS4	0.0722	0.0159	± 0.0069
	TS5	0.0795	0.0138	± 0.0060
	TS6	0.0555	0.0191	± 0.0083

은 데오드라이트의 시준거리 및 기준자 사이의 거리에 따른 계기 오차에 의한 것으로 판단된다.

T4TP6V의 측정 결과를 Fig. 9 및 Table 3에 나타내었다. TS2를 제외하고 TS3 ~ TS6의 경우에 T4TP2V와 T4TP3V의 측정 조건과 비교하여 양호한 결과를 나타내고 있다. TS2의 경우 T4TP3V와 비슷한 측정 정밀도를 나타내고 있으나 측정 정확도가 0.1452mm로 T4TP2V와 T4TP3V의 측정 조건과 비교하여 감소하는 경향을 보이고 있다. TS3, TS4 및 TS5에서 측정 정확도는 0.0374 ~ 0.0795mm, 측정 정밀도는 0.0138 ~ 0.0170mm 그리고 측정 정도는 ±0.0060 ~ ±0.0074mm로 비교적 양호한 측정 결과를 나타내고 있다. TS6의 경우 측정 정밀도가 TS3 ~ TS5에 비하여 약간 낮은 0.0191mm이지만 측정 정확도 0.0555mm 그리고 측정 정도 ±0.0083mm로 비교적 양호한 측정 결과를 나타내고 있다.

3.4 측정 결과 고찰

3.3 절의 데오드라이트 시준 거리 4m에서 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. 이 측정 결과로부터 T4TP2, T4TP3 및 T4TP6의 측정 조건 중 TS3, TS4 및 TS5에서의 측정 결과가 TS2 및 TS6에 비하여 좋은 것을 알 수 있었다.

이에 따라 타켓의 수평 및 수직 측정 모두를 포함한 TS3, TS4 및 TS5의 각 측정 조건 중 측정 결과가 양호한 상위 3개의 측정 조건의 최대 값을 대표 값으로 하여 Table

Table 4 Measurement System Accuracy depending on TS in TP2, TP3 and TP6 in T4SH1PH-1.5HV(unit ; mm)

Measurement Configuration	Measurement Accuracy	Measurement Precision	Measurement System Accuracy	
T4TP2	TS3	- 0.0214	0.0450	± 0.0195
	TS4	0.0494	0.0419	± 0.0181
	TS5	- 0.0341	0.0441	± 0.0191
T4TP3	TS3	0.0116	0.0373	± 0.0161
	TS4	0.0789	0.0488	± 0.0211
	TS5	0.0619	0.0435	± 0.0188
T4TP6	TS3	0.0374	0.0500	± 0.0216
	TS4	0.0722	0.0392	± 0.0170
	TS5	0.0795	0.0559	± 0.0242

4에 나타내었다. Table 4에서와 같이 TS3, TS4 및 TS5의 측정 조건으로부터 측정 정확도는 $-0.0341 \sim 0.0795\text{mm}$, 측정 정밀도는 $0.0373 \sim 0.0559\text{mm}$ 그리고 측정 정도는 $\pm 0.0161 \sim \pm 0.0242\text{mm}$ 로 양호한 측정 결과를 나타내고 있다.

이상의 결과로부터 시준거리가 4m인 측정 조건에서는 TS3, TS4 및 TS5의 측정 조건에서 양호한 측정 결과를 얻을 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 2대의 테오드라이트 사이의 거리를 4m로 하여 테오드라이트 시스템과 기준자 간의 거리에 대한 측정 정확도, 측정 정밀도 및 측정 정도에 대한 연구를 수행하였다. 그리고 테오드라이트 사이의 거리가 3m인 측정 조건에서의 테오드라이트로부터 기준자 사이의 거리에 따른 측정 정도 결과를 비교하여, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 시준 거리가 4m인 측정 조건에서 TS3, TS4 및 TS5의 측정 조건 즉, 테오드라이트로부터 기준자 사이의 거리가 3m, 4m 그리고 5m에서 양호한 측정 결과를 얻을 수 있다.
- (2) 이때 상기의 측정 조건에서 테오드라이트로부터 타겟까지 거리를 2m, 3m 및 6m에 위치시켜 측정하는 경우 최대 측정 정도는 $\pm 0.025\text{mm}$ 이내로 발생한다.
- (3) 이에 따라 상기의 측정 결과와 시준 거리 3m에서의 최적의 기준자 거리인 TS2, TS3 및 TS4의 측정 결과를 모두 만족하는 측정 조건은 테오드라이트 시준거리가 3 ~ 4m이고 테오드라이트로부터 기준자 사이의 거리가 3 ~ 4m 즉 TS3~TS4인 것을 알 수 있다. 이때, 최대 측정 정도는 $\pm 0.022\text{mm}$ 이내임을 알 수 있었다.

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, No. 1, 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., 2004, *A Study on Measurement Accuracy Improvement of Theodolite System*, Chungnam Univ. Ph. D. Thesis.
- (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 KSPE Spring Conference*, pp. 131~134.
- (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.