

테오도라이트 시스템의 측정 오차 요인에 대한 연구

윤용식*, 이동주⁺

(논문접수일 2003. 5. 9, 심사완료일 2003. 6. 3)

A Study on Measurement Error Factors of Theodolite System

Yong-Sik Yoon*, Dong-Ju Lee⁺

Abstract

Theodolite measurement system is non-contacted 3-dimensional measurement system. The system accuracy is ± 0.5 mm or better for distance 0~100m. And the system is used for the measurement of a product of middle and large scale. This study is performed for the measurement error factors of the system. We could know that the main measurement error factors are temperature, illumination and skill. Also, we performed the study for the effect according to the height difference of scale bar.

Key Words : Theodolite(테오도라이트), Scale Bar(기준자), Target Bar(타겟 바), Measurement Error(측정오차), Line of Sight(시준선), Laser Tracker(레이저 추적기), Laser Scanner(레이저 스캐너), Photogrammetry System(사진 측정기)

1. 서론

현재 미래 산업으로 주목을 받고 있는 항공우주산업이나 핵 발전 및 융합 시설, 통신관련 산업 그리고 고속철도 등 중·대형 설비 및 장치 산업에 있어서 장비의 기능이 고도화됨은 물론이고 크기도 커지면서 형상도 복잡해지고 있다. 특히, 이러한 중·대형 설비 및 장치의 조립 및 제작 시 요구되는 형상 측정 정확도도 높아지고 있는 실정이다.

중·대형 생산 제품에 대한 형상 측정을 위해서는 비접촉식 3차원 정밀 측정 시스템을 사용해야 하며⁽¹⁾, 현재 사용되고 있는 측정 시스템으로는 ± 0.1 mm ~ ± 0.5 mm의 측정 정확도를 갖는 디지털 테오도라이트 측정시스템(Digital theodolite measurement system), 레이저 추적기(Laser tracker), 레이저 스캐너(Laser scanner) 및 사진 측정기(Photogrammetry system), 리니어 스케일(Linear scale)⁽²⁾ 등이 있다.

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

주소: 305-333 대전광역시 유성구 어은동 52번지

+ 충남대학교 기계공학과

미국, 프랑스, 호주 등에서는 1980년대부터 통신용 대형 안테나의 형상 측정, 위성체 및 항공기의 조립 등에 3차원 측정 시스템을 채택하여 사용하여 왔으나 1990년 중반 이후부터 두 가지 이상의 비접촉식 3차원 정밀 측정 시스템을 조합하여 요구되는 측정 정밀도를 높이기 위한 시도를 계속하고 있다.

국내에서는 1990년대부터 조선 및 항공기 산업에서 테오도라이트 측정 시스템을 사용하여 3차원 측정을 수행하기 시작했고, 1990년대 말부터 위성분야 및 광가속기의 측정 등으로 적용 범위가 확대되고 있는 추세이다⁽³⁾.

그러나, 상기의 3차원 정밀 측정 시스템이 광학 및 전자 기기로 구성되어 있으므로 3차원 측정을 수행하는데 있어서 측정 시스템의 설치에서부터 측정 수행까지 전 과정에 걸쳐 Fig. 1에 나타난 계기 오차, 환경 오차 및 개인 오차 등 여러 가지 측정 오차 요인이 발생할 수 있고⁽⁴⁾, 이러한 측정 오차 요인은 측정 결과에 영향을 미치게 되지만 현재까지 이에 대한 연구가 전무한 실정이다.

이에 따라 본 논문에서는 디지털 테오도라이트 측정 시스템의 측정 오차 요인에 대하여 고찰해보고자 하였다. 이를 위하여 환경 오차에 있어서 온도와 조도 변화에 따른 측정 오차, 개인 오차에 있어서 숙련도에 따른 측정 오차 그리고 과실 오차에 있어서 기준자 높이 변화에 따른 측정 오차를 오차 요인으로 선정하여 측정을 수행하였고, 이에 따른 각 측정 오차 요인에 대한 영향을 분석하고자 하였다.

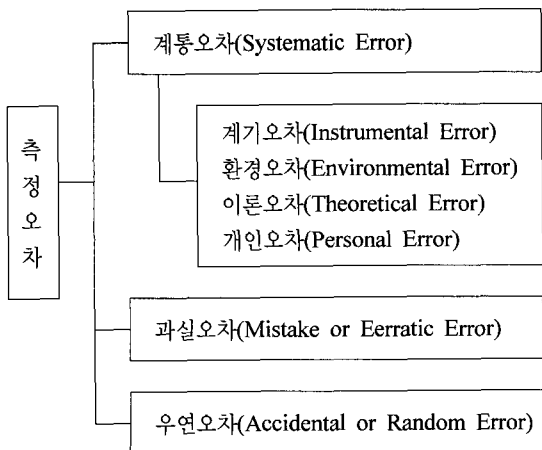


Fig. 1 A Kind of Measurement Error

2. 테오도라이트의 측정 이론

2.1 테오도라이트(Theodolite)의 구조

테오도라이트는 수평 및 수직각을 측정하는 장비이다. 일반적으로 테오도라이트는 건축 및 토목분야의 측지 측량에 많이 사용하고 있는 범용 테오도라이트로 알려져 있다. 그러나, 적용 대상에 따라 다양한 테오도라이트가 사용되고 있다. 측지 측량이나 거리의 측정 시 1대의 테오도라이트만으로 측정이 가능한 토탈 스테이션(Total station), 산업 구조물 등의 정밀 수평 측정 및 확인 시 사용되는 사이트 레벨(Sight level), 비 접촉식 3차원 정밀 측정 시 교차 측정(Inter-section measurement)용 테오도라이트가 있다.

비접촉식 3차원 측정에는 Fig. 2에서와 같이 0.5" (degree second)의 분해능(Resolution)을 가진 인코더(encoder)를 내장한 디지털 방식으로 운용되는 테오도라이트를 사용한다.

이와 같이 방향좌표 측정에서 필수장비인 테오도라이트는 Fig. 2에서와 같이 대안 렌즈 및 대물 렌즈를 가진 망원경부(Telescope), 인코더가 내장되고 타겟의 초점을 맞추기 위한 조절기 및 계기 조작판이 있는 본체부와 수평 및 수직을 조절하는 장치를 가진 받침부로 구성되어 있다.

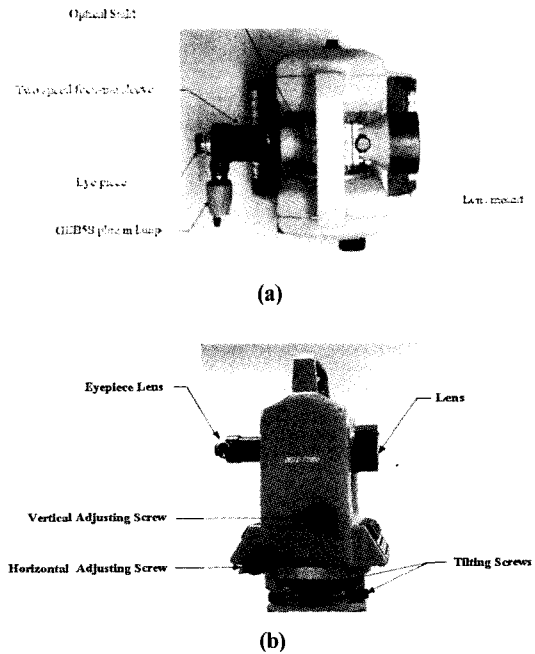


Fig. 2 Theodolite Construction

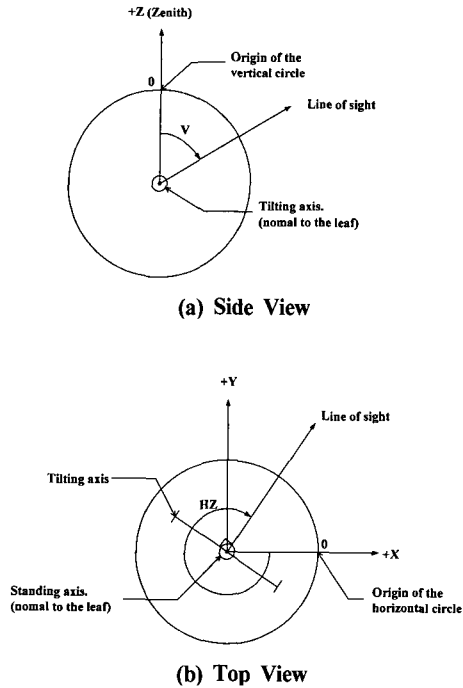


Fig. 3 Theodolite Coordination

2.2 데오도라이트의 좌표계

데오도라이트는 Fig. 3의 (a)와 같이 수직각(AV)이 측정되는 틸팅 축(Tilting axis)과 Fig. 3의 (b)와 같이 수평각(AH)이 측정되는 스탠딩 축(Standing axis)인 2개의 회전축이 있다. 데오도라이트의 좌표계는 직각 좌표계가 사용되어 X축은 데오도라이트의 수평 원판 위에 영점을 통하여 설정되고, Y 축은 수평 원판의 X축에 직각인 방향을 통하여 설정되며, Z 축은 오른손 법칙에 따라 다른 2 개의 축과 수직인 것으로 설정되어 운용된다. 이때 데오도라이트의 원점이 측정의 중심이 된다⁽⁵⁾.

2.3 데오도라이트 측정 각도의 계산

Fig. 4에서 타겟의 위치가 t_x, t_y, t_z 이고, 데오도라이트의 위치가 T_x, T_y, T_z , 데오도라이트의 회전각을 $T\omega, T\phi, Tk$ 라 하면, 측정을 위하여 데오도라이트를 회전하는 경우에 다음의 식을 이용하여 데오도라이트 각도 코사인 행렬을 구할 수 있다⁽⁶⁾.

$$\sin w = \sin(T\omega)$$

$$\cos w = \cos(T\omega)$$

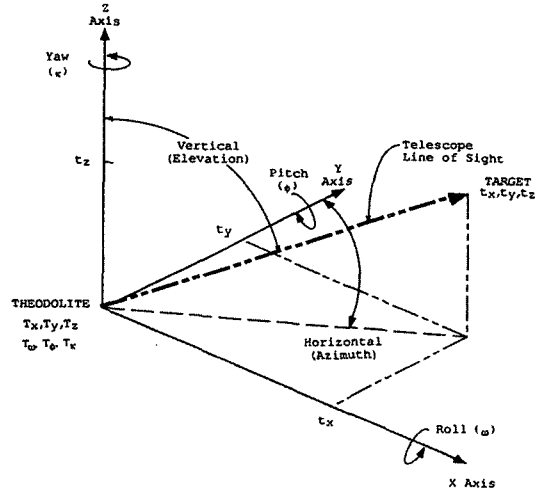


Fig. 4 Graphic of Axis System and Target with Vectors

$$\sin p = \sin(T\phi)$$

$$\cos p = \cos(T\phi)$$

$$\sin k = \sin(Tk)$$

$$\cos k = \cos(Tk)$$

$$m_{11} = (\cos p \cdot \cos k)$$

$$m_{12} = (\cos w \cdot \sin k) + (\sin w \cdot \sin p \cdot \cos k)$$

$$m_{13} = (\sin w \cdot \sin k) - (\cos w \cdot \sin p \cdot \cos k)$$

$$m_{21} = (-\cos p \cdot \sin k)$$

$$m_{22} = (\cos w \cdot \cos k) - (\sin w \cdot \sin p \cdot \sin k)$$

$$m_{23} = (\sin w \cdot \cos k) + (\cos w \cdot \sin p \cdot \sin k)$$

$$m_{31} = (\sin p)$$

$$m_{32} = (-\sin w \cdot \cos p)$$

$$m_{33} = (\cos w \cdot \cos p)$$

다음에 타겟과 데오도라이트 사이의 거리 인자는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$D_x = t_x - T_x$$

$$D_y = t_y - T_y$$

$$D_z = t_z - T_z$$

또한, 주어진 데오도라이트의 방향과 타겟까지의 방향 벡터는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$V_i = m_{11} \cdot D_x + m_{12} \cdot D_y + m_{13} \cdot D_z$$

$$V_j = m_{21} \cdot D_x + m_{22} \cdot D_y + m_{23} \cdot D_z$$

$$Vz = m_{31} \cdot Dz + m_{32} \cdot Dz + m_{33} \cdot Dz$$

그러므로, 테오도라이트의 수평각(AH)과 수직각(AV)은 다음 식에 의하여 구할 수 있다.

$$AH = \text{atan}(Vi/Vj)$$

$$AV = \text{atan}(\sqrt{Vi^2 + Vj^2}/Vk)$$

2.4 테오도라이트 측정 시스템의 측정 원리

테오도라이트는 수직 축(Vertical axis)을 기준으로 하여 수평각을 측정하며 수평 축(Horizontal axis)을 기준으로 하여 수직 각을 측정할 수 있는 장비다. 테오도라이트 자체에 설치되어 있는 높이 조절기(Tilting screw)를 조정하여 테오도라이트의 수직 축이 중력 반대방향이 되도록 함으로써 수직 각의 영점 기준을 설정한다⁽⁷⁾.

테오도라이트 측정 시스템은 Fig. 5와 같이 2대 이상의 테오도라이트를 데이터 처리시스템에 RS-232 선으로 연결하여 측정을 수행한다. 두 개 이상의 테오도라이트가 3차원 공간의 점들을 측정하기 위한 위치에 고정된다. 먼저, 두 테오도라이트를 마주 보면서 서로 기준을 맞추고, 기준자(Scale bar)에 두 개 이상의 점을 동시에 측정하여 표준 길이를 설정한다. 다음에 이들 테오도라이트가 동시에 측정 점을 맞추어 시준 선(Line of sight)이 3차원 공간의 측정 점을 교차하면서 삼각형이 형성된다. 이때 측정 점은 수평 각 $\alpha 1$ 과 $\alpha 2$ 로, 수직 각 $\beta 1$ 과 $\beta 2$ 로 정의된다. 이 값들은 테오도라이트 1을 기준으로 하는 3차원 좌표 값들로 변환된다.

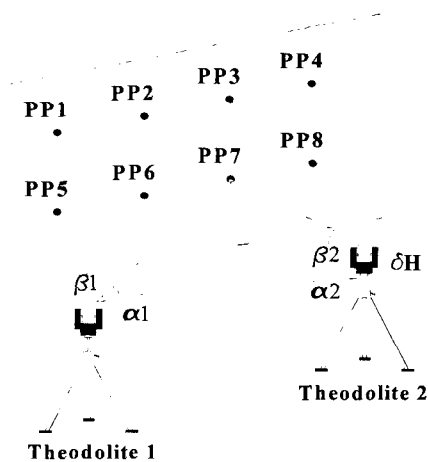


Fig. 5 Measurement Principle of Theodolite System

3. 측정 및 결과

3.1 측정 준비

테오도라이트는 자체의 교정 기능을 가지고 있으므로 자체 교정 과정을 통하여 수평, 수직 및 편심도를 측정 전에 먼저 교정한다. 테오도라이트 측정 시스템에 사용되는 기준자는 3차원 측정의 기준 값을 설정하는데 매우 중요한 역할을 하므로 교정이 매우 중요하다. 본 실험에서 사용된 기준자는 실온에서 열팽창률($1 \sim 2 \times 10^{-6} K^{-1}$)이 매우 작은 인바(Invar)의 재질로 제작된 것으로 한국표준과학연구원의 교정을 통하여 확장 불확도 ± 0.01 mm의 교정 검사를 완료한 후 사용하였다. 그리고, 테오도라이트의 설치 위치와 각 측정 거리별 측정 위치는 교정이 완료된 테오도라이트에 의하여 정확한 거리를 측정한 후 측정 점을 표시하였다.

3.2 측정

본 측정을 위한 측정 환경의 기준은 온도($20 \pm 2^\circ C$) 및 습도(50 ± 15 RH%)가 조절되는 청정실에서 수행되었다. 그리고 Fig. 6과 같이 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, 테오도라이트는 자체에 내장된 위치 확인용 렌즈를 통하여 바닥 면에 설치된 위치 확인용 타겟의 중심에 맞추어 설치하였다.

측정용 타겟은 Fig. 7과 같이 인바 재질로 된 3 m 길이의 기준자 위에 24개의 타겟을 부착하였다. 이들 타겟의 길이는 한국표준과학연구원의 교정을 통하여 1개의 점을 기준으로 23개의 점에 대한 상대길이들이 ± 0.01 mm의 정확도로 측정된 결과를 기준으로 하였다.



Fig. 6 Location of Vibration Sensor and Theodolite

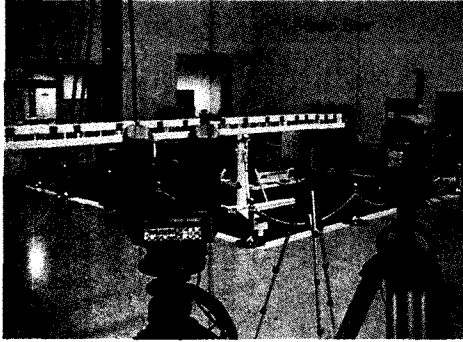


Fig. 7 Target on 3m Invar

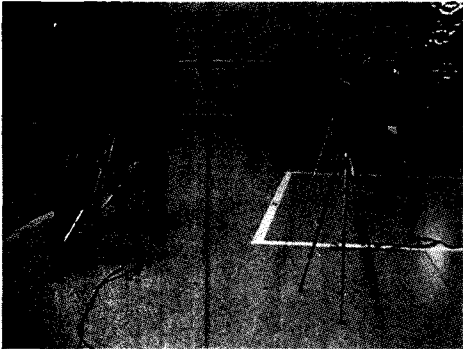


Fig. 8 Configuration of Theodolite Measurement

본 측정은 Fig. 8과 같이 두 대의 데오도라이트를 3 m 간격으로 설치하고, 2 m 길이의 기준자를 사용하여 길이 표준을 설정하였고, 데오도라이트와 타겟 바(Target bar) 사이의 거리를 5 m 떨어진 상태에서 각 항목 당 4회의 반복 측정을 수행하였으며, 측정 오차 결과에 있어서 많은 차이가 나는 항목은 재 측정하였다.

3.3 측정 결과 및 분석

3.3.1 온도변화에 따른 측정 오차

상기의 측정 조건에 따라 시스템을 설치하고 온도를 8 °C, 13 °C 및 20 °C인 상태에서 측정하였다. 측정 중 온도 변화율은 ±2.0 °C였다. Fig. 9에서 보여 지는 바와 같이 타겟 점의 순서에 따라 측정 오차가 20 °C인 경우에 -0.023 ~ + 0.067 (mm)로 ± 0.045 mm의 측정 오차를 나타내고 있다. 그러나 13 °C의 경우 +0.046 ~ -0.612 (mm)로 ±0.33 mm의 측정 오차를 보이고 있고, 8 °C의 경우 +0.025 ~ -0.708 (mm)로 ± 0.367 mm의 측정오차가 나타나 20 °C의 환경과 비교하여 큰 측정 오차를 보여주고 있다.

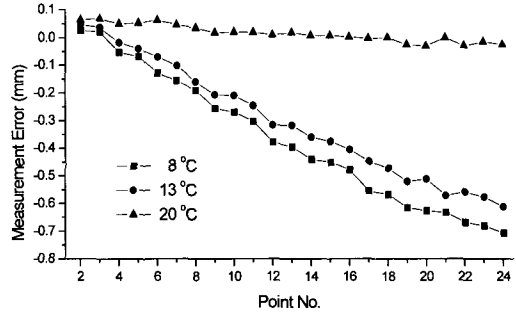


Fig. 9 Measurement Error for Temp. Difference

특히, 13 °C와 8 °C의 환경 하에서 타겟 번호가 증가할수록 측정 오차가 커지는 것은 측정 환경 온도에 따른 데오도라이트 장비 자체의 기기 측정 오차와 타겟 바로 사용된 인바가 비록 열팽창률이 작지만 온도 변화에 따른 변형이 원인인 것으로 판단된다.

3.3.2 조도 변화에 따른 측정 오차

상기와 동일한 조건으로 시스템을 설치하여 조도를 360 Lux, 300 Lux, 250 Lux, 200 Lux 및 150 Lux±15 Lux로 변화시키면서 측정하였다. 이때 측정은 타겟이 설치된 인바에서 양 끝단과 가운데 부분의 조도 차에 의해 가운데 부분의 18개의 타겟만을 측정하였다. Fig. 10에서 나타난 바와 같이 조도가 300 Lux에서 가장 안정적인 ± 0.012 mm의 측정 오차를 나타내고 있다.

이러한 원인은 Fig. 11에서 보여 지는 바와 같이 데오도라이트 측정용 타겟이 알루미늄 필름 재질로 제작되어 광량이 낮은 경우에서도 콘트라스트(Contrast)를 높여 측정 정확도를 높이도록 제작되었으나 광량이 낮은 경우 즉 250

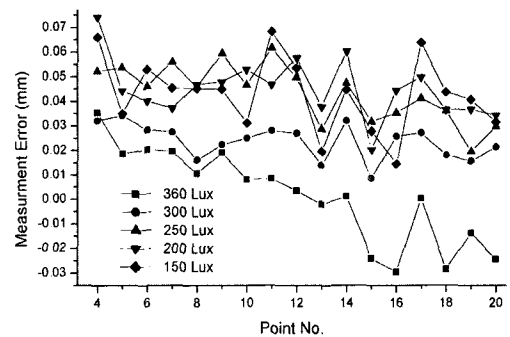


Fig. 10 Measurement Error for Illumination Difference

Lux이하의 경우 너무 낮은 조도로 인하여 측정자가 타겟의 중심부를 정확하게 시준하는 것이 어려웠기 때문이다. 또한 광량이 지나치게 높은 360 Lux의 경우 표면 표면에서의 난 반사로 인하여 측정자가 타겟 중심부의 형상을 파악하기 어려웠기 때문이다.

이를 통하여 300 Lux가 데오도라이트 측정용 타겟의 가장 적절한 조도로 판단되며, 측정 정확도에 측정 조도가 중요한 오차 요인이 됨을 알 수 있다.

3.3.3 숙련도에 따른 측정 오차

상기와 동일한 조건으로 측정 시스템을 설치하고, 시스템 측정 숙련자 2인과 비숙련자 2인에 의한 측정을 수행하였다. 여기서 숙련자는 최소 6개월 이상 측정 수행을 한 경험이 있는 사람들과, 비숙련자의 경우 1개월 이내의 비숙련자들로 구성하였다. Fig. 12에서와 같이 숙련자 2인에 의한 측정의 경우 측정 오차는 ± 0.012 mm이고 비숙련자 2인의 경우 측정 오차는 ± 0.034 mm를 나타내고 있다. 또한 숙련자와 비숙련자에 의한 측정 오차변화가 비숙련자 2인에 의한 측정 보다 큰 경우가 발생하고 있다. 이것은 두 대의 데오도라이트로 측정하면서 측정된 데이터 중 하나가 다른 하나와 큰 차이가 나는 경우에 발생한다. 또한 숙련자

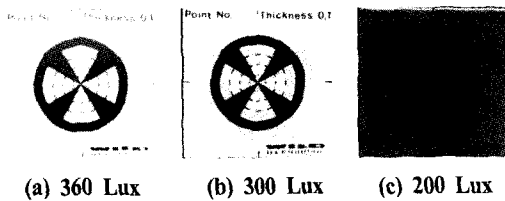


Fig. 11 Target Views for Various Light Conditions

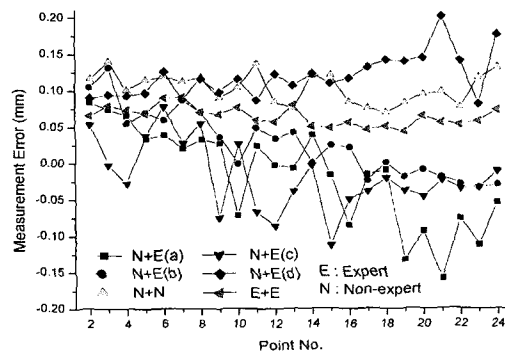


Fig. 12 Measurement Error for Expert vs. Non-Expert

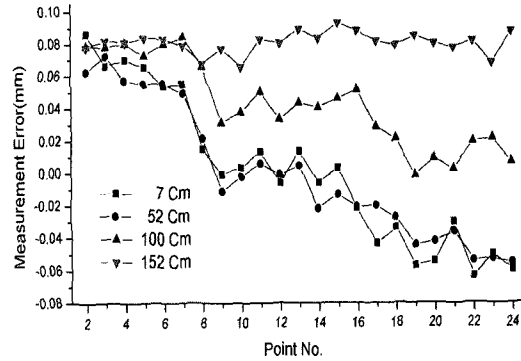


Fig. 13 Measurement Error for Height Difference of Scale Bar

와 함께 측정함으로써 비숙련자끼리 측정하는 것 보다 긴장감이나 부담감이 덜하여 집중력이 떨어지는 것으로 판단된다.

3.3.4 기준자 높이 변화에 따른 측정 오차

상기와 동일한 측정 조건하에서 기준자의 높이를 100 cm로 하고 타겟이 부착된 인바를 7 cm, 52 cm, 100 cm 및 152 cm로 높이 변화를 한 후의 측정 오차를 Fig. 13에 나타내었다. 152 cm의 경우 ± 0.013 mm의 측정 오차를 나타내고 있고, 7 cm, 52 cm 및 100 cm의 경우 측정오차가 ± 0.074 mm로 매우 큰 것을 알 수 있다. 이것은 기준자의 높이와 측정 타겟의 높이가 동일하다고 할지라도, 데오도라이트의 시준 각도가 기준 높이보다 약간 높은 높이에서의 측정이 더 정확하다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

중대형 대상물의 비접촉식 3차원 정밀 측정 장비인 데오도라이트 측정 시스템에 대한 기초적인 연구가 전무한 상태에서 본 연구가 수행되었다.

본 연구에서는 데오도라이트 측정 시스템의 정밀 측정에 있어서 다음과 같이 가장 영향력이 큰 변수를 결정하고 이에 대한 측정 오차 요인에 대한 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 데오도라이트 시스템을 이용한 측정에 있어서 온도의 변화는 데오도라이트 자체 및 측정 대상물의 온도 변화에 따라 큰 영향력이 있다. 따라서 이에 대한 측정 오차를 줄이기 위해서는 측정 시 측정 대상물이나 측정 환경에서의 약 $20 \pm 2.0^\circ\text{C}$ 의 적절한 환경 조성이 필요하고, 이에 대한 환경 조성이 불가능한 경우에 측정 대상물의 온도 팽창율에

대한 계산을 통하여 측정 오차를 보상해야 할 것으로 판단 된다.

둘째, 조도 변화의 경우 측정 오차에 큰 영향을 미치는 것을 알았고, 너무 밝은 경우에도 측정 오차가 발생하므로 측정 시 300 ± 15 Lux 정도의 적절한 조도 환경을 조성하는 것도 필요하다는 것도 알게 되었다.

셋째, 측정인원에 대한 숙련 정도로 테오도라이트는 0.5 초(Second degree)의 분해능을 가진 인코더(encorder)가 내장되어 있으므로 약간의 움직임이나 외란에도 측정 정확도에 많은 영향을 주게 된다. 따라서, 본 연구 결과를 통하여 얻어진 테오도라이트 시스템의 측정에 대한 숙련자와 비숙련자에 의한 측정 오차 결과는 매우 의미있는 것이라 하겠다. 따라서 테오도라이트 시스템의 측정에 있어서 최소 6개월 이상의 측정 숙련자에 의한 측정이 보다 정밀한 측정 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

네째, 테오도라이트 측정 시 가장 중요한 인자 중 하나인 기준자의 높이 변화에 따른 측정 오차는 측정 시 기준자의 위치와 측정 위치와의 상관관계를 알 수 있게 하였다.

마지막으로 측정 오차 영향에 있어서 온도변화에 따른 영향이 조도, 숙련도 및 기준자 높이 변화에 따른 측정 오차에 비하여 매우 크므로, 측정 결과에 따라 온도에 대한 보정이 필요하고, 이에 대한 연구가 더 필요하다.

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", *Trans. of KSMTE*, 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", *Trans. KSMTE*, Vol. 12, No. 12, pp. 53~58.
- (3) Lee, G. T., Lee, D. J., Yoon, Y. S., Park, H. C. and Oh, J. M., 2003, "A Study on Measurement Uncertainty of Theodolite System", *Proceeding of KSMTE Spring Conference*, pp. 229~234.
- (4) Jung, R. S., 1998, *KRISS Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, KRISS, pp. 74~76.
- (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 KSPE Spring Conference*, pp. 131~134.
- (6) Sandwith, S. C., 1993, *Gageless Tool Building with Computer-Aided Theodolites*, Leica Practice Report, Leica co. Ltd.
- (7) Choi, J. Y., Yoon, Y. S. and Lee, J. J., 1998, "Measurement Method and Results of Satellite Alignment", *Proceedings of KAAM Fall Conference*, pp. 515~518.