

데오도라이트 시스템의 측정 오차 요인에 관한 연구

박홍철*, 윤용식, 최석원(한국항공우주연구원 우주시험그룹)

A Study on Measurement Error Factors of Theodolite System

H. C. Park, Y. S. Yoon, S. W. Choi (Space Test Department, KARI)

ABSTRACT

Theodolite measurement system is non-contacted 3-dimensional measurement system. The system accuracy is 0.5 mm or better for distance 0 ~ 100 m. And the system is used for the measurement of a product for middle and large scale. This study was performed for finding the measurement error factors of the system. We could know that the main error factors are temperature, illumination and expertness. And we could find the measurement errors are ± 0.045 mm at temperature conditions is 20°C and ± 0.012 mm at illumination condition is 300 lux. Also the results had significant differences by combinations of operator's expertness.

Key Words : Theodolite (데오도라이트), Measurement Error Factors (측정오차요인), Scale Bar(기준자)

1. 서론

산업이 선진화, 고도화됨에 따라 생산품은 고집적화, 고정밀화 되어 간다. 그러나 현재 미래 산업으로 주목을 받고 있는 항공우주산업이나 핵 발전 및 융합시설, 통신관련 산업 그리고 고속철도 등의 분야에서는 요구되는 측정 정확도를 만족하기 위하여 계속하여 대형장비를 요구하면서도 더욱 정밀한 기능을 요구하고 있는 실정이다. 이렇게 중대형이면서도 더욱 고도의 기능을 요구하는 첨단 시설물이나 제품의 경우에 그 형상도 다양하다. 따라서 이에 대한 가장 기본적인 형상 측정에 있어서 비접촉식 3차원 정밀 측정시스템을 개발하고 적용하고 있다.

현재 중대형 대상물에 대한 비접촉식 3차원 정밀 측정 시스템으로는 디지털 데오도라이트 측정시스템(Digital Theodolite Measurement System), 레이저 추적기(Laser Tracker), 레이저 스캐너(Laser Scanner) 및 사진 측정기(Photogrammetry System) 등이 있으며, 최대 정밀도는 약 0.5 mm 이다.

현재 미국, 프랑스 호주 등 산업 선진국에서는 상기 측정 시스템을 조합하여 각 시스템 별 장점을 활용하여 보다 정밀한 측정 정밀도를 위한 기술적 연구 및 시도가 계속되고 있다.⁽¹⁾

본 논문에서는 현재 항공우주분야 및 중공업 분야 등에서 많이 사용되고 있는 디지털 데오도라이트 측정 시스템의 측정 오차 요인에 관한 연구 결과를 기술하였다. 비접촉식 광학측정 장비인 데오도라이트 측정 시스템의 경우, 정밀 측정 시 온도, 조도 및 측정자의 측정 숙련도에 따라 측정오차가 0.02 ~ 0.367 mm까지의 차이가 발생하고 있다.

2. 측정 오차 요인

2.1 측정오차의 개요

측정의 오차는 Fig. 1과 같이 계통오차, 과실 오차 및 우연오차로 구분된다.⁽²⁾

계통오차에는 측정기기를 제작할 때의 불완전성이나 마모, 손실 등에서 오는 계기오차, 측정하는 장소의 온·습도 등과 같은 환경조건에 의하여 발생하는 환경오차, 복잡한 이론식을 실제로 적용시키기 편리하도록 사용한 근사식에서 오는 이론오차, 측정하는 습관 등에서 오는 개인오차 등이 있다 이러한 계통오차는 측정기기의 교정 검사 및 보정, 측정 장소의 환경조절, 정확한 이론식의 사용, 측정자의 기숙달 및 주의 등으로 그 크기를 줄일 수 있다.

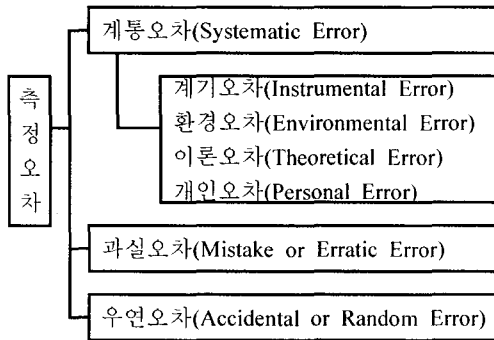


Fig. 1. A Kind of Measurement Error

과실오차는 측정절차의 잘못 적용, 측정값의 잘못 읽음, 측정 결과의 잘못 등으로 발생하는 것으로 계통오차와 마찬가지로 측정인의 숙달 등으로 어느 정도 그 크기를 줄일 수 있다.

계통오차나 과실오차는 오차가 없는 계기의 사용, 엄격한 환경의 적용 등으로 완전히 없앨 수 있다. 그러나 이러한 계통오차나 과실오차를 완전히 제거하여도 불분명한 많은 미소한 원인이 독립적이고 불규칙적으로 작용하여 피할 수 없이 나타나는 오차를 우연오차라고 한다. 우연오차의 원인으로는 기온의 미소한 변동, 측정기기의 미세한 탄성적 진동, 측정기기 접촉부의 전기 저항의 변화, 측정자의 주의 산만 등 수 많은 요인이 있을 수 있다.

2.2 데오도라이트 측정시스템에서의 측정 오차 요인

데오도라이트 측정시스템을 사용하여 3차원 측정을 수행하는데 있어서 측정시스템의 설치에서부터 측정 수행까지 전 과정에 걸쳐 Fig. 1에 나타난 계기 오차, 환경오차 및 개인오차 등 여러 가지 측정 오차 요인이 발생한다. 이러한 측정 오차 요인은 측정 결과에 큰 영향을 미치게 된다.

특히, 데오도라이트 측정 장비의 경우 광학 및 전자 장치가 혼합된 장비로 여러 가지 외부 요인 및 측정자의 숙달 정도 등으로 인하여 측정 정확도에 많은 영향을 받는다.

현재까지 데오도라이트 측정시스템에 대한 정확한 측정 오차 요인에 대한 시험이나 연구가 전무한 실성이므로 본 연구에서는 광학 및 전자 장치에 많은 영향을 주는 다음의 요인을 선정하여 측정을 수행하였다.

- (1) 환경 오차 : 온도변화에 따른 측정 오차
조도변화에 따른 측정 오차
- (2) 개인 오차 : 숙련도에 따른 측정 오차

3. 측정 및 결과

3.1 데오도라이트 측정시스템의 측정 방법

데오도라이트는 수직축을 기준으로 하여 수평각을 측정하여 수평축을 기준으로 수직각을 측정할 수 있는 장비다. 데오도라이트 자체에 설치되어 있는 기울기 조절장치를 조정하여 데오도라이트의 수직축이 중력 반대방향이 되도록 함으로써 수직 각의 영점 기준을 설정한다.⁽³⁻⁴⁾

데오도라이트 측정 시스템은 Fig. 2와 같이 2대 이상의 데오도라이트를 데이터 처리시스템에 연결하여 측정을 수행한다. 두 대 이상의 데오도라이트가 3차원 공간의 점들을 측정하기 위한 위치에 고정된다. 먼저, 두 데오도라이트를 마주 보면서 서로 기준을 맞추고 스케일 바(Scale Bar)에 두 개 이상의 점을 동시에 측정하여 표준 길이를 설정한다. 다음에 이들 데오도라이트가 동시에 측정 점을 맞추어 시준선(line of sight)이 3차원 공간의 측정 점을 교차하면서 삼각형이 형성된다. 이때 측정점은 수평각 α_1 과 α_2 로 수직 각 β_1 과 β_2 로 정의된다. 이 값들은 데오도라이트 1을 기준으로 하는 3차원 좌표 값들로 변환된다.

3.2 측정

3.2.1 측정준비

데오도라이트는 자체의 교정 기능을 가지고 있으므로 자체 교정 과정을 통하여 수평, 수직 및 편심도를 측정·교정한다. 데오도라이트 측정 시스템에 사용되는 기준자는 3차원 측정의 기준값을 설정하는데 매우 중요한 역할을 하므로 교정이 매우 중요하다.

본 실험에서 사용된 기준자는 실온에서 열팽창율($1 \sim 2 \times 10^{-6} K^{-1}$)이 매우 작은 인바(Invar)의 재질로 제작된 것으로 한국표준과학연구원의 교정을 통하여 불확도 ± 0.01 mm를 교정 검사를 완료한 후 사용하였다. 그리고 데오도라이트의 설치 위치와 각 측정거리별 측정 위치는 교정이 완료된 데오도라이트에 의하여 정확한 거리를 측정된 후 측정 점을 표시하여 측정을 수행하였다.

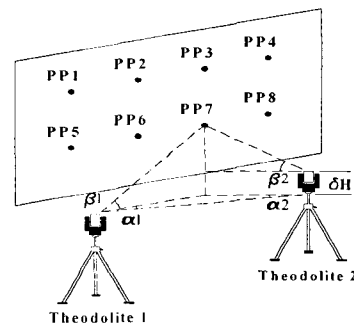


Fig. 2 Measurement Principle of Theodolite System



Fig. 3 Configuration of Theodolite Measurement

3.2.2 측정

본 측정을 위한 측정 환경의 기준은 온도($20 \pm 2^\circ\text{C}$) 및 습도($50 \pm 15\text{ RH}\%$)가 조절되는 청정실에서 수행되었다. 그리고 측정 중 자체의 진동이나 외부로부터의 진동에 따른 측정 외란 등을 감시하기 위하여 진동센서를 바닥에 설치하여 측정 중 수시로 감시하였고, 측정 완료 후 진동치가 많은 경우 재측정하였다.

측정용 타겟은 인바의 재질로 된 3 m 길이의 기준자 위에 24개를 부착하였다. 이들 타겟 간의 길이는 한국표준과학연구원의 교정을 통하여 1개의 점을 기준으로 23개의 점에 대한 상대길이를 $\pm 0.01\text{ mm}$ 의 정확도로 측정한 결과를 기준으로 하였다.

본 측정은 Fig. 3과 같이 두 대의 데오도라이트를 3 m 간격으로 설치하고, 데오도라이트와 타겟 사이의 거리를 5 m 떨어진 상태에서 각 항목 당 4회의 반복 측정을 수행하였고, 측정 오차 결과에 있어서 많은 차이가 나는 항목은 재측정하였다.

3.3 측정 결과 및 분석

3.3.1 온도변화에 따른 측정 오차

상기 3.2절의 측정조건에 따라 측정시스템을 설치하고 온도만을 변화시켜 8°C , 13°C 및 20°C 인 상태에서 측정하였다. 측정 중 온도 변화율은 $\pm 2.0^\circ\text{C}$ 였다. 측정결과는 Fig. 4에서와 같이 20°C 인 경우에 $-0.023 \sim +0.067\text{ (mm)}$ 로 $\pm 0.045\text{ mm}$ 의 측정오차를 나타내고 있다. 그러나 13°C 의 경우 $+0.046 \sim -0.612\text{ (mm)}$ 로 $\pm 0.33\text{ mm}$ 의 측정 오차를 보이고 있고, 8°C 의 경우 $+0.025 \sim -0.708\text{ (mm)}$ 로 $\pm 0.367\text{ mm}$ 의 측정 오차가 나타나 20°C 와 비교하여 큰 측정 오차를 보여주고 있다.

이러한 이유는 데오도라이트 장비 자체의 온도에 대한 기기측정 오차와 24개의 타겟이 설치된 3 m 길이의 인바의 온도 변화에 따른 인바의 변형이 원인인 것으로 판단된다.

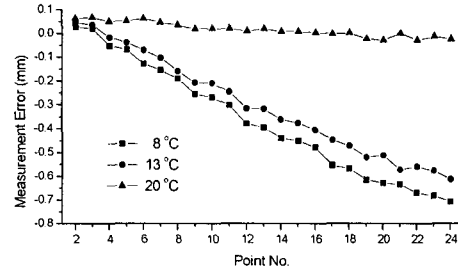


Fig. 4 Measurement Error for Temp. Difference

3.3.2 조도변화에 따른 측정 오차

상기 3.2절의 측정조건에 따라 시스템을 설치하고 조도만을 변화시켜 360 lux, 300 lux, 250 lux 및 $150\text{ lux} \pm 15\text{ lux}$ 로 변화시키면서 측정하였다. 이때 측정은 타겟이 설치된 인바의 양 끝단과 가운데 부분의 조도 차에 의해 가운데 부분의 18개 타겟만을 측정하였다. Fig. 5에서 나타난 바와 같이 300 lux와 비교하여 250 lux, 150 lux의 경우 조도가 낮은 경우 측정 정확도가 매우 불안하게 나타나고 있다. 그리고, 조도가 가장 밝은 360 lux 보다 300 lux인 경우의 측정오차가 오히려 안정적으로 $\pm 0.012\text{ mm}$ 측정 오차를 나타내고 있다.

이것은 Fig.6에서 보이는 바와 같이 데오도라이트용 타겟은 조도가 낮은 상태에서도 콘트라스트(Contrast)를 높여 측정정확도를 높이도록 제작되었으며 재질이 알루미늄 필름이므로 조도가 지나치게 높을 경우 표면에서의 난반사로 인해 측정자가 명확

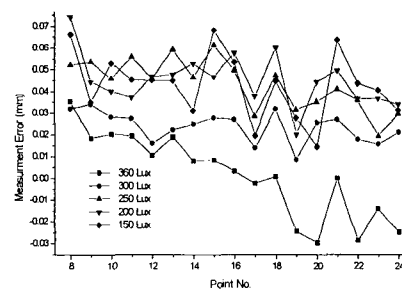


Fig. 5 Measurement Error for Illumination Difference



(a) 360 lux (b) 300 lux (c) 200 lux

Fig. 6 Target Views for Various Light Conditions

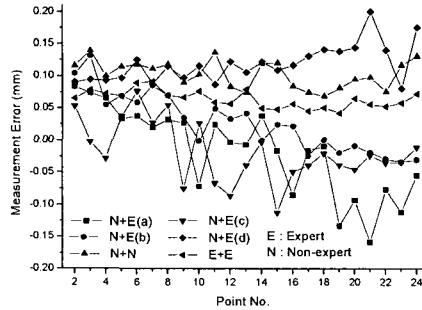


Fig. 7 Measurement Error for Expert vs. non-expert

한 중심부 형상을 파악하기 어렵기 때문이다.

3.3.3 숙련도에 따른 측정 오차

상기 3.2절의 측정조건에 따라 시스템을 설치하고 시스템 측정 숙련자 2인과 비숙련자 2인에 의한 측정을 수행하였다. 여기서 숙련자는 최소 6개월 이상 측정 수행을 한 경험이 있는 사람들이고, 비숙련자의 경우 1개월 미만의 측정 경험을 가진 사람들로 구성되었다.

숙련자 2인에 의한 측정의 경우 측정 오차는 ± 0.012 mm이고 비숙련자 2인의 경우 측정 오차는 ± 0.034 mm를 나타내고 있다. 또한 숙련자와 비숙련자의 측정오차가 비숙련자 2인에 의한 측정보다 큰 경우가 발생하고 있다. 이것은 두 대의 데오도라이트로 측정하면서 측정된 데이터 중 하나가 다른 하나와 큰 차이가 나는 경우에 발생한다. 또한 숙련자와 함께 측정하므로써 비숙련자끼리 측정하는 것보다 긴장감이나 부담감이 덜하여 집중력이 떨어지는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 데오도라이트 측정 시스템에 대한 기초적인 연구가 전무한 상태에서 수행되었다.

본 연구에서는 데오도라이트 측정 시스템의 정밀 측정에 있어서 다음과 같이 측정 오차를 유발하는 주요한 요인과 그 대책을 확인할 수 있었다.

첫째, 온도의 변화는 데오도라이트 자체 및 측정 대상물의 온도 변화에 따라 큰 영향을 줄 수 있으므로 이에 대한 측정 오차를 줄이기 위해 측정 대상물이나 측정 환경을 약 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 를 유지할 수 있도록 하고, 이것이 불가능할 경우에는 측정 대상물의 온도 팽창율에 대한 계산을 통하여 측정 오차를 보상해야 할 것으로 판단된다.

둘째, 조도 변화의 경우 측정 오차에 큰 영향을 미치는 것을 알았고, 지나치게 높은 조도 상태에서

도 측정 오차가 발생할 수 있으므로 측정시 300 ± 15 lux 정도의 적절한 조도 환경을 조성하는 것도 필요하다는 것을 알게 되었다.

셋째, 측정인원에 대한 숙련 정도로 데오도라이트는 0.5 second degree의 분해능을 가진 인코더(encoder)가 내장되어 있으므로 약간의 외란에도 측정 정확도에 많은 영향을 주게 된다. 따라서 본 연구 결과를 통하여 얻어진 데오도라이트 시스템의 측정에 대한 숙련자와 비숙련자에 의한 측정 오차 결과는 매우 의미 있는 것이라 하겠다. 따라서 데오도라이트 시스템의 측정에 있어서 최소 6개월 이상의 측정 숙련자에 의한 측정이 보다 정확한 측정 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

앞으로 본 연구를 통하여 얻어진 측정 자료를 기준으로 데오도라이트 시스템의 계기오차요인에 대한 연구 및 또 다른 환경 오차 요인에 대한 연구를 계속 수행할 계획이며 좀 더 심화된 측정 오차 요인 연구는 측정시스템에 대한 신뢰도 및 측정 기술에 대한 새로운 기준으로 사용될 수 있을 것으로 예상된다.

후기

본 연구는 정보통신부와 선도기반기술개발사업(과제번호 : IMT2000-A1-2)에 의한 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자께 감사드립니다.

참고문헌

1. Y. S. Yoon, D. J. Lee, "Measurement Technology and Trend of 3-Dimension Precision Coordinate - Non-Contacted 3-Dimension Precision Measurement of Middle · Large Structure", Journal of the KSMTE, Vol. 11, No. 1, pp. 7~13, 2002.
2. R. S. Jung, KRISSE Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, KRISSE, 1998.
3. J. Y. Choi, Y. S. Yoon, J. J. Lee, "Measurement Method and Results of Satellite Alignment", Proceedings of the KAAM Fall Conference, pp. 515~518, 1998.
4. Y. S. Yoon, J. Y. Lee, C. R. Cho, S. S. Lee, "3-Dimensional Precision Measurement of Spacecraft Structure Test Model", Proceedings of the KSPE Spring Conference 2001, pp. 131 ~ 134.
5. Scott C. Sandwith, Gageless Tool Building with Computer-Aided Theodolites, Leica Practice Report, Leica co. Ltd., 1993.