

EDM 장비의 검교정을 위한 정밀 기선장 관측 및 보정계수 산정 Precise Baseline Measurement and Computation of Correction Factor For EDM Instrument Calibration

조재명¹⁾ · 윤홍식²⁾ · 이원춘³⁾

Jae-Myoung Cho · Hong-Sic Yun · Won-Choon Lee

¹⁾ 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정(E-mail:jmcho@geo.skku.ac.kr)

²⁾ 성균관대학교 토목환경공학과 조교수(E-mail:yhs@geo.skku.ac.kr)

³⁾ 성균관대학교 토목환경공학과 석사과정(E-mail:s252@geo.skku.ac.kr)

요 지

The electronic distance measurement instrument, first introduced in the 1950s has, since those early days, undergone continual refinement. Rapid advances in related technologies have provided lighter, smaller and more precise equipment. Understanding for the principle, the standardized observation technique and the precision of EDM instrument is mostly important to improve the quality and the reliability of by-product in the field of engineering and industrial surveying. Simple and accurate calibration is regularly and periodically necessary to maintenance the precision of EDM instrument. This paper describes the calculated example of zero error and scale error as a correction of EDM by applying the least square method to baseline observations. Here we deals also with the testing criteria for precision instrument testing according to different types of EDM instruments.

1. 서 론

EDM(Electronic Distance Measurement) 장비는 전파에너지를 발사하여 이 전파에너지가 다른 쪽으로부터 반사되어 되돌아오는 시간을 측정하여 두 지점 사이의 거리를 결정할 수 있는 장비로써, 1950년대 최초의 상용화된 EDM 장비가 소개된 이후 전자기술과 광학기술의 발전에 힘입어 소형화, 정밀화됨으로써 현재에는 측량뿐만 아니라 정밀한 길이의 관측을 필요로 하는 과학기술분야에 까지 널리 활용되고 있다. EDM 장비는 사용하는 전파에너지의 종류에 따라 광파(lightwaves, electro-optical) 방식과 극초단파(microwaves, electromagnetic) 방식으로 분류하며, 광파 방식의 EDM 장비는 극초단파 방식의 EDM 장비에 비하여 소형이며, 조작이 간단하다는 장점으로 인해 최근에는 대부분 광파 방식의 EDM 장비를 사용하고 있다(Torge, 2001).

일반적인 EDM 장비의 관측거리 범위는 1소자 반사프리즘의 경우 수 m~ 수 km 이며, 그 정밀도는 수 mm 정도이다. EDM 장비를 이용하여 거리를 관측할 때 발생하는 오차는 외적오차와 내적오차로 구분할 수 있으며, 특히, 광파 방식 EDM 장비의 경우 내적오차에는 영점오차(zero error), 축척오차(scale error), 주파수오차(cyclic error), 위상측정오차(phase measurement error) 등이 있고 외적오차에는 대기 굴절오차(atmospheric refraction error)가 있다. 내적오차는 EDM 장비와 반사프리즘의 불완전성 때문에 발생하는 오차로써 영점오차, 축척오차, 주파수오차는 정오차에 해당하며, 위상측정오차는 우연오차에 해당한다. 이러한 오차 중 정밀한 거리가 결정된 여러 개의 기선을 반복 관측함으로써 산정 할 수 있는 오차에는 영점오차와 축척오차가 있으며, 이들 오차를 EDM 장비의 Calibration을 통하여 구하여지는 보정계수(correction factor)라 한다. EDM 장비의 보정계수는 장비 제작업체에서 장비 제작 시 산정하여

제공되지만 장비를 사용함에 있어서 여러 가지 요인에 의하여 그 값이 변할 수 있으므로 정밀한 관측방법을 이용하여 주기적으로 검사함으로써 EDM 장비의 정밀도를 점검하고 유지할 필요가 있다.

본 논문에서는 성균관대학교 자연과학캠퍼스에 설치된 7개의 정밀기선표석을 이용하여 각 기선표석 사이의 21개의 거리를 관측하고 실제 기선거리와의 차이로부터 최소자승법을 이용하여 EDM 장비의 영점오차와 축척오차를 산정 하였으며, 산정된 보정계수와 장비 제작사에서 제공된 보정계수의 비교를 통한 EDM 장비의 정밀도 점검에 대한 기준을 제시하였다.

2. EDM의 원리와 오차

2.1 EDM 장비를 이용한 거리의 관측

전자 장비에 의한 거리 관측 방법에는 변조파 방법, 위상차 방법, 도플러 방법 등이 있다. 이 중 현재 측량에서 사용되는 대부분의 EDM 장비에서 사용하는 방법은 위상차 방법이며, 사용되어 지는 반송파의 형태에 따라서 앞에서 언급한 광파 방식과 극초단파 방식으로 구분한다.

전자기파가 EDM 장비와 프리즘 사이를 왕복할 동안의 전자기파의 총 진행거리는 전자기파의 파장을 λ , 진동수를 m (m 은 정수)이라 할 때 파장의 정수배($m \cdot \lambda$)와 1파장 미만의 나머지 부분($\Delta \lambda$)으로 이루어진다(그림 1).

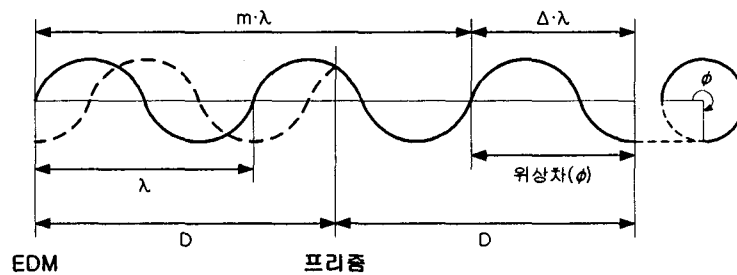


그림 1. EDM과 프리즘 사이의 전자기파의 왕복

$$2D = m\lambda + \Delta\lambda \quad (1)$$

여기서, D : EDM 장비와 프리즘 사이의 거리

실제 관측에서 진동수 m 은 측정할 수 없지만 전자기파가 EDM 장비에서 송신되는 순간의 위상 ψ_1 과 프리즘에서 반사된 전자기파가 EDM 장비에 수신되는 순간의 위상 ψ_2 을 관측할 수 있기 때문에 식 1에서의 $\Delta\lambda$ 는 다음과 같은 식에 의하여 구할 수 있다.

$$\Delta\lambda = (\psi/2\pi) \cdot \lambda \quad (2)$$

여기서, $\psi = \psi_2 - \psi_1$

위상차는 직접 측정이 가능하지만 단일파장의 전자기파를 사용한 관측으로는 진동수 m 을 결정할 수 없다. 따라서 주파수가 약간 다른 전자기파를 여러 개 사용하여 증폭현상을 일으켜(식 3) $m=0$ 이 되는 파장이 매우 긴 전자기파를 사용하는 효과를 이용하여 대략적인 거리를 구한 후 단파장의 전자파를 왕복시켜 정확한 m 값을 구하게 된다.

$$\bar{\lambda} = \frac{C}{f_A - f_B} = \frac{1}{1/\lambda_A - 1/\lambda_B} \quad (3)$$

2.2 EDM 장비의 오차

EDM 장비를 사용하여 거리를 관측할 때 발생하는 오차에는 관측자의 실수에 의한 개인오차 이외에 EDM 장비에 의한 오차와 대기기상에 의한 오차가 있다. 이 중 대기기상에 의한 오차는 주로 전자기에너지의 파장과 굴절률에 영향을 주는 대기온도, 대기압력, 습도에 의해 발생하는 오차로써 거리 관측시 기상 조건을 함께 관측하여 파장에 따른 보정식으로부터 오차량을 보정하게 된다. 관측거리에 따른 EDM 장비의 오차는 다음과 같이 분류할 수 있다.

2.2.1 거리에 비례하는 오차

① 주파수에 의한 오차

주파수에 의한 오차는 관측거리에 큰 영향을 준다. 변조주파수를 f , 주파수 오차를 Δf 라 하면 관측거리 D 에 $-(\Delta f/f) \cdot D$ 만큼 영향을 미친다.

② 굴절률에 의한 오차

관측거리가 먼 경우 관측지점 양단의 대기기상의 미소한 차이로 인해 전자기파에 미치는 굴절률에 차이가 발생하게 되며 이로 인한 오차가 발생하게 되며 그 크기는 관측거리의 1/10,000 정도이다.

2.2.2 거리에 비례하지 않는 오차

① 위상차 측정오차

송신 전자기파와 수신 전자기파의 위상차를 측정하는 검출기 자체의 정밀도에 의해서 발생하는 오차로써 일반적으로 파장의 1/1,000 정도이다.

② 기계 및 반사경 상수에 의한 오차

장비 제작사에서 제공되는 기계 및 반사경 상수가 부정확하기 때문에 발생하는 오차로써 그 크기는 수 mm 정도이다.

③ 구심오차

기계 및 반사경의 중심과 지상 관측점이 일치하지 않음으로써 발생하는 오차로써 그 크기는 수 mm 정도이다.

3. 영점오차와 축척오차

영점오차는 거의 일정한 값을 가지는 정오차이고 여러 가지 원인에 의해서 발생하지만 일부는 아직 명확히 밝혀지지 않았다(Alireza, 2003). 영점오차의 가장 큰 원인은 EDM 장비의 전자적인 중심 위치와 프리즘의 중심위치가 불완전하기 때문에 발생하는 것으로써 프리즘 상수가 부정확할 경우, 또는 EDM 장비의 동조축을 수리하거나 조정된 후에 발생한다. 축척오차는 길이에 따라 발생하는 오차로써 관측길이에 비례하여 발생하며 내적, 외적 요인에 의해서 발생한다. 발진기(oscillator)가 설계 범위 내에서 거리 관측에 요구되어 지는 충분한 주파수를 생성하지 못할 경우에 축척오차가 발생하는데 이는 내적 요인에 의한 것이다. 반면에 관측 거리상의 평균 굴절계수가 부정확할 경우에도 발생하게 되는데 이는 외적 요인에 의한 것이다. 먼 거리를 측정할수록 극초단파 방식의 장비가 광파 방식의 장비보다 축척오차가 크게 발생한다(Alireza, 2003).

영점오차와 축척오차는 다양한 거리로 구성된 정밀 기선들을 관측한 후 방정식 해법에 의하여 동시에 구할 수 있다(Emenike, 1982). 즉, 두 개의 오차를 두 개의 미지계수라 하면 이들 미지 계수를 포함하는 선형적 형태의 직선식을 결정하는 것은 여러 개의 점들에 대해 최적합한 직선식을 구하는 방법과 유사함으로써 최소자승법을 이용하여 두 개의 오차를 결정할 수 있다.

영점오차를 C, 축척오차를 S라 했을 때 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$D_p = D_o + C + S \cdot D_p \quad (4)$$

여기서, D_p : 기선 거리, D_o : 관측 거리

위의 식으로부터 관측방정식은 다음과 같다.

$$\Delta = C + S \cdot D_p \quad (5)$$

여기서, Δ : $D_p - D_o$ (잔차)

모든 기선에 대한 기선거리와 관측거리의 차와 위의 관계식으로부터 미지계수인 영점오차(C)와 축척오차(S)를 구하기 위한 최소자승법에 의한 식은 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{2} n(n+1) & \sum_{i=1}^{(n-1)n} D_{p_{ij}} \\ \sum_{i=1}^{(n-1)n} D_{p_{ij}} & \sum_{i=1}^{(n-1)n} D_{p_{ij}}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C \\ S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^{(n-1)n} \Delta_{ij} \\ \sum_{i=1}^{(n-1)n} D_{p_{ij}} \Delta_{ij} \end{pmatrix} \quad (6)$$

여기서, $D_{p_{ij}}$: 관측점 i, j 간의 기선거리, Δ_{ij} : 관측점 i, j 간의 기선거리-관측거리, n : 관측거리 수

위의 행렬식으로부터 영점오차(C)와 축척오차(S)는 다음의 행렬식에 의하여 구할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} C \\ S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} n(n+1) & \sum_{i=1}^{(n-1)n} D_{p_{ij}} \\ \sum_{i=1}^{(n-1)n} D_{p_{ij}} & \sum_{i=1}^{(n-1)n} D_{p_{ij}}^2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^{(n-1)n} \Delta_{ij} \\ \sum_{i=1}^{(n-1)n} D_{p_{ij}} \Delta_{ij} \end{pmatrix} \quad (7)$$

4. 기선거리 관측

EDM 장비의 보정계수 산정을 위해서는 정밀기선표석간의 거리를 관측하여 기선 거리와 비교하여야 한다. 본 연구에서는 보정계수 산정을 위한 EDM 장비로써 Topcon社의 GTS-701 토털스테이션을 사용하였으며, 기선거리는 국토지리정보원에서 성균관대학교 내에 설치한 정밀기선표석을 이용하였다(그림 1). 이 기선은 500여 미터의 직선거리 상에 총 7개의 정밀기선표석으로 구성되며, 7개의 기선표석으로부터 관측되어지는 기선거리의 수는 총 21개로써 식 (1)에 의하여 구하여진다. 7개의 정밀기선표석을 이용한 21개 기선의 조합은 그림 2에 표시한 것과 같으며, 21개 기선의 거리는 표 1과 같다.

$$n(\text{기선거리 총 수}) = \frac{m(m-1)}{2} \quad (8)$$

여기서, m : 정밀기선표석의 수

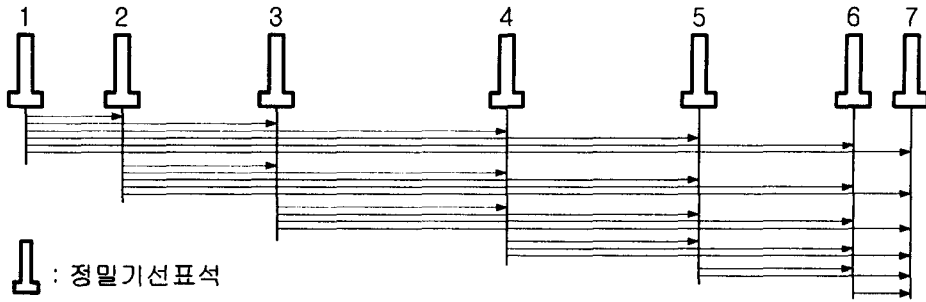


그림 2. 정밀기선표석의 구성과 기선의 조합

표 1. 기선의 거리

중점 시점	2	3	4	5	6	7
1	39.82078m ± 0.07mm	138.76894m ± 0.04mm	296.81587m ± 0.30mm	425.30992m ± 0.39mm	494.70289m ± 0.25mm	504.98588m ± 0.38mm
2		98.94957m ± 0.07mm	256.99622m ± 0.23mm	385.49071m ± 0.37mm	454.88284m ± 0.33mm	465.16625m ± 0.44mm
3			158.04745m ± 0.10mm	286.54174m ± 0.22mm	355.93413m ± 0.32mm	366.21738m ± 0.30mm
4				128.49543m ± 0.08mm	197.88796m ± 0.27mm	208.17103m ± 0.05mm
5					69.39363m ± 0.21mm	79.67699m ± 0.04mm
6						10.28470m ± 0.08mm

관측에 사용된 토탈스테이션의 제작사에서 제공된 정밀도와 기계상수는 표 2와 같다. 표 2에서와 같이 EDM 장비의 거리 측정 정밀도는 $\pm(Cmm+Sppm)$ 와 같이 표시하는데 이 중 C값을 영점오차(zero error 또는 constant error)라 하며, S값을 축척오차(scale error)라 한다. 영점오차는 거리 측정시 마다 동일한 크기의 영향을 주는 정오차이며, 축척오차는 관측거리에 비례하여 발생하는 정오차이다.(Alireza, 2003) EDM장비의 일반적인 보정계수 또는 기계상수라 함은 영점오차와 축척오차를 일컫는다.(Charles, 1977)

표 2. 기선 관측에 사용된 토탈스테이션의 사양

항 목	사 양	항 목	사 양
망원경 배율	30×	최소 거리 읽음 값	0.2mm
최속 각 읽음 값	1"	측정 거리 정밀도	$\pm(2mm+2ppm)$
측정 각 정밀도	2"	최대 측정 거리	2400m

전자기파를 이용한 거리 관측은 대기기상에 의한 영향을 받으므로 거리 관측시의 온도, 습도, 기압을 함께 측정하여 관측거리 보정을 해주어야 한다. 본 연구에서는 기선 관측시의 온도, 습도, 기압을 측정하여 토탈스테이션에 입력한 후 기선을 관측함으로써 대기기상에 의해 발생할 수 있는 오차를 미리 보정하였다. 기선 관측에 사용된 프리즘은 토탈스테이션과 동일한 제작사의 제품을 사용하고 제작사에서 제공한 프리즘 상수값을 사용함으로써 장비 제작사별 표준의 차이에 따라 발생할 수 있는 오차의 영향을 최소화하였다. 또한, 프리즘과 정준기는 하나만을 사용하여 기선표석간의 거리를 관측함으로써 장비에 따라 발생할 수 있는 오차의 영향을 최소화하였다. 관측거리는 복사열에 의한 시준오차를 최소화하기 위한 날씨와 시간대를 선택하여 대기기상조건과 프리즘 상수값을 입력한 후 수평거리를 5회 관측한 평균값으로부터 결정하였다(표 3).

표 3. 기선의 관측 거리

중점 시점	2	3	4	5	6	7
1	39.821m ± 0.2mm	138.770m ± 0.4mm	296.815m ± 0.2mm	425.311m ± 0.2mm	494.701m ± 0.6mm	504.987m ± 0.6mm
2		98.946m ± 0.2mm	256.996m ± 0.3mm	385.492m ± 0.4mm	454.881m ± 0.5mm	465.162m ± 0.4mm
3			158.045m ± 0.2mm	286.544m ± 0.4mm	355.932m ± 0.2mm	366.218m ± 0.2mm
4				128.496m ± 0.2mm	197.886m ± 0.2mm	208.172m ± 0.2mm
5					69.392m ± 0.4mm	79.678m ± 0.4mm
6						10.286m ± 0.2mm

5. 실험 결과

각 기선표석간의 기선거리(표 1)와 관측거리(표 3) 사이의 차이는 표 4와 같다. 표 1의 각 기선표석간의 기선거리(D_{ij})와 표 4의 기선거리와 관측거리의 차(Δ_{ij})를 식 7에 입력하여 계산한 EDM 장비의 영점오차(C)와 축척오차(S) 및 EDM 장비 제작사에서 제공된 영점오차와 축척오차는 표 5와 같다.

표 4. 기선거리와 관측거리의 차

중점 시점	2	3	4	5	6	7
1	-0.00022m	-0.00106m	0.00087m	-0.00108m	0.00189m	-0.00112m
2		0.00357m	0.00022m	-0.00129m	0.00184m	0.00425m
3			0.00245m	-0.00226m	0.00213m	-0.00062m
4				-0.00057m	0.00196m	-0.00097m
5					0.00163m	-0.00101m
6						-0.00130m

표 5에서 보는 바와 같이 본 연구를 통하여 산정된 영점오차와 축척오차가 모두 제작사에서 제공한 영점오차와 축척오차의 값보다 작으므로 관측에 사용된 EDM 장비는 유효한 장비임을 알 수 있다.

표 5. 영점오차 및 축척오차의 비교

	실험결과	제작사 제공
영점오차(C)	1.22mm	2mm
축척오차(S)	1.25ppm	2ppm

6. 결 론

본 연구에서는 EDM 장비의 검교정을 위한 정밀기선표석간의 거리를 관측하여 기선거리와 관측거리의 관계로부터 최소자승법을 이용하여 EDM 장비의 보정계수인 영점오차와 축척오차를 산정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 영점오차와 축척오차의 산정을 위하여 최소자승법의 이론을 적용함으로써 비교적 간단한 계산 방법에 의하여 두 오차를 동시에 산정할 수 있었다.

2. EDM을 이용한 거리 관측시 개인적 오차를 최소화하고 EDM 제작사에서 제공하는 프리즘과 표준상수값을 사용하고 관측시의 온도, 습도, 기압을 측정하여 제작사에서 제공하는 표준 대기 보정식을 이용하여 관측 거리를 보정할 경우 제작사에서 제공하는 거리 측정 정밀도를 만족하는 관측 결과를 얻을

수 있었다.

3. 개정된 측량법에 의하여 현재 시행되고 있는 EDM 장비의 검사 기준은 EDM 장비 자체의 정밀도와는 상관없이 기선거리와 관측거리의 차이를 일정 범위내로 규정하고 있다. 이는 급속도로 발전하고 있는 측량장비의 정밀도를 점검하기 위한 기준으로써는 부적합하며 장비 제작사에서 제공하는 장비 자체의 정밀도에 비례하는 검사 기준을 마련하여 측량 및 정밀 과학 계측 분야에 EDM 장비를 활용할 수 있도록 하여야 한다.

참고문헌

- Alireza Amiri-Simkooei(2003), Least-Squares Formula for Zero Error of Electromagnetic Distance Measuring Instruments, Journal of Surveying Engineering, Vol. 129, No. 4, pp. 136-140.
- Charles J. Fronczek(1977), Use of Calibration Base Lines, NOAA Technical Memorandum NOS NGS-10.
- E. N. Emenike(1982), A Simplified Approach to Accurate EDM Instrument Calibration, Journal of Survey Review, Vol 26, No. 24, pp. 273-278.
- Mendenhall, William(1969), Introduction to Probability and Statistics, Wadsworth Publishing Company, Inc. pp. 189-220.
- Paul R. Wolf(1993), Elementary Surveying, 9th edition, HarperCollins College Publishers, pp. 86-99.
- Wolfgang Torge(2001), Geodesy, 3rd edition, Berlin-New York, pp. 96-103.