

레이저 간섭계를 이용한 광파거리측정기의 교정과 특성분석 Calibration and Performance Test of Electro-optical Distance Meters Using a Laser Interferometer

김재완¹⁾ · 엠태봉²⁾ · 서호성³⁾

Kim, Jae Wan · Eom, Tae Bong · Suh, Ho Suhng

Abstract

In order for the measurement results of an electro-optical distance meter(EDM), which is widely used in surveying, to be reliable, an EDM should be calibrated. For the calibration of an EDM, we have settled a traceability chain, which connects the EDM under calibration to the definition of metre. The chain starts from the iodine stabilized He-Ne laser which realizes the definition of metre, and then connected to a stabilized laser interferometer, a standard EDM, and finally to the EDM under calibration through the baseline. We achieved the expanded calibration uncertainties of the scale and length measurement of an EDM being evaluated to be 6×10^{-6} and 0.2 mm, respectively. Two different calibration methods, and their results are compared.

Keywords : EDM, laser interferometer, Calibration, Uncertainty

요 지

대형 구조물의 측량에 널리 사용되는 EDM(Electro-optical distance meter, 광파 거리 측정기)의 측정값이 신뢰성을 가지기 위해서는 반드시 EDM의 교정이 필요하다. 본 연구에서는 EDM의 교정을 위한 소급체계를 확립하였는데, 이는 EDM이 미터 정의로 부터의 소급성을 가지게 하는 것을 의미한다. 미터 정의에 따라 길이 표준기로 사용되는 요오드 안정화 헬륨-네온 레이저로 레이저 간섭계를 교정하고, 이 레이저 간섭계로 기준 EDM을 교정한 후, 기준 EDM과 기선장에 의해 교정 대상 EDM이 교정됨으로써 미터 정의로의 소급성을 유지한다. 레이저 간섭계를 이용한 EDM의 배율과 길이 측정값에 대한 교정 불확도는 각각 6×10^{-6} 과 0.2 mm이다. 기선장을 이용한 교정법과 EDM의 변조 주파수를 교정하는 교정법을 병행하여 그 결과를 비교하였다.

핵심용어 : EDM, 레이저 간섭계, 교정, 불확도

1. 서 론

EDM은 대상물까지의 거리를 측정하는 장비로서 터널, 댐과 같은 토목 건설 분야뿐만 아니라 조선이나 비행기와 같은 대형 구조물의 측량에도 널리 사용되고 있다(박경식, 2003). EDM은 기계에서 발사된 레이저 빔이 반사체에서 반사되어 돌아오는 신호를 수신하여 거리를 결정한다. EDM은 레이저 빔의 좋은 집속성과 강한 세기 때문에 수 km의 거리도 측정이 가능하고 우수한 직진성과 정밀성 때문에 수 mm의 정확도(Accuracy)로 측정이 가능하다.

측정 장비는 시간이 지남에 따라 기계/전기적인 요인으로 인해 장비의 성능이 변할 수 있다. 특히 EDM과 같은 정밀 측정기기는 측정결과와의 작은 차이를 무시할 수 없는 상황에서 사용되므로 기기의 성능을 지속적으로 확인할 필요가 있다. 측정기의 성능은 교정(Calibration) 절차를 통해 확인할 수 있다. 국가기본표준법 제3조에서 정의하는 교정이란 '특정조건하에서 측정기기, 표준물질, 물적척도 또는 측정시스템 등에 의하여 결정된 값을 표준에 의하여 결정된 값 사이의 관계로 확정하는 일련의 작업'을 말한다. 따라서 EDM을 교정하기 위해서는 'EDM으로 측정하

1) 연결저자 · 정회원 · 한국표준과학연구원 선임연구원(E-mail:jaewan@kriss.re.kr)

2) 한국표준과학연구원 책임연구원(E-mail:tbeom@kriss.re.kr)

3) 한국표준과학연구원 책임연구원(E-mail:hssuh@kriss.re.kr)

결과가 명시된 불확도 범위 내에서 길이의 국가측정표준과 일치되도록 서로 연결되는 연속되는 교정체계가 인 소급체계를 확보하여야 한다(ISO, 1993; 정낙삼, 2003).

국제 표준(ISO 12857-3, ISO 17123-4)과 한국산업규격(KS B5632)에 따르면, EDM의 교정에 사용되는 일곱 개의 기준점(기선장)은 EDM의 주기오차를 끌고루 측정할 수 있도록 계산된 값으로 각 기준점 사이의 거리를 정하여 설치한다. 한국표준과학연구원에도 이 규격에 따라 설계된 270 m길이의 기선장을 보유하고 있고 일반 EDM을 교정하고 있다. 이 방법으로는 기선장의 거리이내에서 주기오차(cyclic error)와 배율오차(scale factor error)가 합쳐진 표준편차(standard deviation)와 EDM과 타겟의 특성인 영점 보정량(offset)을 구할 수 있다. 주기오차는 EDM 변조파의 위상을 잘못 측정하여 생기는 값이므로 변조파의 반파장마다 반복되는 특성을 가진다(Brown N., 2003). 주기오차는 단거리나 장거리의 측정에 의존하는 값이 아니므로 불확도(uncertainty)에서 일정한 값으로 표시된다. 배율오차는 측정거리에 비례하여 불확도가 커지는 양으로 EDM 변조 주파수의 오차와 공기 굴절률의 오차가 주된 원인이다. EDM의 측정영역은 수 m에서 수 km에 이르므로 배율 오차가 불확도에서 중요한 역할을 한다. 기선장을 이용한 측정 결과로부터 배율오차를 구하기 위해서는 각 기준점 사이의 거리를 충분히 정확히 알고 있다는 가정이 성립해야 한다. 그러나 기준점 사이의 기준 거리를 EDM으로 측정된 값을 가지고 결정하는 현실에서는 필요한 정확도를 얻기가 힘들다. 그러므로 국제표준(ISO 12857-3)과 한국산업규격(KS B5632)에서도 배율오차는 EDM의 변조주파수를 교정하여 간접적으로 인도록 권고하고 있다. 배율 오차에 중요한 원인 중 하나인 공기 굴절률의 영향은 변조주파수 측정으로는 구할 수 없으므로 주파수 교정만으로 배율오차를 구하는 것이 최선의 방법은 아니다. 주파수 오차와 공기 굴절률 오차가 포함된 전체적인 배율오차는 EDM 보다 정확한 길이 측정 방법을 이용하면 구할 수 있다. 레이저 간섭계는 nm의 분해능과 이에 상응하는 정확도로 측정이 가능하다. 그러므로 여기서는 레이저 간섭계를 이용하여 EDM의 배율을 교정하였다.

EDM의 교정을 위해서 미터 정의에 의한 일차적인 기준기인 I₂에 주파수 안정된 He-Ne 레이저에서부터 레이저 간섭계, 기준 EDM, 기선장, 피교정 EDM으로 이어지는 소급체계를 구성하였다. 소급체계의 각 단계를 연결하기 위해서는 각각의 단계에 대한 교정이 이루어져야 한다. 이미 교

정체계가 확립된 경우에는 그 절차에 의해 교정을 실시하였고 아직 교정체계가 완성되지 않은 경우에는 새로운 교정절차와 불확도 분석을 통해 교정을 실시하였다. 레이저 간섭계를 이용하여 50 m 구간에서 확장불확도가 0.2 mm 크기로 EDM을 교정할 수 있었다.

2. 본 론

2.1 EDM 교정의 소급체계

어떤 장비를 교정하기 위해서는 기준값이 틀리지 않다는 보장이 필요하다. 길이와 같은 물리량의 단위는 추상적인 정의에서부터 출발하므로 이를 실현한 표준물을 각 나라의 표준기관에서 보유하고 서로의 표준물이 일치한다는 것을 상호 비교를 통해 확인하고 있다. 우리나라에서는 길이의 표준물로 한국표준과학연구원서 요오드 안정화 He-Ne 레이저(KRISS-R701 cell no.702)를 보유하고 있다. 우리나라에서 행해지는 모든 길이 측정은 이 레이저 파장으로부터 소급성을 확보하면 국가측정표준상호인정 협약에 의해 국제적으로도 측정값을 인정받게 된다 (국제도량형위원회, 1999).

한국표준과학연구원서 유지하고 있는 EDM 교정의 소급체계는 그림 1과 같다. 미터정의를 구현한 요오드 안정화 He-Ne레이저로부터 상위의 항목으로 하위의 항목을 계속적으로 교정하여 최종적으로 피교정 EDM이 교정되어야 한다. 그러므로 EDM의 길이 측정에 대해 소급체계가

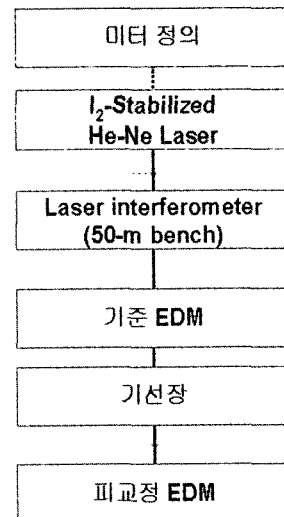


그림 1. EDM교정의 소급체계

완성되기 위해서는 (1)길이 표준과 50-m 레이저 간섭계, (2)레이저 간섭계와 EDM 기준기, (3)EDM 기준기와 기선장, (4)기선장과 피교정 EDM에 걸쳐 교정시스템이 확립되어야 한다.

2.2. EDM의 배울 교정 장치

EDM의 배울 교정에 사용하는 50 m 길이의 레이저 간섭계는 지하에 위치한 항온실에 설치되어 있다. 항온실은 길이가 55 m이고 온도는 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 이내에서 일정하게 유지된다. EDM 교정장치는 그림 2과 같이 51 m 길이의 벤치위에 설치된 두 줄의 레일과 이송대 레이저 간섭계로 구성되어 있다. 레일의 직진도는 전 구간에서 2 mm 이내이다. 무선으로 조정되는 이송대가 레일을 따라 이동을 하며, 전 측정구간에서 스테이지의 피치(pitch)는 최대 200초로 측정되었다. 이송대 위에는 간섭계의 측정부에 해당하는 코너큐브(corner cube, CC), EDM의 타겟 코너큐브(CC_M), 광학 현미경과 무선으로 현미경의 영상을 전송하는 전자장치 등이 설치되어 있다. He-Ne 레이저에서 나온 빛의

일부는 편광빔살가르개(Polarizing beam splitter)에서 반사되어 고정된 코너큐브에 입사되고 나머지는 편광빔살가르개를 투과하여 이송대에 설치된 코너큐브에 입사된다. 이송대가 움직이면 그 변위를 컴퓨터에서 기록한다. EDM은 레이저 간섭계의 반대 방향에 설치되어 이송대의 변위를 레이저 간섭계와 동시에 측정한다. EDM 설치대는 측량용 삼각대를 이용하여 필요할 때만 사용하고 있다

2.3 50-m 레이저 간섭계의 주파수 교정

그림 1의 소급체계를 완성하기 위해 레이저 간섭계의 교정을 실시하였다. 레이저 간섭계는 사용한 레이저의 파장을 기준으로 거리를 측정한다. 레이저 파장은 공기의 굴절률에 따라 달라지므로 파장의 교정은 굴절률의 영향을 받지 않는 발진 주파수로 환산하여 이루어진다. 그러므로 레이저의 발진 주파수를 교정하는 것으로 간섭계를 교정한다. 표준과학연구원에는 국가 길이표준으로 요오드 안정화 He-Ne 레이저(KRISS-R701 cell no.702)를 보유하고 있다. 요오드 안정화 He-Ne 레이저와 교정하려는 레이저의 맥놀이 주파수를 측정하면 피교정 레이저의 주파수를 알 수 있다.

간섭계에 사용한 He-Ne 레이저(HP 5519A)의 주파수 안정도를 측정한 결과는 그림 3과 같다. 한 시간 동안의 상대 주파수 안정도가 모두 10^{-9} 이내 이므로 50 m를 측정할 때 주파수 변화로 인한 길이 측정의 불확도는 5×10^{-8} m 이내이고 매우 작으므로 무시할 수 있다. 중심 주파수는 473,612,233.1 MHz(확장불확도 = 0.2 MHz)로 측정되었고 진공에서의 파장은 632.9913736 nm로 간섭계의 거리 측정은 이 값을 기준으로 이루어진다.

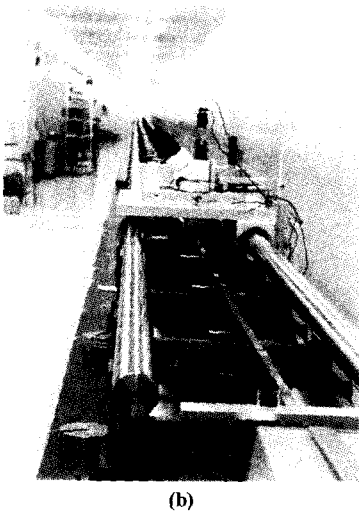
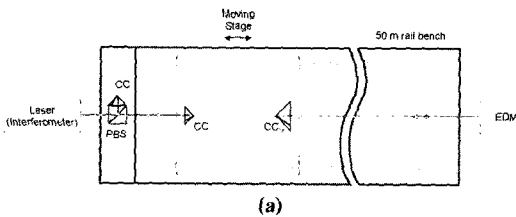


그림 2. (a) EDM의 길이 교정 장치의 개략도 (CC: Corner cube, CC_M: EDM의 target corner cube, PBS: Polarizing beam splitter), (b) 50 m 길이 레일 벤치와 레이저 간섭계

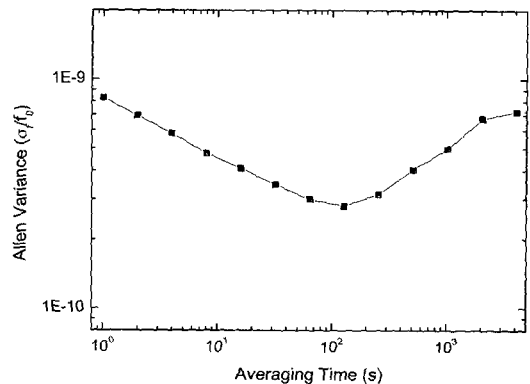


그림 3. He-Ne 레이저의 주파수 안정도

2.4 EDM의 배율 교정

그림 2의 50-m 레이저 간섭계를 이용하여 구한 EDM의 배율을 신뢰하기 위해서는 측정의 불확도 분석이 필요하다. 또한 간섭계를 이용하여 얻은 배율은 변조 주파수를 측정하는 방법으로 얻은 배율과 비교하였다.

가. EDM 변위의 교정 불확도

레이저 간섭계를 이용하여 EDM의 변위를 교정할 때 교정값 B 는 간섭계로 측정된 거리 X 와 EDM으로 측정된 거리 L 의 차이로 표시된다. 열팽창과 아베오차를 고려하면 최종적으로 교정값 B 는

$$B = X - L + \delta L_t + \delta L_A \quad (1)$$

가 된다. 단 여기서 δL_t 는 열팽창에 의한 보정값이고 δL_A 는 아베오차에 의한 보정값을 의미한다. 교정시에는 δL_t 와 δL_A 를 각각 0으로 추정하였다. 식 (1)로부터 EDM 교정의 합성표준불확도(combined standard uncertainty)는 다음과 같이 계산된다(정낙삼, 1998).

$$u_c(B) = \sqrt{u(X)^2 + u(L)^2 + u(\delta L_t)^2 + u(\delta L_A)^2} \quad (2)$$

EDM으로 측정된 거리의 불확도 $u(L)$ 은 반복측정의 표준편차만을 고려하여 계산하였다. 거리가 50 m인 동일 지점에 대해 EDM으로 20회 반복 측정하였을 때의 표준편차는 100 μm 이었다. 반복 측정의 불확도는 신뢰수준 68.3%에서 100 μm 라고 볼 수 있고 자유도 ν_{md} 는 19가 된다.

레이저 간섭계의 주파수 요동과 분해능은 다른 요인에 비해 작으므로 무시하면 간섭계의 불확도 $u(X)$ 는 공기 굴절률 변화의 영향만 고려하면 된다. 간섭계에 부착된 센서(HP Air sensor 10751C/D)는 온도와 압력을 측정하여 자동으로 굴절률을 보정한다. 제작회사에서 제시한 굴절률 교정의 정확도는 $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 의 환경에서 1.6×10^{-6} 이다. 확률 분포함수가 반너비(half width)가 1.6×10^{-6} 인 직사각형이라고 하면 거리 X 를 측정할 때 굴절률 차이에 의한 불확도 $u(X)$ 는

$$u(X) = \frac{1.6X}{\sqrt{3}} = 0.92X \mu\text{m} \quad (X:\text{m}) \quad (3)$$

이된다. 단 위 식에서 거리 X 의 단위는 m이다. 간섭계의 최대 거리 50 m를 식 (3)에 대입하면 공기 굴절률에 의한 불확도는 46 μm 가 된다. 상대적인 불확도가 20%일 때 자유

도 ν_r 은

$$\nu_r = \frac{1}{2} \left(\frac{20}{100} \right)^{-2} = 12.5 \quad (4)$$

가 된다.

간섭계와 EDM은 동시에 이송대의 변위를 측정하므로 레일의 열팽창은 측정오차에 영향을 주지 않는다. 그러나 이송대 자체의 크기 변화는 측정오차로 작용한다. 이송대는 알루미늄으로 만들었고 길이는 0.6 m이다. 알루미늄의 열팽창 계수 $23 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 와 반너비가 1°C 인 직사각형 확률 분포를 적용하면 열팽창에 의한 불확도 $u(\delta L_t)$ 는

$$u(\delta L_t) = 6 \times 10^5 \times 23 \times 10^{-6} / \sqrt{3} \mu\text{m} = 8 \mu\text{m} \quad (5)$$

가 된다. 상대적인 불확도가 20%일 때 자유도 ν_t 는 12.5가 된다.

간섭계의 광축과 EDM의 광축 그리고 레일은 서로 평행하게 정렬되는데 50 m 구간에서 2 mm 이내의 편차로 정렬이 가능하다. 이 때의 코사인 오차는 무시할 만큼 작으므로 고려하지 않는다. 레일의 전 측정구간에서 스테이지의 피치(pitch)는 최대 200초로 측정되었다. 간섭계와 EDM의 측정 축 사이의 간격은 3 cm이내이므로 아베오차에 의한 불확도 $u(\delta L_A)$ 는

$$u(\delta L_A) = 3 \times 10^4 \times \sin(200'') \mu\text{m} = 29 \mu\text{m} \quad (6)$$

이고 상대적인 불확도 20%일 때 자유도 ν_A 는 12.5가 된다. 식 (2)에 각 항목을 대입하면 합성표준불확도 $u_c(X)$ 는

$$u_c(X) = \sqrt{104^2 + (0.92X)^2} \mu\text{m} \quad (X:\text{m}) \quad (7)$$

가 된다.

확장불확도를 구하기 위해서는 유효자유도를 계산하여 포함인자를 구해야 한다. 측정 거리 50 m에 대해 유효자유도 ν_{eff} 를 구하면 Welch-Satterthwaite식으로부터(정낙삼, 1998) 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \nu_{eff} &= \frac{u_c^4}{\frac{u(L)^4}{\nu_{md}} + \frac{u(X)^4}{\nu_r} + \frac{u^4(\delta L_t)}{\nu_t} + \frac{u^4(\delta L_A)}{\nu_A}} \\ &= \frac{114^4}{\frac{100^4}{19} + \frac{46^4}{12.5} + \frac{8^4}{12.5} + \frac{29^4}{12.5}} \\ &= 30 \end{aligned} \quad (8)$$

t - 분포표에 의하면 유효자유도가 49일 때 신뢰수준이 95%에 대한 확장불확도의 포함인자는 2.01이 된다(정낙삼, 1998). 그러므로 EDM의 길이 교정 불확도는 다음과 같이 표현된다.

$$U = k \cdot u_c(X) = \sqrt{210^2 + (1.8X)^2} \mu\text{m} \quad (k=2.01, X: \text{m}) \quad (9)$$

나. EDM 배율 교정의 불확도

EDM의 배율을 m 이라고 하면 EDM으로 측정된 거리 L 과 레이저 간섭계로 측정된 거리 X 의 관계식은 다음과 같이 표현된다.

$$L = \delta L_t + \delta L_A + mX \quad (10)$$

식 (10)으로부터 배율의 합성표준 불확도 $u(m)$ 을 계산하면

$$u^2(m) = \frac{m^2}{X^2} u^2(X) + \frac{m^2}{(L - \delta L_t - \delta L_A)^2} [u^2(L) + u^2(\delta L_t) + u^2(\delta L_A)] \quad (11)$$

이 된다. 열팽창오차와 아베오차의 보정량(δL_t 과 δL_A)은 각각 0으로 추정하면 배율의 상대불확도는 간단히

$$\frac{u^2(m)}{m^2} = \frac{u^2(X)}{X^2} + \frac{u^2(L) + u^2(\delta L_t) + u^2(\delta L_A)}{L^2} \quad (12)$$

가 된다. 표 1에서 계산된 값을 대입하고 $L=X$ 이라고 근사하면

$$\begin{aligned} \frac{u^2(m)}{m^2} &= \frac{u^2(X) + u^2(L) + u^2(\delta L_t) + u^2(\delta L_A)}{X^2} \\ &= \frac{(0.92X)^2 + 104^2}{X^2} \times 10^{-12} \\ &= (0.92 \times 10^{-6})^2 + \frac{(1.04 \times 10^{-4})^2}{X^2} \end{aligned} \quad (13)$$

가 된다. 측정 거리가 늘어나면 배율의 상대적인 합성 표준 불확도는 줄어든다. EDM 자체의 반복 불확도(A형 불확도)가 크므로 짧은 거리에서는 반복도가 측정 불확도에 가장 큰 영향을 준다. 여기서 교정한 EDM의 경우에는 108 m 이상의 거리에서 배율을 구해야 비로소 레이저 간섭계의 불확도와 EDM의 반복도에 의한 불확도가 비슷한 크기가 된다. 식 (13)에 거리 50 m를 대입하여 구한 배율의 합성 표준 불확도는 3×10^{-6} 이고 포함인자 $k=2.01$ 을 곱한 확장불확도는 6×10^{-6} 이다.

다. EDM 배율 교정

검본으로 교정을 한 EDM은 Leica의 TC2003로서 제작 회사에서 제공한 제원은 표 2와 같다. EDM의 배율을 교정

표 1. 레이저 간섭계를 이용한 EDM 교정의 불확도

표준 불확도 성분	불확도 요인	표준 불확도(μm)	감도 계수	불확도 성분(μm)	자유도
$u(L)$	EDM 반복도	100	1	100	19
$u(X)$	간섭계 공기 굴절률 보상	$0.92X$	1	$0.92X$	12.5
$u(\delta L_t)$	이송대 열팽창	8	1	8	12.5
$u(\delta L_A)$	아베에러	29	1	29	12.5
합성 표준 불확도		$u_c(X) = \sqrt{104^2 + (0.92X)^2} \mu\text{m}$ (X: m)			

표 2. 피교정 EDM(Leica, TC2003)의 제원

	Accuracy (standard measurement)	Display resolution	Range(Average with 1 Standard prism)
Distance	1 mm + 1 ppm	0.1 mm	2500 m
Angle	0.5"	0.1"	360°

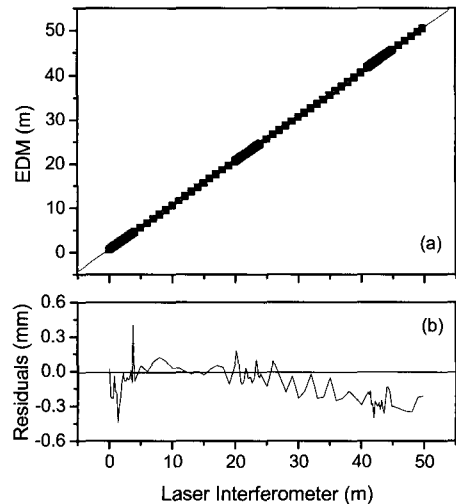


그림 4. 레이저 간섭계와 EDM으로 이송대의 변위를 비교 측정 한 결과, (a) 레이저 간섭계의 측정값 대비 EDM의 측정값(■)과 최소 자승법에 의한 최확값(실선), (b) 최소자승법에 의한 최확값과 측정값의 차이

하기 위하여 그림 2의 실험장치에서 이송대를 50 m 구간을 1 m 간격으로 이동하면서 레이저 간섭계와 EDM으로 동시에 이송대의 변위를 측정하였다. 그림 4(a)의 검은 사각형(■)은 레이저 간섭계 측정값 대비 EDM의 측정값을 나타내고 실선은 최소자승법으로 선형 맞춤한 결과이다. 선형맞춤으로 얻은 직선의 배율(기울기)은 $1.000\ 002\ 5 \pm 8 \times 10^{-7}$ 이다. EDM의 설정 배율이 1이므로 측정 결과로 얻은 배율의 오차는 2.5×10^{-6} 이고 이 값을 교정 값으로 사용할지 여부는 통계적인 확인을 거쳐 결정한다(ISO 17123-4 2001; Danzer 1998). 측정된 배율오차는 식 (13)에서 구한 확장불확도 보다 작으므로 EDM의 배율을 측정값으로 교정하지는 않았다. 최소자승법에 의해 곡선맞춤한 값과 측정값의 차이로 표시되는 잔여오차는 측정불확도 분석에 유용하며 그림 4(b)에 표시되어 있다. 레이저 간섭계와 EDM은 서로 반대 방향을 측정하므로 측정거리가 짧은 영역과 긴 영역에서는 공기굴절률 오차의 효과가 서로 다르다. 이런 이유로 측정 거리 15 m를 전후로 잔여오차가 증가하다가 감소하는 경향을 보인다. 잔여오차에는 EDM의 위상오차가 포함되어 있으므로 대개는 고정된 한 점에서 측정하는 반복도에 비해 표준편차가 크다. 그림 4(b)에서 잔여오차의 표준편차는 $150\ \mu\text{m}$ 로 고정된 점에서 측정된 반복도 $100\ \mu\text{m}$ 보다 크게 측정되었다.

주파수 변조형 EDM은 레이저 빛을 사인파로 변조하지만 전기적인 불완전성에 의해 실제 변조된 빛은 완전한 사인파가 되지 못한다. 그러므로 측정된 위상은 주기적으로 오차를 가질 수 있고 이를 위상오차라고 한다. 정밀한 EDM은 내부적으로 위상오차를 보정하는 회로를 채택하고 있지만 잔여 오차는 항상 존재한다. 측정에 사용한 EDM은 변조 주파수가 50 MHz로 변조 파장 λ_{EDM} 은 6

m이다. EDM은 왕복거리를 측정하므로 위상오차의 주기는 변조 파장의 반에 해당하는 거리 3 m가 된다. 그림 5에서 실선으로 표시된 값은 20 m위치에서 측정한 것이고 점선으로 표시된 값은 41 m 지점에서 측정한 위상오차이다. 두 지점 사이의 거리는 21 m로 반파장의 정수배를 만족하므로 동일한 위상을 나타내야 한다. 위상오차의 크기가 측정 불확도와 비슷하므로 두 지점에서의 위상오차가 완전히 일치하지는 않지만 크기와 경향이 유사함을 알 수 있다. 위상오차의 최대 최소값 차이가 약 0.3 mm로 장거리에서는 배율에 의한 오차에 비해서는 충분히 작으므로 무시할 수 있다.

실험에 사용한 EDM은 레이저 빛을 50 MHz로 변조하고 변조주파수의 위상을 통해 길이를 측정한다. EDM의 변조 주파수가 변하면 EDM의 기준 눈금인 변조파장이 따라서 변하게 된다. 그러므로 변조 주파수의 변화는 배율과 무작위 측정 오차의 원인이 되므로 ISO에서도 이 방법으로 배율을 측정하는 것을 권장한다. 다만 변조주파수를 측정하는 것으로는 배율 오차의 또 다른 원인인 공기굴절률의 영향은 알 수 없다.

주파수 대역폭이 1 GHz인 포토다이오드(Hamamatsu, C5658)와 주파수의 상대적인 안정도가 1.5×10^{-13} 인 주파기 표준기(HP-5071A)를 이용하여 EDM의 변조 주파수를 측정하였다. EDM의 전원을 켜 처음 30분 동안은 주파수가 약 20 Hz 이상 크게 변하는 것을 관찰할 수 있었다. 거리 측정은 장시간에 걸쳐 진행되므로 발전자의 초기특성 보다는 충분히 예열된 후의 특성이 더 중요하다. 그러므로 실험에서는 30분 이상의 예열 후에 주파수를 측정하였다. 장기적인 주파수 요동을 확인하기 위해 6시간 이상 측정하였으며 주파수 차이를 잘 살펴보기 위해 평균값과의 차이를 그

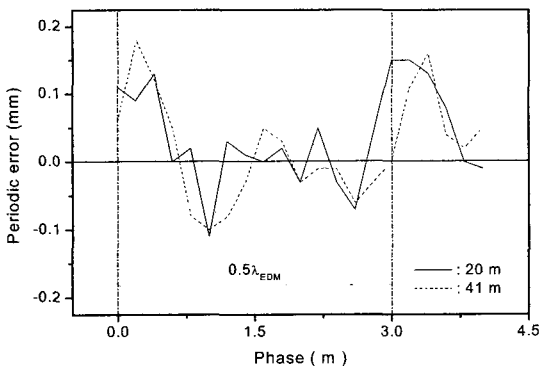


그림 5. EDM의 위상오차(λ_{EDM} 은 EDM의 변조 파장, 실선은 20 m위치에서 측정한 값, 점선은 41 m 지점에서 측정한 값)

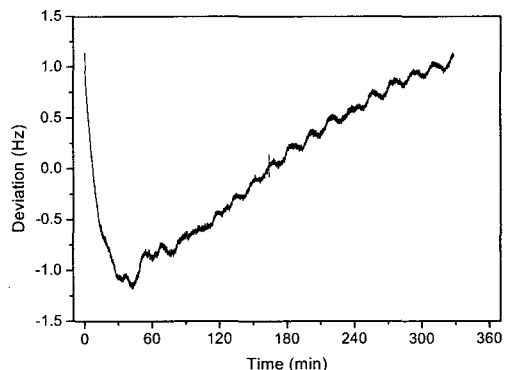


그림 6. EDM의 주파수 요동

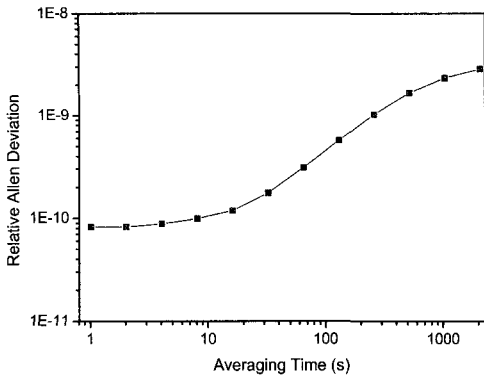


그림 7. EDM의 상대적인 주파수 요동에 대한 알란분산

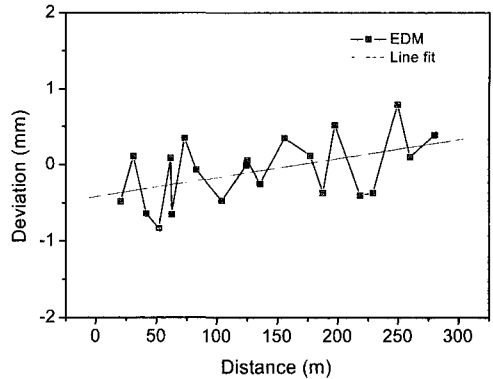


그림 8. 기선장의 기준값과 EDM 측정값의 차이

림 6에서 보여주고 있다. 주파수의 평균값은 50000083.9 Hz이고 표준 편차는 2.0 Hz이다. 표준편차로 계산한 오차는 10^{-8} 이므로 무시할 수 있다. 주파수의 평균값은 기준값에 비해 83.9 Hz가 크므로 대푯값을 기준으로 거리를 측정하는 기기라면 1.7×10^{-6} 만큼 배율이 크게 조정되어 있다. 실험에 사용한 EDM은 내부적으로 주파수를 측정하는 기능이 있다. EDM과 표준기로 측정한 주파수의 차는 평균 +21 Hz의 편차를 보였다. 그러므로 이 EDM은 배율이 0.42×10^{-6} 만큼 크게 설정되어 있다. 주파수 요동의 표준편차 2 Hz는 평균의 편차 21 Hz에 비해 충분히 작으므로 배율은 교정돼야 한다.

발전자의 안정도를 통계적으로 평가하기 위해서는 알란분산(Allen variance)를 구하는 것이 일반적인 방법이다. 그림 7은 측정값을 평균값으로 나눈 후 계산한 알란분산이다. 알란분산은 V자 형태를 그리는 것이 일반적이나 그림 7에서는 처음부터 알란분산 값이 증가하는 형태를 보이고 있다. 이는 기기에 사용된 발전자의 단기적 안정도가 떨어진다라는 것을 나타낸다.

라. 기선장을 이용한 EDM 평가

한국표준과학연구원에서 보유하고 있는 기선장은 국제규격과(ISO-12857-3: 1997(E), Parts 3) KS 규격에서(KS B5632: 1999) 권장하는 방식으로 설계된 일곱 개의 석주(石柱, Pillar)로 구성되어 있다. 각 석주의 이름은 일곱 개의 SI 기본단위 (m, s, kg, A, K, cd, mol)로 명명되어 있고 가장 멀리 있는 m부터 mol까지의 거리는 약 280 m이다. 각 석주 사이의 거리를 모두 측정하면 20.3 m에서 280.0 m까지 21개의 측정데이터를 얻을 수 있다. 각 석주 사이의 거리를 측정한 결과는 그림 8과 같다. 측정오차를 살펴보

기 위해 그림에서는 기준거리와의 차이를 보여주고 있다. 측정이 시작될 때 온도와 압력을 입력하는 방식으로 EDM 자체의 공기굴절률 보정기능을 사용하였다. 그림 8의 측정값은 EDM의 배율교정을 하지 않은 결과이다. ISO의 계산 방식으로 얻은 영점 보정값은 0.09 mm이고 표준편차는 0.71 mm이다. 측정결과에서 유의해야 할 점은 표준편차가 고정된 측정점에 대한 반복도에 비해 크다는 것이다. EDM과 타겟이 일단 설치된 상태에서는 EDM으로 반복도가 0.1 mm정도이고 그림 5에서 주기오차도 0.1 mm이내임을 확인했다. 그러므로 표준편차의 중요 요소가 장비의 성능이 아니라 설치 방법 등과 같은 개인적인 요인에 의한 것임을 시사한다.

그림 8의 데이터에 대해 최소자승법으로 기울기를 구하면 $2.5 \times 10^{-6} \pm 1.1 \times 10^{-6}$ 이고 이 값은 기선장의 기준 길이를 참값이라고 가정하고 계산한 배율의 오차이다(조재명, 2004). 기선장의 기준길이를 측정한 EDM의 사양(Sokkia, NET 1200, $\pm(0.6 + 2 \text{ ppm} \times L)$ mm)과 반복측정의 표준편차를 고려하면 50 m에서 기준길이의 확장불확도는 1 mm 이상이 된다. 식 (13)에 의하면 이에 대응하는 기울기의 확장 불확도는 20×10^{-6} 이상이 된다. 그러므로 비록 기선장의 기준값으로 구한 배율의 차이가 간섭계의 측정값과 같게 나왔지만 EDM의 배율을 이 값으로 교정하지는 않았다.

3. 논의와 결론

EDM의 교정을 위해서 미터 정의에 의한 표준기인 I_2 에 주파수 안정된 He-Ne 레이저에서부터 레이저 간섭계, 기준 EDM, 기선장, 피교정 EDM으로 이어지는 소급체계를 구성하였다. 길이 50 m 구간에서 레이저 간섭계를 이용하

여 EDM의 길이와 배율을 각각 0.2 mm와 6×10^6 의 확장 불확도로(95%의 신뢰구간) 교정할 수 있다.

배율의 교정이 가능한 세 가지 교정 방법을 - 간섭계를 이용한 방법, 변조주파수를 측정하는 방법, 기선장을 이용하는 방법 - 비교하였다. 표본으로 배율을 교정한 EDM의 경우에는 세 가지 방법 모두에서 배율이 크게 측정되었다. 그러나 레이저 간섭계나 기선장을 이용한 측정에서는 교정해야 할 배율의 값이 확장불확도에 비해 작으므로 각각의 결과만으로는 “측정값으로 배율을 수정한다”는 대립가설이 기각되었다. 이에 비해 주파수를 이용한 교정 방법은 측정 불확도가 작아 대립가설이 성립했다. 그러므로 주파수 측정법이 공기 굴절률에 의한 배율의 변화를 측정할 수 없어서 불완전한 방법이라는 하지만 표본 EDM의 경우에는 주파수 측정 방법으로 얻은 값(0.42×10^6)으로 배율을 교정하였다.

EDM 기기 영점오차 중에서 반복도를 결정하는 중요한 요인인 주기오차를 레이저 간섭계를 이용하여 측정하였다. 주기오차는 변조파의 반파장마다 반복성을 보였으며 진폭이 약 0.1 mm이었다. 고정된 길이를 측정할 때의 표준편차가 0.1 mm이므로 EDM 자체의 기계적인 반복도는 약 0.1 mm라고 할 수 있다. 이에 비해 기선장을 이용한 EDM의 교정을 통해 얻은 표준편차는 0.71 mm로 기계의 반복도에 비해 7배정도 크게 나타났다. 이는 대부분이 장비를 설치하면서 생긴 개인오차라고 판단된다. 그러므로 정밀 EDM을 이용한 측량 시에는 측량사가 동일한 측정 조건을 유지하는 노력이 있어야 장비의 성능을 최대한으로 발휘할 수 있을 것이다.

레이저 간섭계를 이용한 EDM 교정장치로 최신의 정밀 EDM을 교정하기 위해서는 불확도를 줄이는 노력이 필요하다. 불확도 요인 분석에 의하면 공기 굴절률의 오차와 피교정 EDM의 반복도가 가장 큰 불확도 요인이다. 그러므로 (1)측정 길이를 길게 하고 (2)공기 굴절률을 더 정확히 측정하도록 장치를 개선할 필요가 있다. 또한 피교정 EDM으로 측정하는 회수를 충분히 많이 하여 평균값의 표준편차를 줄여야 한다. 반사경을 이용하여 광경로를 지금

의 4배로 늘리고 3개의 정밀온도계를 설치하여 50 m 구간의 온도 분포를 측정하여 보정하도록 간섭계를 이용한 교정장치를 개선하면 배율 측정의 불확도를 1 ppm이하로 줄이는 것이 가능할 것이다.

감사의글

본 연구는 산업자원부의 표준화사업의 지원을 받아 실시하였습니다.

참고문헌

- 국제도량형위원회 (1999), 국가측정표준 및 국가표준기관의 교정 및 측정 성적서에 관한 상호 인정협약.
- 박경식, 이현직, 함창학 (2003), 시설물측량에서의 무프리즘 토털 스테이션 활용성 연구, 한국측량학회지, Vol. 21, pp. 155-164.
- 정낙삼 (1998), 측정불확도 표현지침, 한국표준과학연구원, 대전.
- 정낙삼 (2003), 국제 측정학 용어집, 한국표준과학연구원, 대전.
- 조재명, 윤홍식, 이원춘 (2004), 정밀 기선장 관측에 의한 EDM 장비의 영점오차와 축척오차의 결정, 한국측량학회지, Vol. 22, No. 2, pp. 137-143.
- 한국산업규격 KSB 5632 (1999), 광파 거리 측정기-육외에서의 성능 측정 방법, 한국표준협회.
- Brown N., Veugen R., Beek G.-J., and Hegers R. F. H. (2003), Recent work at NML to establish traceability for survey electronic distance measurement (EDM), *Proceedings of SPIE*, Vol. 5190, pp. 381-390.
- ISO 12857-3 (1997), Optics and optical instruments-Geodetic instruments-Field procedures for determining accuracy-Part3: Electro-optical distance meters, *International Organization for Standardization*.
- ISO 17123-4 (2001), Optics and optical instruments-Field procedures for testing geodetic and surveying instruments-Part4: Electro-optical distance meters, *International Organization for Standardization*.
- ISO (1993), International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology (VIM), BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML.
- Danzer K. and Currie L. A. (1998), Guidelines for calibration in analytical chemistry, *Pure and Appl. Chem.* Vol. 70, No. 4, pp. 993-1014.

(접수일 2004. 11. 24, 심사일 2004. 12. 18, 심사완료일 2004. 12. 21)