

Measurement of Large Mirror Surface using a Laser Tracker

Eun-Ha Jo^{1,2}, Ho-Soon Yang^{1,2†}, and Yun-Woo Lee²

¹Department of Measurement Science, University of Science and Technology, Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-340, Korea

²Space Optics Research Center, Korea Research Institute of Standards and Science, Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-340, Korea

(Received October 1, 2013; Revised manuscript November 6, 2013; Accepted November 15 2013)

A large optical surface is fabricated by grinding, polishing and figuring. The grinding process is the most rapid and has the largest amount of fabrication of all processes. If we measure the surface precisely and rapidly in the grinding process, it is possible to improve the efficiency of the fabrication process. Since the surface of grinding process is rough and not shiny, it is not easy to measure the surface using light so that we cannot use an interferometer. Therefore, we have to measure the surface using a mechanical method. We can measure the surface under the grinding process by using a laser tracker which is a portable 3-dimensional coordinate measuring machine. In this paper, we used the laser tracker to measure the surface error of 1 m diameter spherical mirror. This measurement result was compared to that of an interferometer. As a result, surface measurement error was found to be 0.2 μm rms (root mean square) and 2.7 μm PV (Peak to Valley), which is accurate enough to apply to the rough surface under the grinding stage.

Keywords: Large optics, Laser tracker, Metrology

OCIS codes: (120.4800) Optical standards and testing; (120.4640) Optical instruments

레이저트래커(Laser Tracker)를 이용한 대형 광학 거울의 형상 측정

조은하^{1,2} · 양호순^{1,2†} · 이윤우²

¹과학기술연합대학원대학교 측정과학과
Ⓣ 305-340 대전광역시 유성구 가정로 267번지

²한국표준과학연구원 우주광학센터
Ⓣ 305-340 대전시 유성구 가정로 267번지

(2013년 10월 1일 받음, 2013년 11월 6일 수정본 받음, 2013년 11월 15일 게재 확정)

대형 광학 거울은 연삭, 연마, 최종연마의 단계를 거쳐 가공된다. 이 가운데 가장 진행이 빠르고 가공량이 많은 연삭 단계에서 정밀하고 신속한 측정이 가능하다면 가공 공정의 효율성을 높일 수 있다. 그런데 연삭 단계의 광학면은 거칠고 광택이 없기 때문에 빛을 이용한 측정이 매우 어렵다. 따라서 간섭계를 사용할 수 없으며 기계적인 방법을 이용하여 면을 측정해야 한다. 레이저트래커는 이동이 가능한 3차원 좌표 측정기로, 이를 이용한 측정 방법이나 데이터 분석을 연구하면 연삭 단계의 광학 거울을 정밀하게 측정할 수 있다. 본 논문에서는 레이저트래커를 이용하여 직경 1 m의 구면 거울의 형상오차를 측정하고, 이 측정 결과를 간섭계로 측정한 것과 비교하였다. 레이저트래커를 이용한 측정법은 형상오차 rms 0.2 μm, PV 2.7 μm의 측정 결과를 얻는 것으로 파악되어 연삭 단계 광학면의 정밀한 측정이 가능할 것으로 보인다.

Keywords: 대형 광학 거울, 레이저트래커, 측정

OCIS codes: (120.4800) Optical standards and testing; (120.4640) Optical instruments

I. 서 론

8.4 m 직경 반사경 7장의 조합으로 25 m에 대등한 주경(primary mirror)과 1.06 m 반사경 7장의 조합으로 3 m에 대

등한 부경(secondary mirror)으로 구성된 GMT(Giant Magellan Telescope)를 비롯하여 VLT(Very Large Telescope), LBT(Large Binocular Telescope), EELT(European Extremely Large Telescope), TMT(Thirty Meter Telescope) 등의 초대형 망원

†E-mail: hsy@kriss.re.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

경을 제작하는 것이 세계적인 추세이다.^[1-5] 보다 높은 해상도를 얻기 위해서는 보다 큰 크기의 망원경이 필요하기 때문인데, 이러한 대형 망원경을 구성하는 요소 중에서도 정밀하게 가공된 대형 광학 거울은 가장 중요한 부품이다.

대형 광학 거울을 가공하기 위해서는 연삭(grinding), 연마(polishing), 최종연마(figuring)의 단계를 거치게 된다.^[6] 각 가공 단계에 적합한 장비를 이용하여 측정을 하는데 그림 1에는 가공 단계별 광학면 측정 장비가 제시되어 있다. 연삭 단계에서는 구면계(spherometer), 연마 단계에서는 형상 측정기(profilometer), 최종연마 단계에서는 간섭계(interferometer)를 이용하여 광학 면을 정밀하게 측정한다.

가공 공정 중에서 진행이 가장 빠르고 가공량이 많은 단계는 연삭 단계이다. 그러나 연삭 단계의 광학면은 거칠고 광택이 없으며 형상오차가 크기 때문에 빛을 이용한 측정이 어려우므로 간섭계를 사용할 수가 없다. 따라서 기계적인 방법을 이용하여 형상오차를 측정하게 되는데, 이 단계에서 광학면을 정밀하고 신속하게 측정할 수 있다면 전체 가공 시간을 단축시켜 가공 공정의 효율성을 높일 수 있다.

연삭 단계의 광학면 측정을 위해 미국 아리조나대학교의 Steward Observatory Mirror Lab은 Swing-arm 형상 측정기를 이용하였으며, 대구경 비구면 형상을 1 μm 이하 수준으로 정밀하게 측정할 수 있다.^[7] 또한 최근 Steward Observatory Mirror Lab은 레이저트래커 플러스 시스템(laser tracker plus system)을 개발하여 직경 8 m인 GMT 주경을 rms 2 μm 수준까지 가공하는데 사용하였다.^[8] 국내에서는 한국표준과학연구원이 연삭 단계의 광학면을 측정할 수 있는 정밀 형상 측정기를 개발하여 1 m 급의 광학면 형상을 1 μm 이하의 정밀도로 측정할 수 있다.^[9] 그러나 이 장비는 측정 대상의 구경(aperture)이 1 m로 제한되어 있고, 1 m 급 광학면의 측정시 약 12.5시간의 다소 긴 측정 시간이 소요된다. 따라서 효율적인 가공을 위하여 새로운 형태의 측정 방법 개발이 필요하였으며, 이를 위하여 레이저트래커를 이용한 방법을 고려하였다.

레이저트래커는 이동이 가능한 3차원 측정기로 리시버(receiver)의 위치를 측정하는 방식이므로 측정 공간에 구애를 받지 않고, 측정 대상의 구경에 제한이 없으며, 측정에 소요되는 시간 또한 짧다. 또한 우리가 측정하고자 하는 대상물의 직경은 대부분 1 m 이하이기 때문에 Steward Observatory Mirror Lab처럼 다양한 부가 장비 없이 정밀한 측정이 가능

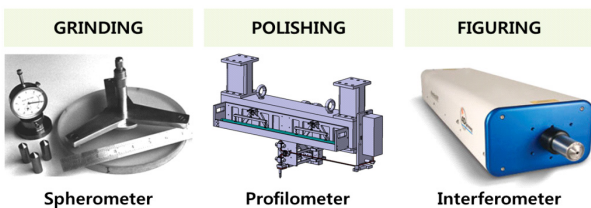


FIG. 1. Method of surface measurement according to the stage of optical fabrication.

할 것으로 예상된다. 그러나 레이저트래커의 측정 정밀도는 ±10 μm 정도이므로,^[10] 광학면을 몇 군데 측정하는 방식으로는 정밀한 측정이 불가능하다. 대신에 많은 양의 데이터를 얻고 데이터 분석을 통해 정밀도를 높일 수 있다면, 수 μm의 정밀도를 가지는 연삭 단계의 광학면을 정밀하게 측정할 수 있을 것이다.

본 논문은 레이저트래커를 이용하여 직경 1 m 구면 거울의 형상오차를 측정하고 간섭계로 측정한 결과와의 비교를 통해 연구를 진행하였다.

II. 레이저트래커의 원리

대형 광학 거울을 측정하는데 사용된 장비는 그림 2에 제시한 Leica사의 레이저트래커(Laser tracker, Leica Absolute Tracker AT901)로 이동이 가능한 3차원 좌표 측정기이다. T-probe, T-scan, 코너큐브(corner cube) 등의 여러 가지 리시버를 이용할 수 있는데, 본 연구에서는 0.5 inch BRR(Break-Resistant Reflector)을 측정에 이용하였다.

그림 3은 레이저트래커의 기본적인 측정 원리를 나타내는 그림이다.^[8] 레이저트래커 내부에 위치한 거리 측정 간섭계(DMI, distance measuring interferometer)가 레이저트래커 헤드와 SMR(Sphere Mounted Retro-reflector) 사이의 거리를,



FIG. 2. Laser tracker and BRR (Break-Resistant Reflector).

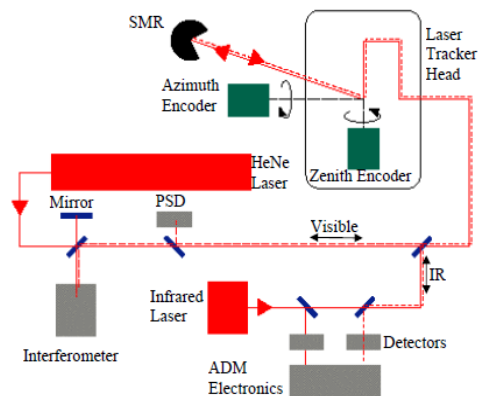


FIG. 3. Principle of laser tracker.^[8]

엔코더(encoder)와 함께 한 쌍의 거울이 두 직교하는 각을 측정한다. 이 세 가지 변수가 측정되면 레이저트래커의 구면극좌표계(spherical polar coordinate system)에 의해 SMR의 위치가 정해진다. 또한 레이저트래커의 되먹임 시스템이 자동으로 거울을 회전시켜서 SMR을 추적하도록 한다.

한편, 레이저트래커는 거리 측정에 대하여 절대 거리 방식(ADM, Absolute Distance Mode)과 상대 거리 방식인 간섭 방식(IFM, Interferometric Mode)를 이용한다. 절대 거리 방식의 거리 측정에서 레이저트래커는 변조 적외선 레이저(modulated infrared laser)를 사용하여 경과 시간(time of flight) 측정 방식으로 레이저트래커 헤드와 SMR 사이의 거리를 계산한다. 이 방법은 간섭 방식보다 비교적 덜 정확하지만, 측정을 시작하는 시점의 좌표 없이도 거리를 계산할 수 있는 장점이 있다. 반면, 간섭 방식의 거리 측정에서 레이저트래커는 내부에 있는 거리 측정 간섭계를 사용하여 SMR이 움직인 시작점의 좌표로부터 현재 위치까지의 간섭무늬를 세는 방식으로 거리를 계산한다. 거리 측정 간섭계는 약 1 nm 정도의 정밀도를 가지므로 거리를 측정하는데 있어서 절대 거리 방식보다 간섭 방식이 더 정밀하지만, 좌표를 알고 있는 지점에서부터 측정하고자 하는 지점까지 SMR과 레이저트래커 사이의 빔(beam)이 끊어지지 않도록 움직여 줘야 한다. 실제 SMR을 이용한 측정에서는 두 가지 측정 방식을 함께 사용하여 좌표를 계산하므로 측정의 정밀도를 높일 수 있게 된다.

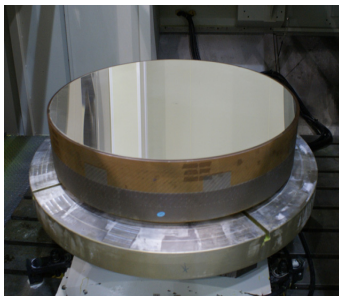


FIG. 4. 1 m diameter spherical mirror.

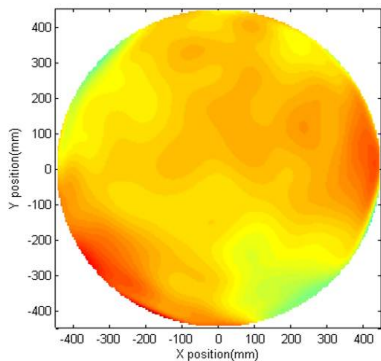


FIG. 5. Surface error measured by interferometer.

III. 측정 대상

본 연구에서 레이저트래커를 사용하여 측정할 대상은 그림 4에 제시된 직경 1 m의 구면 거울이다. 이 구면 거울의 재질은 Zerodur이며 두께는 약 200 mm이므로 직경에 비해 두께가 두꺼워 충분한 강성을 가지고 있다. 간섭계를 이용하여 구면 거울의 형상오차와 곡률 반경을 총 5회 반복 측정하였다. 그림 5에 측정 데이터를 평균하여 얻은 면의 형상오차를 나타내었는데, 형상오차는 rms(root mean square) 40 nm, PV(Peak to Valley) 657 nm로 측정되었다. 이는 레이저트래커를 이용한 실험을 하기 위한 대상물로는 거의 오차가 없는 완벽한 면이라고 할 수 있다. 곡률 반경은 약 4993.3 ± 0.1 mm로 측정되었다.

IV. 측정 방법

레이저트래커를 이용하여 구면 거울을 측정할 때, 구면 거울로의 접근이 용이하도록 BRR의 마운트(mount)를 나무막대에 본드로 접착시킨 후 마운트에 BRR을 붙여 사용하였다. 이 측정 도구를 구면 거울 위에 두고 스캐닝(scanning)하는 방식으로 측정하였는데, 이때 연속 측정 모드를 사용하여 0.1 mm를 움직일 때마다 한 포인트가 측정되도록 설정하였다. 정밀도를 높이기 위하여 측정 데이터 수를 최대한 많이

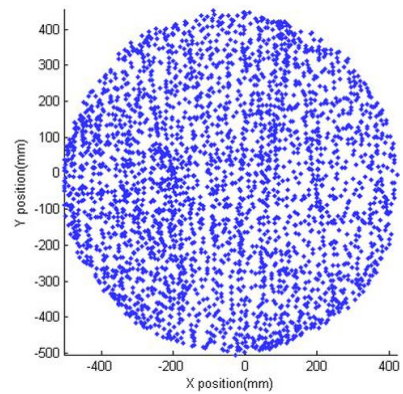


FIG. 6. Measured points scanned by BRR.

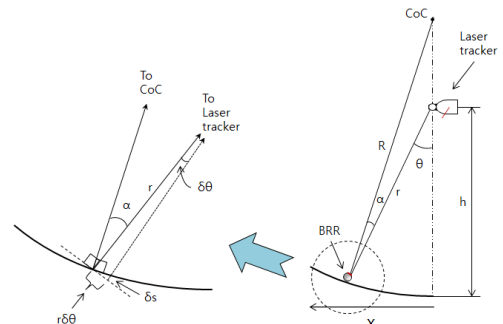


FIG. 7. Schematic diagram describing the measurement error of laser tracker.

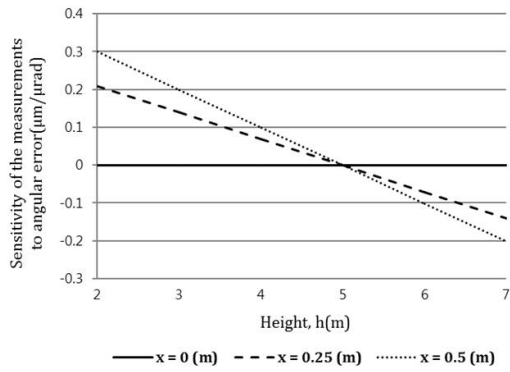


FIG. 8. Sensitivity graph of accuracy of surface measurement related to angular error of laser tracker.

얻었고, 데이터 수가 약 3000개 되었을 때 측정을 완료하였다. 그림 6에 위와 같은 방법으로 측정된 데이터의 분포를 나타내었다. 측정은 총 5회 실시하여 결과를 통계 처리 하였다. 또한 데이터의 기울기 보정을 위하여 가공되지 않은 구면 거울의 가장자리 평면 부분을 별도로 측정하였다.

한편, 레이저트래커로 면의 형상을 측정할 때는 측정물 대비 레이저트래커의 위치가 적절해야 한다. 그림 7은 직경 1 m의 구면 거울 위로 h 만큼 떨어진 높이에 레이저트래커를 위치시킨 도식이다. 여기서 α는 측정점에서 면과 직교하는 축과 측정점에서 레이저트래커를 연결하는 축 사이의 각, θ는 레이저트래커에서 구면 거울의 중심을 연결하는 축과 레이저트래커에서 측정점을 연결하는 축 사이의 각, δθ는 레이저트래커의 각도 오차이다. 측정점에서의 측정 오차는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있는데, 여기서 r은 면에서 레이저트래커까지의 거리이다. 구면 거울에 대하여 sinα는 식 (2)와 같이 계산할 수 있으며, 여기서 R은 거울의 곡률 반경, h는 거울로부터 레이저트래커의 높이, x는 거울 중심으로부터 BRR의 수평 이동 거리이다. 이들을 조합하여 식 (3)의 레이저트래커의 각도 오차에 대한 면 측정 오차의 민감도를 나타낼 수 있다.^[8]

$$\delta s = r \delta \theta \cdot \sin \alpha \tag{1}$$

$$\sin \alpha = \frac{R-h}{R} \cdot \sin \theta = \frac{R-h}{R} \cdot \frac{x}{r} \tag{2}$$

$$\frac{ds}{d\theta} = \frac{R-h}{R} \cdot r \sin \theta = \frac{R-h}{R} \cdot x \tag{3}$$

식 (3)을 바탕으로 각도 오차에 대한 면 측정 오차의 민감도를 그림 8의 그래프에 나타내었는데, 레이저트래커 높이에 따라 면 측정 오차의 민감도가 좌우됨을 알 수 있다. 레이저트래커의 높이가 구면 거울의 곡률 반경인 약 5 m에서 떨어질수록, 구면 거울의 중심에서 가장자리로 갈수록 레이저트래커의 각도 오차에 의한 형상 측정 오차는 더욱 증가한다. 따라서, 레이저트래커를 직경 1 m 구면 거울의 곡률 중심에

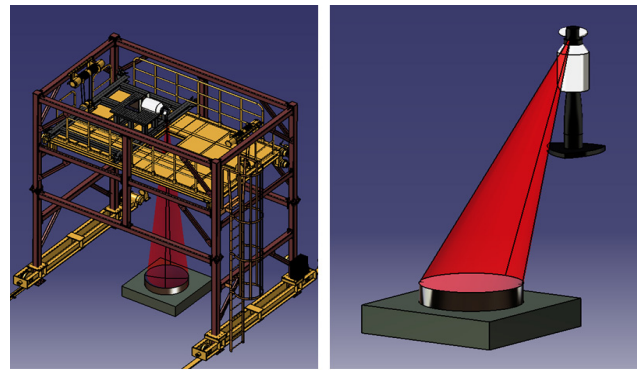


FIG. 9. Experimental set-up (a) Vertical, (b) Horizontal.

TABLE 1. Comparison of ROC measured by vertical and horizontal measurement set-up (ROC means Radius of Curvature) (unit: mm)

Measurement order	Vertical		Horizontal	
	ROC	rms	ROC	rms
1 st	4993.4	0.018	4993.5	6.38
2 nd	4993.5	0.018	4993.0	6.36
3 rd	4993.4	0.017	4993.0	6.37
4 th	4993.5	0.019	4994.0	6.39
5 th	4993.5	0.019	4993.2	6.39
Average	4,993.45	-	4,993.38	-
Standard deviation	0.05	-	0.5	-

설치하면 오차에 의한 민감도를 줄임으로서 레이저트래커의 측정 오차를 최소화할 수 있을 것으로 예상된다.

레이저트래커의 위치에 따른 측정 오차를 비교하기 위하여 레이저트래커를 구면 거울 위에 설치한 것(수직 설치)과 구면 거울 옆에 설치한 것(수평 설치)의 형상오차를 측정하였다. 그림 9의 (a)는 측정 타워와 마운트를 이용하여 측정 대상인 구면의 곡률 중심(구면 거울로부터 약 5000 mm 위에 위치)에 레이저트래커를 설치한 모습이며, 그림 9의 (b)는 측정 대상에서 수평으로 약 3 m 떨어진 위치에 레이저트래커를 설치한 모습이다. 이 두 가지 설치 방법으로 직경 1 m 구면 거울을 측정된 데이터를 통해 곡률 반경을 계산한 결과를 표 1에 나타내었다. 여기서 rms는 곡률 반경과 각 측정 데이터 사이의 표준편차를 의미한다. 실험 결과를 살펴보면, 수직과 수평 설치 모두 간섭계로 측정된 곡률 반경 값과 비슷하다. 그러나 수직 설치 측정의 rms나 곡률 반경 5회 측정에 대한 표준편차가 수평 설치 측정에 비하여 매우 작게 나타났다. 따라서, 레이저트래커를 구면 거울의 곡률 중심에 설치하였을 때의 측정 정밀도가 구면 거울 옆에 설치한 결과보다 높다고 해석할 수 있다. 본 논문의 6장 측정 결과 부분에서 레이저트래커의 수직, 수평 설치를 통해 측정된 데이터를 분석하여 얻은 면의 형상오차를 비교하였다.

V. 데이터 해석

BRR을 이용하여 측정을 할 때 측정 데이터의 좌표는 프로그램 설정에 따라 BRR의 가장 윗부분의 좌표 또는 가장 아랫부분의 좌표로 정해진다. 예를 들어 BRR을 이용하여 평평한 측정면을 측정하게 되면 BRR과 측정면의 접점을 좌표로 얻어 이 측정 데이터를 바로 사용할 수 있다. 그러나 그림 10과 같이 면에 기울기가 있을 때는 BRR과 측정면의 접점을 좌표로 얻지 못하여 측정 데이터(그림 10에서 \vec{x})를 그대로 해석할 수 없게 된다. 따라서 측정한 데이터의 기울기 오차를 보정하여 BRR과 측정면이 접촉된 부분인 보정치(그림 10에서 \vec{x}')를 구하는 방법을 개발하였다.

보정치를 구하기 위해서는 데이터의 곡률 중심 좌표를 알아야 한다. 만약 곡률 중심 좌표 \vec{x}_0 를 알 경우에는 측정 데이터 \vec{x} 로부터 보정치 \vec{x}' 를 구할 수 있다. BRR의 중심 좌표 \vec{x}_c 는 식 (4)와 같이 측정 데이터 \vec{x} 에 z방향으로 r만큼 더해진 좌표가 된다. 측정면이 구면이므로 \vec{x}_c 와 \vec{x}_0 에서 각각 측정면과 BRR의 접점으로 향하는 벡터의 방향은 같다. 이 방향으로의 단위 벡터(unit vector) \hat{n} 이라고 하면, 단위벡터를 \hat{n} 는 식 (5)와 같이 표현된다. 결국 최종 보정치 \vec{x}' 는 \vec{x}_c 에서 \hat{n} 방향으로 r만큼 더해준 값이 되며 식 (6)처럼 나타낼 수 있다. 따라서 임의로 곡률 중심 좌표와 곡률 반경을 설정하고, 이 곡률반경으로 만든 구면과 앞서 계산한 보정치로 만든 구면의 차이를 최소화하는 오차 함수를 통해 곡률 중심 좌표, 곡률 반경, 보정치를 구하였다.

$$\vec{x}_c = \vec{x} + \hat{z}r \tag{4}$$

$$\hat{n} = \frac{\vec{x}_c - \vec{x}_0}{\|\vec{x}_c - \vec{x}_0\|} \tag{5}$$

$$\vec{x}' = \vec{x}_c + \hat{n}r \tag{6}$$

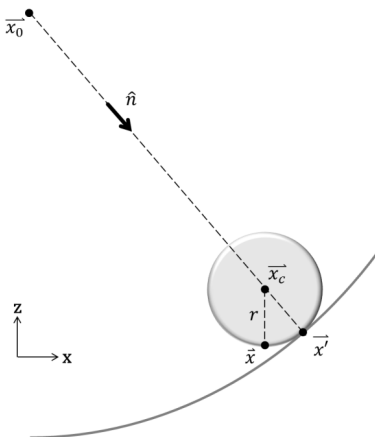


FIG. 10. Compensation of slope error.

보정을 마친 데이터는 측정시 진동이나 BRR과 면의 마찰로 발생한 오차를 줄이기 위하여 앞에서 구한 곡률 중심 좌표와 곡률 반경으로 만든 임의의 면과의 차이가 3 시그마(sigma) 이상 차이가 나는 측정 데이터들을 제거하였다. 또한 광학면의 기울기 보정은 가공되지 않은 구면 거울의 가장자리 평면 부분을 측정된 데이터를 이용하여 처리하였다.

한편, 구면 거울의 형상을 표현하기 위하여 제르니케 다항식(Zernike polynomial) [11]을 이용하였다. 제르니케 다항식은 각 항의 계수가 수치를 나타내는 항들의 합으로 구성되며 각 항들은 서로 직교성(Orthogonality)을 가진다. 반지름 R인 파면 $W(R, \rho, \theta)$ 는 제르니케 다항식의 조합으로 식 (7)과 같이 표현되며, 이때 Z_i 는 각 차수의 제르니케 다항식, c_i 는 그에 해당하는 계수를 나타낸다. 제르니케 다항식 맞춤(fitting)을 위하여 기울기 보정을 마친 데이터를 직교 좌표계(cartesian coordinate system)에서 극좌표계(polar coordinate system)로 변환하고 형상오차의 고차항을 표현하기 위하여 제르니케 다항식 155번 항까지 맞춤하였다.

$$W(R, \rho, \theta) = \sum_{i=0}^{\infty} c_i Z_i(\rho, \theta) \tag{7}$$

VI. 측정 결과

표 2에 측정이나 계산 등에 고려되는 주요 제르니케 항을

TABLE 2. Zernike coefficients of surface error total 20 terms are calculated (unit: μm)

Order	Zernike polynomial	Meaning	Zernike coefficient	
			Vertical measurement setup of laser tracker	Interferometer
5	$\sqrt{6}\rho^2\cos 2\theta$	Astigmatism	0.046	0.028
6	$\sqrt{6}\rho^2\sin 2\theta$	Astigmatism	0.040	0.009
7	$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho)\cos \theta$	Coma	0.013	-0.012
8	$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho)\sin \theta$	Coma	-0.416	-0.006
9	$\sqrt{8}\rho^3\cos 3\theta$	Trefoil	-0.061	-0.008
10	$\sqrt{8}\rho^3\sin 3\theta$	Trefoil	0.022	0.021
11	$\sqrt{5}(6\rho^4 - 6\rho^2 + 1)$	Spherical	3.149	0.008
12	$\sqrt{10}(4\rho^4 - 3\rho^2)\cos 2\theta$	-	-0.010	-0.003
13	$\sqrt{10}(4\rho^4 - 3\rho^2)\sin 2\theta$	-	-0.038	0.005
14	$\sqrt{10}\rho^4\cos 4\theta$	-	-0.080	0.009
15	$\sqrt{10}\rho^4\sin 4\theta$	-	-0.079	0.001
16	$\sqrt{12}(10\rho^5 - 12\rho^3 + 3\rho)\cos \theta$	-	-0.010	-0.002
17	$\sqrt{12}(10\rho^5 - 12\rho^3 + 3\rho)\sin \theta$	-	-0.033	-0.001
18	$\sqrt{12}(5\rho^5 - 4\rho^3)\cos 3\theta$	-	-0.009	-0.001
19	$\sqrt{12}(5\rho^5 - 4\rho^3)\sin 3\theta$	-	0.034	0.001
20	$\sqrt{12}\rho^5\cos 5\theta$	-	-0.010	0.001

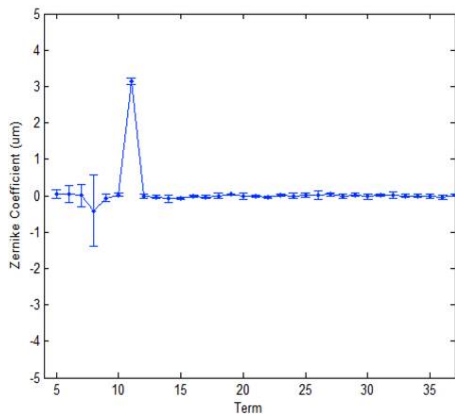
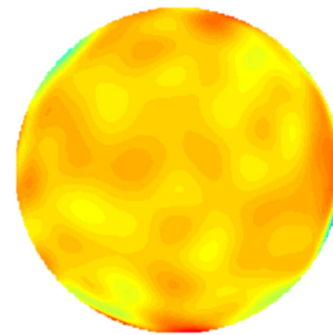


FIG. 11. Zernike coefficients measured by vertical measurement set-up of laser tracker.

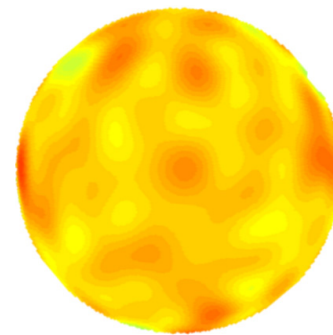
정리하고 수직으로 설치된 레이저트래커를 이용하여 측정된 구면 거울의 제르니케 계수를 간섭계로 측정된 기준면의 제르니케 계수와 비교하였다. 여기서 간섭계와 레이저트래커의 측정방식 차이에 의해 발생하는 제르니케 다항식 1~4번 항의 계수는 생략하였고 편의상 20항까지만 비교하였다. 그림 11에는 수직으로 설치한 레이저트래커를 이용하여 구면 거울을 5회 측정하고 맞춤형 제르니케 계수의 평균과 표준편차를 37번 항까지 나타내었다. 이 두 결과에서 주목할만한 부분은 제르니케 다항식 11번 항인 구면 수차 항 계수의 평균과 제르니케 다항식 8번 항인 코마수차 항 계수의 표준편차가 매우 크게 나타났다는 점이다. 레이저트래커가 측정을 위하여 임의의 각도 만큼 움직였을 때의 각도 오차가 $\Delta\theta$ 만큼 존재하고 이 각도 오차에 따른 위치 오차가 Δs 만큼 존재하게 되면 측정 대상인 구면 거울 형상이 비구면 거울 형상처럼 측정될 수 있다. 따라서 이 측정된 데이터로 제르니케 피팅을 하였을 때는 11번 항인 구면수차 항의 계수가 크게 나타났을 것으로 보인다. 또 제르니케 다항식 8번 항의 계수의 표준편차가 큰 이유도 레이저트래커를 이용한 측정 시 레이저트래커의 헤드가 좌우로 번갈아가며 움직일 때마다 발생하는 무작위오차(random error)에 의한 영향으로 생각된다. 이러한 오차에 대한 원인은 레이저트래커의 오차를 보정할 수 있는 교정(Calibration)작업을 통해 좀 더 분명히 드러날 것으로 생각된다. 현재 이러한 목적을 위해 레이저트래커의 교정 작업을 진행중에 있다. 본 논문에서는 간섭계를 이용하여 측정된 면을 기준면으로 삼았으므로 레이저트래커를 이용하여 측정된 면에서 간섭계 측정시와 큰 차이를 보이는 제르니케 다항식의 저차항 1번 항부터 11번 항까지를 레이저트래커의 오차로 판단하여 나머지 항만을 고려하였다.

그림 12에는 레이저트래커를 이용하여 직경 1 m의 구면 거울을 총 5회 반복 측정된 데이터를 앞서 설명한 것과 같이 분석, 처리하고 각 측정 데이터를 평균한 면의 형상을 간섭계를 이용하여 측정된 기준면과 비교한 결과를 제시하였다. (a)는 간섭계를 이용하여 측정된 기준면으로 형상 오차 rms 0.02 μm , PV 0.6 μm , (b)는 레이저트래커를 구면 거울의 꼭



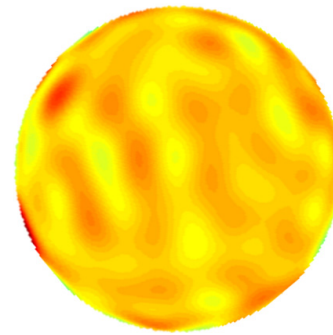
rms	PV
0.02	0.6

(a)



rms	PV
0.2	2.7

(b)



rms	PV
2.0	42.9

(c)

FIG. 12. Surface error, (a) measured by interferometer, (b) measured by horizontal set-up of laser tracker, (c) measured by vertical set-up of laser tracker (unit: μm).

를 중심에 수직하게 설치하여 측정된 것으로 형상 오차 rms 0.2 μm , PV 2.7 μm , (c)는 레이저트래커를 구면 거울에서 수평으로 약 3 m 떨어진 곳에 설치하여 측정된 것으로 형상 오차 rms 2.0 μm , PV 42.9 μm 의 결과가 나타났다. 그림 12의 (a)와 (b)에 제시된 면의 형상오차를 살펴 보면, 그 형태

가 유사함을 알 수 있으며, (c)에 제시된 면의 형상오차의 형태는 (a)와는 상이하게 나타났다. 따라서 수 μm 의 측정 정밀도를 요구하는 연삭 단계의 광학면은 (b)와 같이 레이저트래커를 수직으로 설치한 후에 측정해야 정확하고 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

VII. 결 론

본 논문에서는 레이저트래커를 이용하여 직경 1 m의 구면 거울의 형상오차를 측정하고 데이터를 분석한 내용을 정리하였다. 레이저트래커를 이용한 측정법은 형상오차 rms 0.2 μm , PV 2.7 μm 의 측정 결과를 얻는 것으로 파악되었으며, 연삭 단계의 광학 거울을 정밀하게 측정할 수 있을 것으로 보인다. 그러나 총 5회 측정한 데이터로 제르니케 다항식 맞춤을 했을 때 구면 수차 항의 계수가 반복적으로 나타난 것과 코마 수차 항의 계수의 편차가 크게 나타난 것은 레이저트래커의 교정을 통해 향상될 것으로 예상하여 이에 대한 논의를 진행하고 있다.

현재 표준과학연구원의 우주광학센터에서는 비축 비구면의 GMT 부경을 제작하고 있다. 향후 레이저트래커를 이용한 측정 데이터의 처리 방법에 대해 추가적인 연구가 진행된다면, 연삭 단계의 GMT 부경 또한 정밀하게 측정할 수 있을 것으로 생각된다.

References

1. GMT (Giant Magellan Telescope), "Giant Magellan telescope," <http://www.gmto.org/>.
2. VLT (Very Large Telescope), "Very large telescope," <http://www.eso.org/public/teles-instr/vlt/>.
3. LBT (Large Binocular Telescope), "Large binocular telescope," <http://www.lbto.org/>.
4. EELT (European Extremely Large Telescope), "European extremely large telescope," <http://www.eso.org/sci/facilities/eelt/>.
5. TMT (Thirty Meter Telescope), "Thirty meter telescope," <http://www.tmt.org/>.
6. W. H. Park, "Stylus profilometer with bar type reference mirror for large optical surface testing," Msc Thesis, Yonsei University, Seoul, Korea (2007).
7. D. S. Anderson and J. H. Burge, "Swing-arm profilometry of aspherics," Proc. SPIE **2536**, 169 (1995).
8. T. L. Zobrist, "Application of laser tracker technology for measuring optical surfaces," Ph.D. Thesis, University of Arizona, Tuscan, USA (2009).
9. G. J. Jung, "Distortion compensation technique for reference mirror subsystem for tower mounted 1 m profilometer," Msc Thesis, Yonsei University, Seoul, Korea (2013).
10. Leica Laser Tracker, "Laser tracker AT901," http://www.leica-geosystems.com/en/Laser-Tracker-Systems_69045.htm/.
11. S. C. Choi, H. S. Kim, C. W. Kim, Y. S. Kim, G. W. Lee, and H. K. Kim, "Sensitivity analysis of 20:1 zoom infrared optical system with zernike polynomial coefficients," J. Opt. Soc. Korea **14**, 535-544 (2003).