

사진측량법을 이용한 대덕전파천문대 13.7미터 안테나의 경면 조정 PANEL ADJUSTMENT OF THE TRAO 13.7-m ANTENNA USING PHOTOGRAMMETRY

이창훈¹, 정재훈¹, 강현우¹, 김현구¹, 이영웅¹, 정진오², 손영득², 배민수²

¹한국천문연구원, ²하이게인 안테나(주)

CHANGHOON LEE¹, J. H. JUNG¹, H. W. KANG¹, H. G. KIM¹, YOUNGUNG LEE¹, J. O. JUNG²,
Y. D. SOHN², AND M. S. BAE²

¹Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 305-348, Korea

²High Gain Antenna Co., Ltd., Ansan, Kyungki-do, 425-852, Korea

E-mail: chlee@kasi.re.kr

(Received October 20, 2014; Revised November 14, 2014; Accepted November 22, 2014)

ABSTRACT

We improved the antenna efficiency of the Taeduk Radio Astronomy Observatory (TRAO) 13.7-m radio telescope by adjusting the antenna panels based on digital photogrammetric measurements. First of all, we measured the surface accuracy of the main reflector of this antenna at three elevation angles of 35°, 45°, and 60°. We performed a total of four sets of the photogrammetric measurements and panel adjustments. When adjusting the panels, we positioned the antenna to the zenith and applied the measured data sets at the elevation of 45°. We found that the antenna surface accuracy has been improved by a factor of ~ 3 times after the final adjustment in comparison with the value before the adjustments. And we also found that the antenna surface accuracy tended to be slightly better at the elevation angles of 35° and 60° than that at the elevation angle of 45°. After the final panel adjustment, the aperture and beam efficiencies of the telescope have been improved from 35% to 44%, and from 41% to 51%, respectively.

Key words: antenna panel adjustment; surface accuracy; theodolite measurement; photogrammetry; antenna efficiency

1. 서론

대덕전파천문대에 설치된 13.7미터 전파망원경의 주경면 조정은 1987년 안테나 설치 후 theodolite를 사용해서 수행하였다. 그 당시 230 μm 정도의 표면정밀도로 안테나 경면이 조정되었으며, 그 상태에서 안테나 구경효율과 빔효율은 115 GHz에서 각각 20%와 27% 정도로 측정되었다. 이러한 낮은 효율을 높이기 위해서 1991년과 1997년에 theodolite를 이용해 두 번의 안테나 주경면 조정을 수행하였다. 이때 경면조정 후 가장 좋은 안테나 표면정밀도 값은 170 μm 정도이었으며, 이때의 안테나 구경효율과 빔 효율은 86 GHz에서 38%와 51%로 측정되었다(Kim & Jung 1992; Jung et al., 1997). 1997년 이후 2009년 15쌍켄 어레이 수신기를 설치할 때까지 대덕전파천문대 13.7미터 전파망원경의 안테나 주경면 조정을 시행하지 않아 2009년도의 안테나 구경효율과 빔 효율은 과거에 비해 전 주파수 대역에서 약 12

퍼센트 포인트 정도 저하된 상태였다. 이러한 효율저하에 큰 영향을 주는 요인은 안테나 주경면 표면정밀도이다. 따라서 안테나 효율 향상을 위하여 안테나 주경면 조정이 우선적으로 수행되어야 한다. 대덕전파천문대 13.7미터 전파망원경의 안테나 주경면 조정은 1997년 이후 다중빔 수신기가 설치되어 활용되고 있는 2012년 5월까지 이루어지지 않았다. 2012년 전반기에 관측을 통해 얻어진 안테나 구경효율 값으로 안테나 표면정밀도를 유추해볼 때 약 200 ~ 230 μm 정도로 판단된다.

안테나 주경면 표면정밀도의 측정은 기존에 사용하던 theodolite를 이용하는 방법을 사용하지 않고, 최근 안테나 주경면 조정에 많이 사용되고 있는 사진측량법(photogrammetry) (Brenner et al., 1994)을 도입해서 수행하였다. 이 방법은 3기의 21 m KVN 안테나 경면조정에 활용되어 우수한 결과를 보임을 확인했으며(Kim et al., 2007), 또한 최근 대덕전파천문대 안테나와 똑같은 구

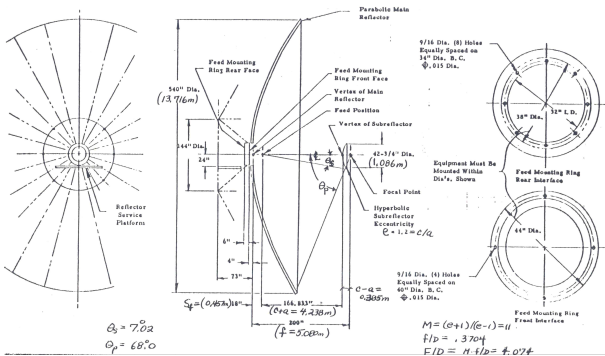


Figure 1. Structural drawing of 13.7 m TRA0 antenna.



Figure 2. Installed ladder inside radome.

조를 갖고 있는 PMO(Purple Mountain Observatory)에서도 2009년 7월 이 방법을 활용해 안테나 구경효율을 115 GHz에서 거의 2배 정도인 57%까지 향상시키는 결과를 보였다(Zuo et al., 2011). 대덕전파망원경 안테나의 사진측량법에 의한 경면 측정은 개방된 안테나와는 달리 20.7 m 직경의 레이돔 내부에 안테나가 설치되어 있어 공간적인 제약이 있다. 본 연구에서는 이러한 제약을 해결하기 위하여 PMO에서 사용한 방법에 착안하여 레이돔 내부에 사다리 형태의 레일을 설치해 사람이 직접 사진을 촬영하는 방법을 채택하였다. 경면조정기의 최종 목표는 빔 효율을 최소 50% 이상으로 유지시키기 위해 표면정밀도 RMS를 150 μm 미만으로 조정하는 것이다.

2. 안테나 경면 측정 및 조정

안테나 주경면 조정에 사용한 사진측량법은 여러 방향에서 찍은 2차원 사진을 이용해 3차원 측정 대상물의 정확한 위치를 측정하는 방법으로, 3각 측량법 원리를 기본으로 하여 2장 이상의 사진으로 측정 대상물에 대한 3차원 좌표를 생성하는 방법이다(Burtch, 2000). 이 방법을 적용하여 표면정밀도를 측정하고자하는 대덕전파천문대 전파망원경은 주경면은 직경 13.7미터의 접시형태로 초점거리가 5,080 mm이고, 부경면은 직경 1.085미터의 쌍곡면(hyperboloid) 형태를 갖는 전통적인 카세그레인 형태로 직경 20.7미터의 레이돔 내부에 설치되어 있다. 주로 사용되는 주파수 대역은 85 ~ 115 GHz이다. 이 안테나의 주경면은 25 μm 표면정밀도를 갖는 2 종류의 알루미늄 패널 72장으로 구성 되어있으며, 각 패널의 위쪽 면에는 theodolite를 이용한 경면 측정에 사용되는 480개의 표적목표가 설치되어 있다. 각 패널은 경면의 높낮이를 조정할 수 있는 볼트 형태의 경면조정 시스템으로 고정되어 있으며, 이 주경면 조정 시스템은 안테나 골격(back structure)에 설치되어 있다. 이러한 안테나의 기하학적인 구조를 Figure 1에 보였다.

2.1. 사진측량법 측정 준비

사진측량법은 3각 측량에 필요한 교차점들을 얻기 위해 공간적으로 제약이 없는 곳에서 많은 사진을 촬영해야 한다. 외부에 노출된 안테나의 경우는 사진촬영 공간이 자유로우나, 대덕전파천문대 안테나의 경우에는 안테나가 직경 20.7미터의 레이돔 내부에 위치하므로 사진촬영 공간에 많은 제약이 있다. 이러한 공간적 제약을 해결하기 위해서 안테나 고도 60°까지 사진 촬영이 가능하도록 레이돔 내부의 곡면을 따라 3단으로 제작된 사다리를 레이돔의 알루미늄 프레임에 고정해 설치하였다. 레이돔과 사다리 사이는 사진촬영자가 이동할 수 있도록 40 cm 정도의 일정한 공간을 두었다. Figure 2에 레이돔 내부에 사다리가 설치된 모습을 보였다.

안테나 주경면과 부경면에 부착되는 retro-reflective 표적은 개별적으로 부착이 가능한 스티커 형태의 단일 표적, 일정한 간격으로 두 개 이상의 표적이 테이프 위에 있는 형태, 딱딱한 형태의 특수한 모양을 갖는 형태, 일정한 위치 기준점 역할을 해 촬영된 사진들의 연결점 역할을 하는 코드 형태의 표적 및 기본 좌표 설정에 필요한 auto-bar 표적 등이 있다. 이러한 표적의 크기에는 3, 6, 12 mm가 있어 측정 대상물의 크기 및 형태에 따라서 선택하여 사용된다. 우리는 12 mm 크기의 개별 스티커 형태의 표적, 자석 형태 표적과 6 mm 크기의 표적 점을 갖는 코드 형태의 표적을 사용하였다. 그리고 거리 보정을 위해 길이가 596 mm, 1096 mm인 scale-bar 2개를 사용하였다. 우리가 사용한 각종 표적을 Figure 3에, 측정된 사진의 분석을 위한 소프트웨어가 설치된 컴퓨터, 사진기, auto-bar 및 scale-bar의 모습을 Figure 4에 보였다.

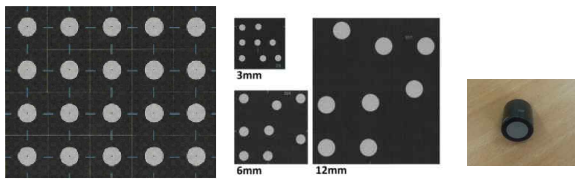


Figure 3. Sticker-type targets (left), coded targets (middle) and magnetic-type targets (right).

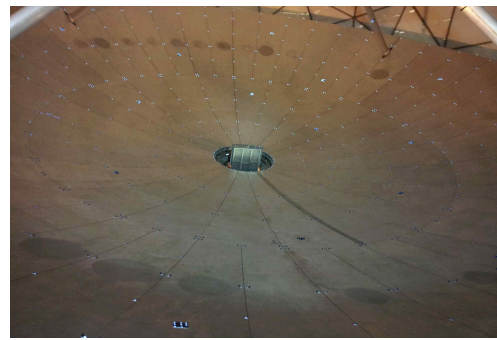


Figure 6. Main reflector with all targets.



Figure 4. Notebook PC, high-resolution digital camera (top), Auto-bar and scale-bar (down).

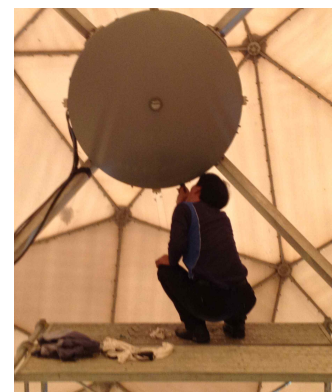


Figure 7. Ring Circle target position and installation.

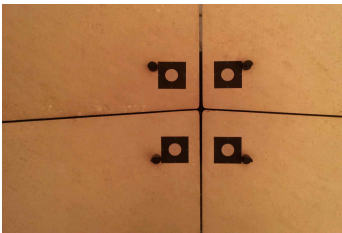


Figure 5. Installed targets on the antenna panels.

14미터 안테나 주경 면에 스티커 형태의 표적을 72장의 안테나 패널 위에 기존에 설치되어있는 480개의 Theodolite 용 플라스틱 표적 안쪽에 Figure 5와 같이 설치하였다. 또한 이 외의 경면이 전체 표면정밀도에 어떤 영향을 주는지 알아보기 위해 조정 볼트 사이사이에 경면용 표적을 추가로 설치하였다. 최종적으로 안테나 경면에 설치된 표적은 안테나 안쪽 경면에 264개 그리고 바깥쪽 경면에 432개로 Figure 6과 같이 설치하였다. 사진측량법에 사용된 좌표는 고도 축을 X-축, 전파 입력 방향 축을 Z-축, 그리고 X-축, Z-축 에 서로 직각인 축을 Y-축으로 하였다.

부경 면에는 feed-ring 중앙에서 부경까지의 거리와 X, Y, Z-축의 tilt값을 측정하기 위해 Figure 3에 보인 ring circle 형태의 자석식 표적을 Figure 7과 같이 부경

의 가장자리 8군데에 설치하였다.

주경 면에 설치된 표적들 사이의 절대적 기하학적 구조와 거리를 보정하기 위해 길이가 서로 다른 596 mm와 1096 mm의 scale-bar 2개는 주경 면 제일 안쪽인 feed-ring 가까운 위치에 설치하였다. 이상과 같은 사다리 설치 및 표적지 부착은 2012년 9월 7 ~ 11일 5일간 진행되었다.

2.2. 사진 촬영 및 경면조정

사진측량법을 이용한 14미터 안테나 주경 면의 표면측정과 조정은 9월12일부터 9월 15일까지 각각 5차례, 4차례 실시하였다. 경면조정은 관측이 가장 많이 수행되는 고도 45°에서 이상적인 포물면이 되도록 하였다. 하지만 주경 면 RMS 측정은 안테나의 고도에 따른 중력 변형의 크기를 조사하기 위하여 1차, 4차, 5차에는 안테나 고도 35°, 45°, 60°에서 실시하였다. 사진촬영은 각각의 안테나 고도에서 안테나를 방위각 250°에서 330°까지 20° 간격으로 이동시키면서 하였으며, 그 중심은 방위각 289° 이다. 또한 분석결과와 분해능을 높이기 위해 사진기를 설치된 사다리의 상, 중, 하 위치로 이동

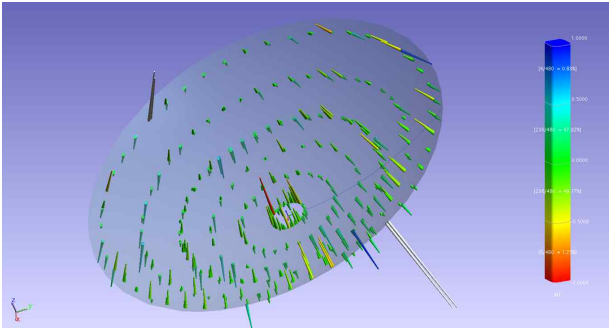


Figure 8. Distribution of the antenna surface errors measured before the panel adjustment.

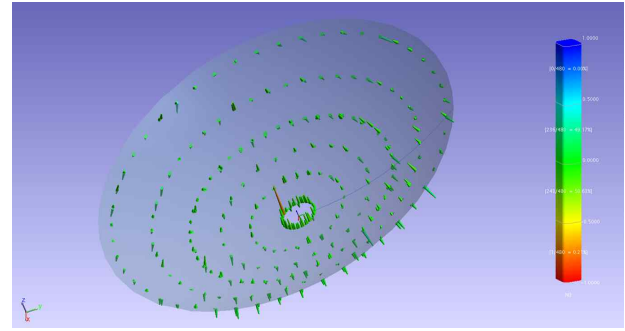


Figure 10. Distribution of the antenna surface errors measured after the 2nd panel adjustment at 45° EL.

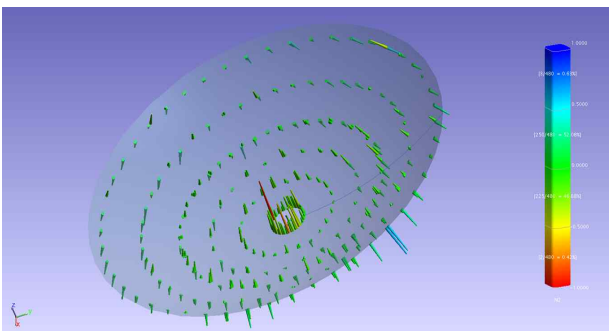


Figure 9. Distribution of the antenna surface errors measured after the 1st panel adjustment at 45° EL.

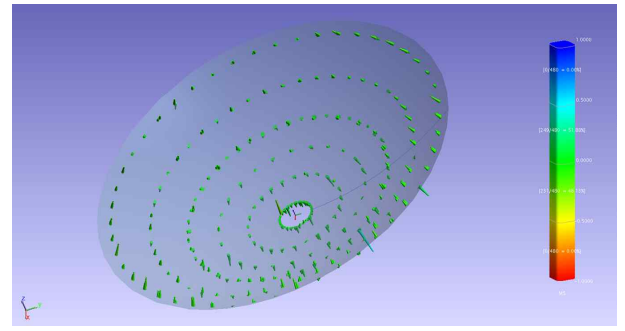


Figure 11. Distribution of the antenna surface errors measured after the final panel adjustment at 45° EL.

하면서 촬영하여 최대한 많은 양의 사진을 확보하고자 하였다.

사진촬영은 사진기 플래시 동작에 모든 표적이 선명히 찍힐 수 있는 어두운 저녁 7시 이후에 레이돔 내부의 조명을 끄고 수행하였다. 1차로 촬영된 이미지를 각 고도에서 분석한 결과 35°에서 264 μm , 45°에서 266 μm , 그리고 60°에서 282 μm 로 나타났으며, 기준고도인 45°에서의 각 조정점의 오차분포를 Figure 8에 보였다. 이러한 값의 계산은 초점거리 5,080 mm인 이상적인 카세그레인 안테나의 표면에 측정값을 피팅하여 얻은 값이다. 이러한 결과는 당초 예상했던 200 ~ 230 μm 정도 보다 더 큰 값으로 안테나의 표면 상태가 아주 나쁨을 확인할 수 있었다. 그리고 고도가 높을수록 상태가 나빠지는 비정상적인 패턴을 보이고 있었다.

안테나 경면조정은 고도 45°에서 얻어진 각 조정점의 값들 중에 ± 0.02 mm 이상의 오차를 갖는 조정점들을 1차 조정하였다. 이 조정은 안테나를 천정방향으로 위치시킨 후 높이를 맞춘 작업대를 레이돔 마룻바닥에 고정하고, 안테나를 방위각으로 10°에서 330°까지 약 30° 정도 간격으로 움직이면서 경면 높이를 조정하는 볼트 너트 시스템의 높낮이 조정을 하였다.

1차 경면조정 후 안테나를 고도 45°에 고정하고 동

일한 방법으로 사진을 촬영하였다. 1차 경면조정 결과, Figure 9와 같이 주경 면 RMS 값이 169 μm 로 급격히 향상 되었다. 또한 Figure 9에 나타난 것처럼 조정 전 오차 분포와 비교해 ± 0.02 mm 이상의 오차를 갖는 위치가 현저히 줄어들었다.

주경 면 조정은 목표 값인 경면 RMS가 150 μm 이하가 되도록 반복적으로 수행되었다. 2차 경면 조정을 실시한 결과, 주경 면 RMS가 Figure 10과 같이 99 μm 정도로 향상되었다. 하지만 아직 측정오차 값이 ± 0.02 mm 이상인 조정점들이 수십 개 나타나 RMS 값에 영향을 주었으며, 696개의 전체 표적지를 이용한 주경 면 RMS도 134 μm 로 나타났다. 목표는 달성하였지만 아직 ± 0.02 mm 이상인 조정점들이 존재하여 3차 및 4차까지 경면조정을 실시하였다. 그 결과 고도 45°에서 조정점(480개의 표적지)의 경면 RMS는 Figure 11과 같이 78 μm 까지 줄일 수 있었으며, 전체 표적지를 이용한 경면 RMS는 109 μm 로 나타났다. 5차례의 측정 결과를 Table 1에 정리하였다.

고도 45°에서 4차례의 조정 작업을 수행하여 얻어진 각각의 RMS 값 변화 양상을 Figure 12에 보였다. 2차 조정까지는 급격한 RMS 변화를 보이나, 3차와 4차에서는 그 변화 정도가 완만함을 알 수 있다.

Table 1. Surface accuracy measured after each panel adjustment (unit: μm)

number of target	1st	2nd	3rd	4th	5th
480	266	169	99	85	78
696	285	195	134	119	109

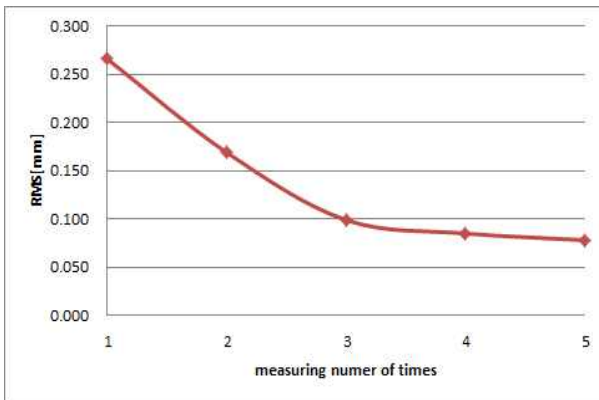


Figure 12. Antenna surface accuracies after four panel adjustment.

고도에 따른 안테나의 중력변형이 주경 면 RMS에 미치는 영향을 조사하기 위하여 주경 면 조정 전/후의 RMS값 변화를 Figure 13에 보였다.

Figure 13에 나타난 것처럼 경면 조정 전에는 고도에 따른 주경 면 RMS 값이 안테나 고도가 높아지면서 커지는 문제가 있었으나, 조정후의 값은 경면조정의 최적화 위치인 고도 45°를 중심으로 커지는 이상적인 결과가 나타남을 확인하였다.

또한 중력과 고도에 따른 부경면의 변화를 측정하기 위해 8개의 표적을 부경 가장자리에 설치해 주경의 피드-링과의 거리를 측정한 결과를 Table 2에 보였다.

2.3. 효율측정

안테나의 효율은 주경 면의 RMS가 가장 큰 영향을 주지만 그 외에도 광축, 초점, 부경 가림, 레이돔 차단 등 많은 요인들과 연계되어 있다. 따라서 안테나의 효율은 실제 천체를 관측하여 측정하게 된다. 주경 면의 RMS가 안테나 효율을 감소시키는 양은 $e^{-(2\pi\delta/\lambda)^2}$ (Ruze, 1966) 이므로 경면 조정 전/후의 효율을 비교해 보면 주경 면 RMS의 변화도 알 수 있다. 여기서 δ 와 λ 는 각각 주경 면 RMS와 관측 파장이다.

관측대상은 금성을 선택하고 86.2 GHz에서 연속파 관측을 2012년 10월 11일에 수행하였다. 관측결과 구경 효율은 경면조정 전 35%에서 44%로, 빔 효율은 41%에

Table 2. Distance from subreflector to feed-ring measured at 35°, 45°, and 60° ELs (unit: cm)

EL position	35°	45°	60°
1	5015.977	5015.671	5015.625
2	5022.369	5022.162	*
3	5028.938	5028.567	5028.279
4	5029.501	5029.176	5029.031
5	5026.738	5026.313	5026.198
6	5019.195	5018.721	5018.563
7	5014.963	5014.558	5014.331
8	5012.768	5012.364	5012.274

* : not read

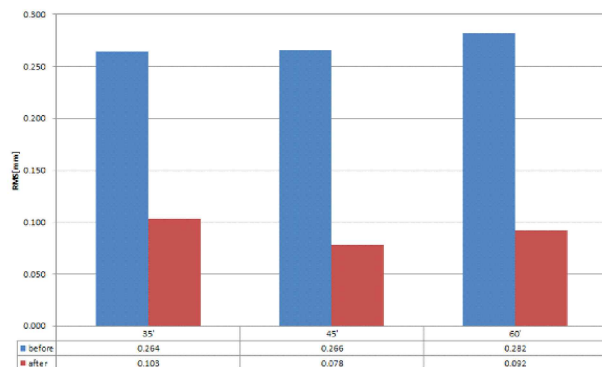


Figure 13. Antenna surface accuracy before/after the panel adjustments at 35°, 45°, and 60° ELs.

서 51%로 향상됨을 확인하였다. 이러한 관측결과로부터 주경 면 RMS는 대략 150 μm 로 추정된다.

3. 결론 및 토의

대덕전파천문대의 14 m 전파망원경의 효율을 향상시키기 위하여 사진측량법을 이용하여 안테나 주경 면 조정을 실시하였다. 2012년 9월 12 ~ 15일 사이에 4회의 주경 면 조정을 실시한 결과 주경면의 경면 RMS는 조정 전 266 μm 에서 78 μm 로 크게 향상되었다. 이러한 RMS값은 480개의 안테나 경면 조정점만을 계산한 것으로 안테나 전체를 대표하는 값이 될 수는 없다. 따라서 우리는 조정점 사이에 216개의 표적지를 추가로 부착하여 총 696 지점의 자료를 이용한 경면 RMS를 측정한 결과 109 μm 로 나타났다. 이는 조정점 사이의 안테나 모양이 포물면을 형성하지 못하고 있음을 암시하는 것으로 각각의 안테나 경면 판넬이 외력에 의하여 제작 당시의 형태에서 변형되었다는 의미이다. 즉, 안테나 전체를 고려하면 경면 RMS는 109 μm 보다 크다는 것이다.

이를 확인하기 위하여 금성을 관측하여 안테나의 효

율을 2012년 10월 11일 측정하였다. 금성의 관측결과 구경효율과 빔 효율은 86 GHz에서 각각 44%와 51% 값을 보였다. 이는 주경 면 조정 전 효율보다 각각 약 10퍼센트 포인트 향상된 것으로 주경 면 RMS는 약 150 μm 정도로 추정된다. 한편 고도에 따른 효율의 변화를 살펴보기 위하여 고도 25°부터 55°까지 추적 관측 하였으나 관측오차 보다 큰 값의 변화를 측정할 수는 없었으며, 이는 figure 13에서 보듯이 고도 35°, 45°, 60°에서 측정된 경면 RMS 차이가 효율에 미치는 영향이 3% 이하인 것과 일치하는 결과이다.

대덕전파 14 m 전파망원경의 경면 조정을 사진측량 방법을 이용하여 성공적으로 수행하였다. 처음으로 시도 되는 방법이었기에 경면 RMS의 목표 값을 높게 설정하여 4차례의 조정으로 만족하였지만, 향후 각각의 안테나 경면 판별의 변형을 최소화하고 정밀조정을 실시한다면 경면 RMS를 100 μm 이하까지 달성할 수 있다는 가능성을 확인하였다.

REFERENCES

- Kim, B. G. & Jung, J. H., 1992, A Efficiency of TRAO 13.7 m Radio Telescope, PKAS, 7, 1
- Kim, H. R., et al., 2007, Construction of the Korean VLBI Network(7th Year), KASI Research Report
- Jung, J. H., Kim, H. G., Kim, T. S., Chung, H. S., & Park, Y. S., 1997, Surface Figure of 14 m Radio Telescope Measured by Theodolite, PKAS, 12, 1
- Brenner, M. J., Ellder, A. J., & Zarghamee, M. S., 1994, Upgrade of a Large Millimeter-Wavelength Radio Telescope for Improved Performance at 115 GHz, IEEE Proceeding, 82, 5
- Burtch, R., 2000, Analytical Photogrammetry Lecture Notes, The Center for Photogrammetry Training, SURE 440
- Ruze, J., 1966, Antenna Tolerance Theory-A Review, IEEE Proceeding, 54, 4
- Zuo, Y. -X., Li, Y., Sun, J. -X., Yang, J., Li, J. -J., Xu, Y., He, D. -Y., Fan, Q. -H., & Fan, S. -H., 2011, A Research on the Gravity Deformation of Delingha 13.7 m Telescope, CAA, 35