

통신방송위성 안테나 얼라인먼트 측정

윤용식*, 박홍철**, 손영선***, 이병기****

Alignment Measurement for Communication Satellite Antenna

Yong-Sik Yoon*, Hong-Chul Park**, Young-Seon Son***, Byoung-Gi Lee****

Abstract

The three-dimensional precision measurement technology for industrial product of middle and/or large scale has been developed. Theodolite measurement system which is one of the technology is widely used in aerospace industry. This paper describes a range alignment method of parabolic antenna to RF probe in the near field range by using the theodolite system. The range alignment of the Ku-band and Ka-band antennas has been accomplished within the requirements, $\pm 1 \text{ mm}$ and $\pm 0.05^\circ$.

초 록

최근 중·대형 산업품에 대한 비접촉식 3차원 정밀 측정 장비가 개발되고 있다. 이러한 장비 중 하나인 테오드라이트 측정 시스템이 항공우주산업에 널리 활용되고 있다. 본 논문에서는 테오드라이트 시스템을 이용하여 근역장에서의 RF 프로브에 대한 위성체 탑재 안테나의 레인지 얼라인먼트 측정 방법을 기술하였다. Ku-band 및 Ka-band 안테나의 레인지 얼라인먼트 측정 및 조정을 측정 정확도 $\pm 1 \text{ mm}$ 및 $\pm 0.05^\circ$ 이내에서 성공적으로 수행하였다.

키워드 : 레인지 얼라인먼트(range alignment), 정렬측정(alignment measurement), 테오드라이트(theodolite), 3차원 정밀측정(3-Dimensional precision measurement), 측정구(tooling ball)

1. 서 론

우주 공간 상에서 운용되는 인공위성은 고진공 및 200℃ 이상의 온도차 등의 우주 환경 하에서 그 기능을 수행하게 된다. 따라서 인공위성은 지상에서 우주궤도와 유사한 환경을 모사하는 환경 시험을 통하여 그 성능을 검증한다. 특히 통

신 위성용 안테나는 미세한 형상 변화에 따라 성능이 좌우되는 장치이므로 환경변화에 따라 형상의 변형이 발생할 수 있어 환경시험 전·후에 성능 변화를 측정하여야 한다. 이러한 성능 시험 가운데 하나인 안테나의 복사 특성(radiation characteristics)이 정밀하게 측정되어야 한다. 이를 위해서 시험장비와 안테나 간에 정확한 얼라

* 우주시험그룹/ysyoon@kari.re.kr

*** 우주시험그룹/sonys@kari.re.kr

** 우주시험그룹/hcpark@kari.re.kr

**** 우주시험그룹/cinsky@kari.re.kr

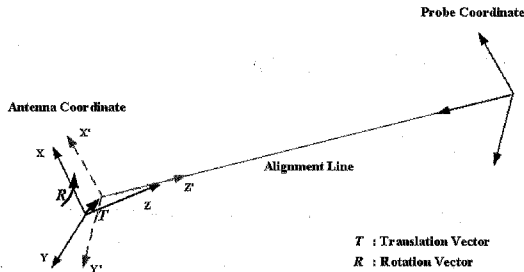


그림 1. 레인지 얼라인먼트

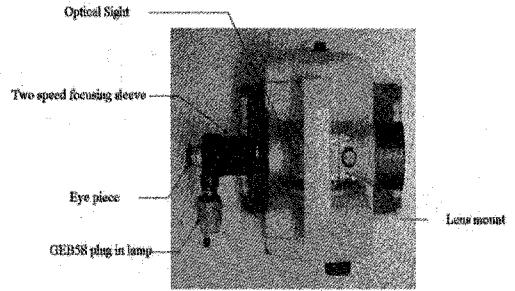
인먼트 측정 및 조정이 선행되어야 한다[1].

본 논문은 통신위성에 탑재되는 Ka-band 안테나와 Ku-band 안테나에 대한 근역장(near field range) 시험을 수행함에 있어서, 그림. 1과 같이 안테나의 주반사면(main reflector)에 의해 정의되는 안테나 좌표계의 축(antenna coordinate axes)을 RF 프로브(probe)의 이동면(scanning plane)의 중심에 정의되는 좌표계의 축(probe coordinate axes)과 정렬하는 레인지 얼라인먼트(range alignment) 측정 방법에 관한 것이다. 이에 따라 비접촉식 3차원 정밀측정 장비인 디지털 테오드라이트를 이용한 측정방법 및 결과에 대하여 기술하였다.

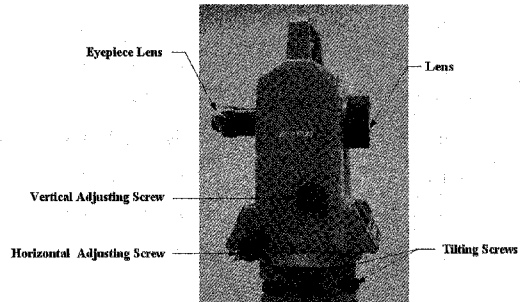
2. 테오드라이트의 측정 이론

2.1 테오드라이트의 구조

테오드라이트는 수평 및 수직각을 측정하는 장비이다. 일반적으로 테오드라이트는 건축 및 토목분야의 측지 측량에 많이 사용하고 있는 범용 테오드라이트가 많이 알려져 있다. 그러나 적용 대상에 따라 다양한 테오드라이트가 사용되고 있다. 측지 측량이나 거리 측정 시 1대의 테오드라이트만으로 측정이 가능한 토탈 스테이션(total station), 산업 구조물 등의 정밀 수평 측정 및 확인 시 사용되는 사이트 레벨(sight level), 비접촉식 3차원 정밀 측정 시 교차 측정(inter-section measurement)용 테오드라이트가 있다. 비접촉식 3차원 측정에는 그림. 2에서와 같이 0.1"(decimal arc seconds)의 분해능



(a)



(b)

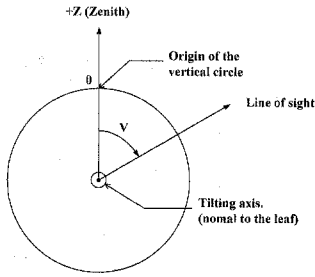
그림 2. 테오드라이트 구조

(resolution)을 가진 인코더(encoder)를 내장한 디지털 방식으로 운용되는 테오드라이트를 사용한다. 특히, 방향좌표 측정에서 필수장비인 테오드라이트는 그림. 2에서와 같이 대안렌즈 및 대물렌즈를 가진 망원경부(telescope), 인코더가 내장되고 표적의 초점을 맞추기 위한 조절기 및 계기 조작판이 있는 본체부와 수평 및 수직을 조절하는 장치를 가진 받침부로 구성되어 있다.

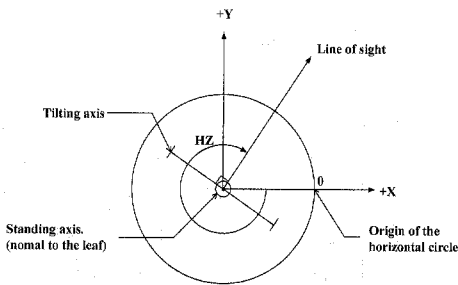
2.2 테오드라이트의 좌표계

테오드라이트는 그림. 3 (a)와 같이 수직각(AV)이 측정되는 틸팅 축(tilting axis)과 그림. 3 (b)와 같이 수평각(AH)이 측정되는 스탠딩 축(standing axis)인 2개의 회전축이 있다. 테오드라이트의 좌표계에는 직각 좌표계가 사용되므로 X축은 테오드라이트의 수평 원판 위에 영점을 통하여 설정되고, Y축은 수평 원판의 X축에 직각인 방향을 통하여

설정되며, Z 축은 오른손 법칙에 따라 다른 2 개의 축과 수직으로 설정되어 운용된다.



(a) Side View



(b) Top View

그림 3. 데오드라이트 좌표계

이때 데오드라이트의 원점이 측정의 중심이 된다[2,3].

2.3 데오드라이트 측정 각도의 계산

그림 4.에서 표적의 위치가 t_x, t_y, t_z 이고, 데오드라이트의 위치가 T_x, T_y, T_z , 데오드라이트의 회전각을 T_ω, T_ϕ, T_k 라 하면, 측정을 위해 데오드라이트를 회전하는 경우에 다음의 식 (1)을 이용하여 데오드라이트 각도 코사인 행렬을 구할 수 있다[4,5].

$$\begin{aligned} \sin w &= \sin(T_\omega) \\ \cos w &= \cos(T_\omega) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sin p &= \sin(T_\phi) \\ \cos p &= \cos(T_\phi) \\ \sin k &= \sin(T_k) \\ \cos k &= \cos(T_k) \end{aligned} \quad (1)$$

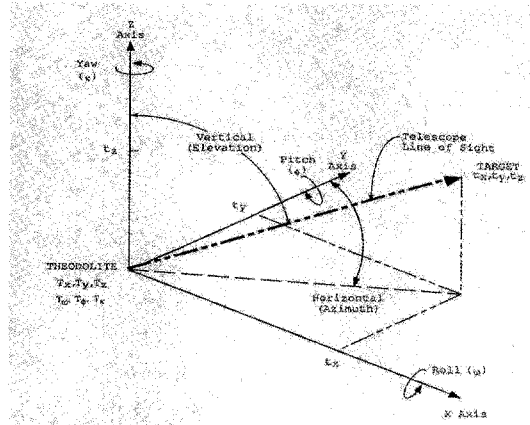


그림 4. Axy그래픽 시스템과 타겟의 벡터들

$$\begin{aligned} m11 &= (\cos p \cdot \cos k) \\ m12 &= (\cos w \cdot \sin k) + (\sin w \cdot \sin p \cdot \cos k) \\ m13 &= (\sin w \cdot \sin k) - (\cos w \cdot \sin p \cdot \cos k) \\ m21 &= (-\cos p \cdot \sin k) \\ m22 &= (\cos w \cdot \cos k) - (\sin w \cdot \sin p \cdot \sin k) \\ m23 &= (\sin w \cdot \cos k) + (\cos w \cdot \sin p \cdot \sin k) \\ m31 &= (\sin p) \\ m32 &= (-\sin w \cdot \cos p) \\ m33 &= (\cos w \cdot \cos p) \end{aligned}$$

다음에 표적과 데오드라이트 사이의 거리 인자는 다음 식 (2)로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} D_x &= t_x - T_x \\ D_y &= t_y - T_y \\ D_z &= t_z - T_z \end{aligned} \quad (2)$$

또한, 주어진 데오드라이트의 방향과 표적까지의 방향 벡터는 다음 식 (3)으로 구할 수 있다.

$$V_i = m11 \cdot D_x + m12 \cdot D_x + m13 \cdot D_x$$

$$V_j = m_{21} \cdot D_y + m_{22} \cdot D_y + m_{23} \cdot D_y \quad (3)$$

$$V_k = m_{31} \cdot D_z + m_{32} \cdot D_z + m_{33} \cdot D_z$$

상기 식(1)과 (3)으로 테오드라이트의 수평각(AH)과 수직각(AV)은 다음 식 (4)에 의하여 구할 수 있다.

$$AH = \text{atan}(V_i/V_j) \quad (4)$$

$$AV = \text{atan}(\text{sqrt}(V_i^2 + V_j^2)/V_k)$$

2.4 테오드라이트 시스템의 측정원리

테오드라이트는 수직 축(vertical axis)을 기준으로 하여 수평각을 측정하며 수평 축(horizontal axis)을 기준으로 하여 수직 각을 측정할 수 있는 장비다. 테오드라이트 받침부에 설치되어 있는 높이 조절기(tilting screw)를 조정하여 테오드라이트의 수직 축이 중력 반대방향이 되도록 함으로써 수직 각의 영점 기준을 설정한다[6].

테오드라이트 측정 시스템은 그림. 5와 같이 2대 이상의 테오드라이트를 데이터 처리 시스템에 RS-232 선으로 연결하여 측정을 수행한다. 두 대 이상의 테오드라이트가 3차원 공간의 점들을 측정하기 위한 위치에 고정된다. 먼저, 두 테오드라이트를 마주 보면서 서로 기준을 맞추고, 기준자(scale bar)를 통해 두 개 이상의 점을 동시에 측정하여 표준 길이를 설정한다.

다음에 이들 테오드라이트가 동시에 측정 점을 맞추면 시준선(line of sight)이 3차원 공간의 측정 점을 교차하면서 삼각형이 형성된다. 이때 측정 점은 수평 각 α_1 과 α_2 로, 수직 각 β_1 과 β_2 로 정의된다. 이 값들은 데이터 처리기 시스템을 통해 테오드라이트 1을 기준으로 하는 3차원 좌표 값들로 변환된다[5].

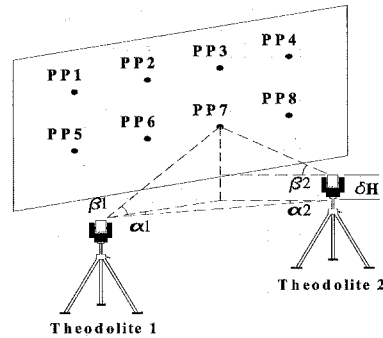


그림 5. 테오드라이트 시스템의 측정원리

3. 측정 준비

3.1 테오드라이트의 설치 및 시준

레이저 얼라인먼트 측정시 프로브가 바닥으로부터 약 3.5 m 높이에 위치되어 있어 안테나는 이 위치를 중심으로 설치되었다. 이에 따라 그림. 6과 같이 먼저 테오드라이트를 위치시키는 이동식 고정대(portable tooling stand)에 확장기구(extension rod)를 사용하여 높이 방향으로 확장하고, 측정이 가능한 위치에 테오드라이트를 고정시켜 표적을 시준할 수 있는지를 확인하였다. 다음에 RS-232 선으로 테오드라이트와 데이터 처리 시스템과 연결하였다. 그리고 측정 전에 검·교정을 마친 테오드라이트에 설치된 3개의 지지대를 조정하여 수평과 수직을 약 10" 이하의 각이 되도록 조정하였다. 다음에 데이터 측정 시스템을 사용하여 두 대의 테오드라이트를 시준(collimation)하였다. 이를 통하여 한 대의 테오드라이트를 기준 점으로 하는 두 대의 테오드라이트 사이의 거리를 확인하게 된다. 마지막으로 기준자에 부착된 3개 이상의 표적을 측정하여, 3차원 측정의 기준 선 길이를 설정하였다. 본 측정에 사용된 기준자는 부착된 표적간의 거리가 한국표준연구원에서 확장 불확도 ± 0.01 mm로 검·교정된 것을 사용하였다 [7].

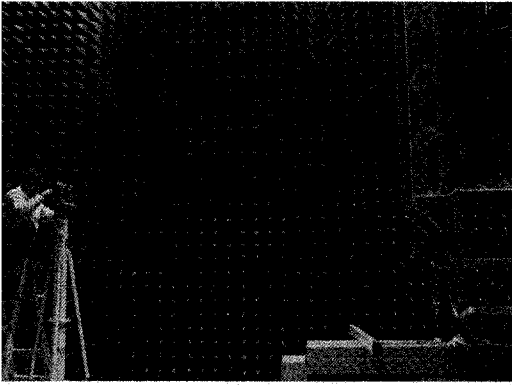


그림 6. 데오드라이트의 설치

3.2 측정구의 설치

곡면으로 제작된 위성탑재용 안테나의 3차원 측정을 위해서는 안테나의 표면을 모두 측정하는 것보다 안테나를 대표할 수 있는 특정점을 측정하는 것이 효과적이다.

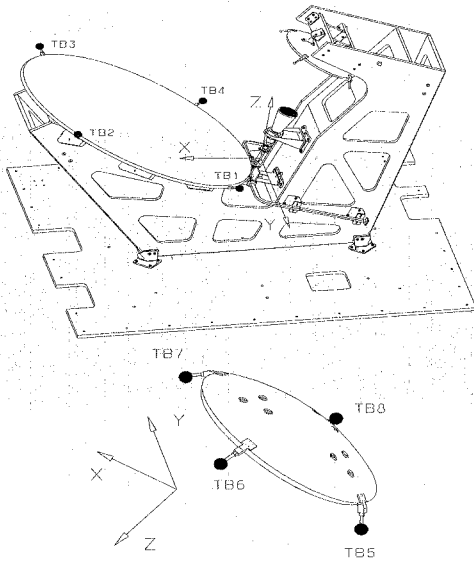


그림 7. Ka-band 안테나의 좌표계와 툴링볼 설치위치

이를 위해 각 안테나에 그림. 7과 그림. 8에 나타난 것과 같이 안테나의 반사면 끝단에 측정구

(tooling ball)를 설치하였다. 측정구는 안테나 제작시 레이저 추적기(laser tracker)를 이용하여 안테나의 좌표계를 측정하는데 사용된 것으로 본 데오드라이트 측정의 측정 타겟으로 사용하였다. 이 측정구는 매끄러운 금속 구체이기 때문에 어떠한 광원으로부터 입사되는 빛은 그 중심부로 들어오는 빛만이 다시 광원 방향으로 반사되어 돌아가고 나머지 부분에서는 다른 방향으로 반사된다. 따라서 데오드라이트의 각 관측 부분에서 나아간 빛은 측정구 표면상에서 반사되어 측정자에게는 하나의 밝은 점으로 보이며 이것이 각 관측 부분에서 보이는 측정구의 중심점이 된다.

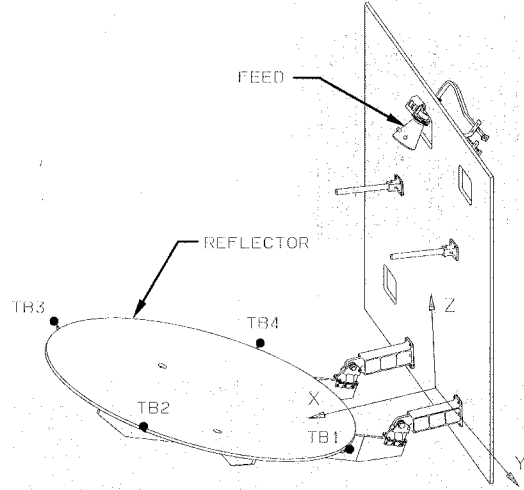


그림 8. Ku-band 안테나의 좌표계와 툴링볼 설치위치



그림 9. 툴링볼 측정

본 측정에서는 그림. 9와 같이 측정 부위에서 전등을 이용하여 측정구를 비추고 이때 반사되는 점을 찾아 측정구를 측정하였다.

3.3 기준점의 위치선정 및 RF 프로브 이동면 측정

근역장에 설치된 RF 프로브는 $\pm 0.5 \text{ mm}$ 이하의 정확도로 원격 조정되어 프로브와 수직을 이루는 면 위를 이동하는 장치이다. 이때, Ka-band와 Ku-band 안테나를 프로브가 움직이는 이동 면과 수직이 되도록 조정하여야 한다. RF 프로브 이동면의 측정은 그림 10 (a)와 같이 프로브 끝단에

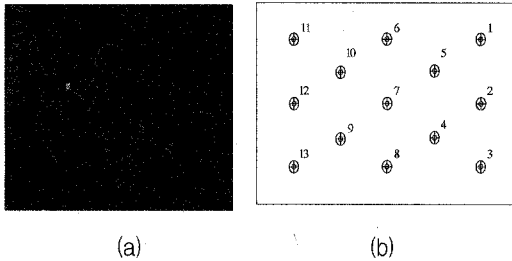


그림 10. 프로브의 설치와 위치선정

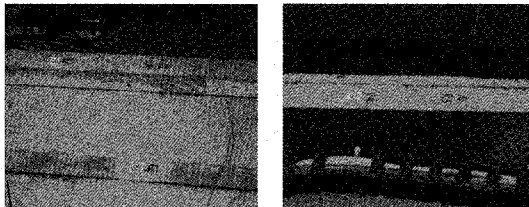


그림 11. 기준점 위치

표적을 부착한 후 프로브를 이동시켜 그림. 10 (b)와 같은 순서로 13곳의 위치에서 RF 프로브의 3차원 좌표를 3회 반복 측정하였다. 그러나 근역장 시험 시설의 공간적 제한으로 인하여 안테나에 설치한 측정구와 RF 프로브의 이동면을 동시에 측정할 수 없었다. 따라서 안테나 측정 위치와 프로브 이동면의 측정 위치에서 동시에 측정 가능한 기준점(reference points)을 선정하여 측정구와 RF 프로브 이동면의 좌표계에 대한 관계를 정의할 수 있도록 하였다. 이와 같은 기준점은 진동 등과 같은 외부요인으로 부터 측정결과에

영향을 미치지 않도록 그림. 11과 같이 고정된 바다 면에 3개 이상의 점을 선정하여 3회 반복 측정하였다.

IV. 측정 및 결과

4.1 Ku-band 안테나 측정

Ku-band 안테나 측정에서 프로브 이동면을 측정할 수 있는 위치에서는 안테나의 측정구가 측정 불가능하고 측정구가 측정 가능한 위치에서는 프로브 이동면의 측정이 불가능하므로 그림. 12와 같이

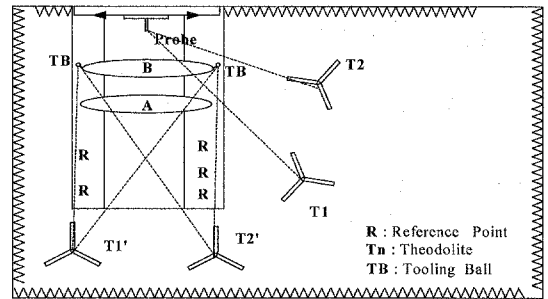


그림 12. Ku-band 안테나의 측정 개략도

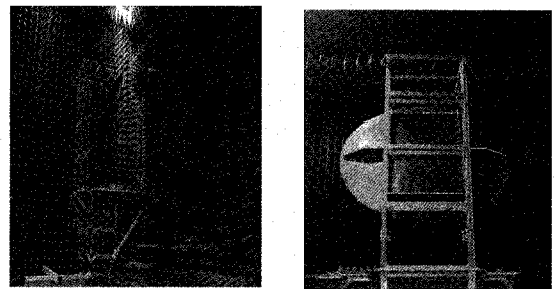


그림 13. Ku-band 안테나의 측정 형상

먼저 T1, T2에 각각 테오드라이트를 위치시킨 후 Ku-band 안테나를 A 위치에 이동시켜 프로브 이동면을 측정하고 기준점을 측정하였다. 다음에 테오드라이트를 T1'와 T2'이동하고 안테나는 B위치로 이동시켜 안테나의 측정구와 기준점 R의 3차원 좌표 값을 측정하였다. 그림. 13. (a)는 테오

드라이트의 위치가 T1, T2 위치에서의 측정 형상이며 그림. 13 (b)는 T1', T2' 위치에서의 측정 형상이다.

4.2 Ka-band 안테나 측정

Ka-band 안테나는 2개의 반사면이 있어 측정 위치를 조정하여 측정을 수행하기 어렵다. 따라서 별도의 장소에서 그림. 14에 보는 바와 같이 먼저 Ka-band 안테나 측면에 표적을 부착하고 측정구와 표적을 동시에 측정하여 측정구와 표적의 3차원 공간상의 상대좌표를 구한다. 이를 데이터 처리 시스템과 안테나 좌표계 상의 측정구의 좌표 정보를 이용하여 표적의 안테나 좌표계

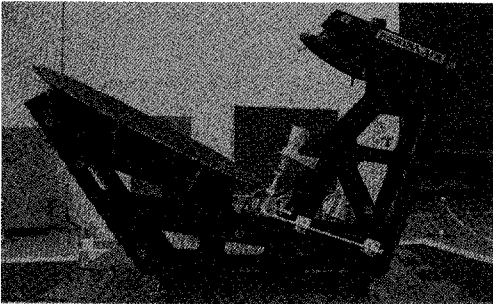


그림 14. Ka-band 안테나의 측정포인트 위치

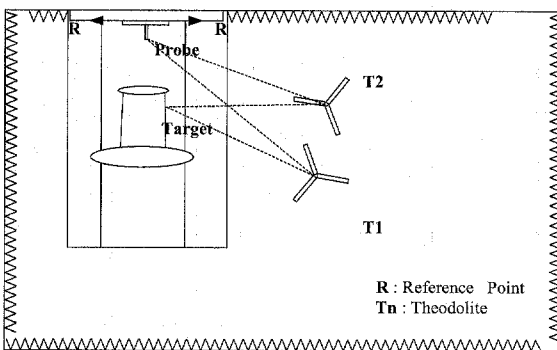
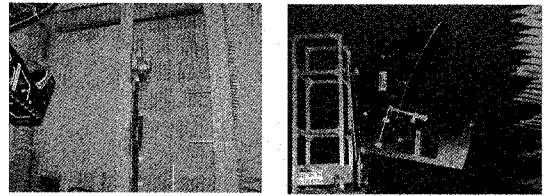


그림 15. Ka-band 안테나 측정을 위한 데오드라이트 위치



(a) (b)
그림 16. Ka-band 안테나의 측정 포인트

상의 3차원 좌표를 구한다. 이 경우 측면에 부착된 표적만을 이용하여 측정이 가능하다. 따라서 그림. 15와 같이 데오드라이트를 T1, T2에 위치시키고 측정하였다. 이때 기준점은 Ku-band 안테나와 동일한 위치에 위치가 되지 않아 RF 프로브 이동면의 양 끝단에 새로운 기준점 R을 선정하여 측정을 수행하였다. Ka-band 안테나의 측정은 4.1절의 Ku-band 안테나와 동일한 순서로 실시하였다. 즉, 그림. 16 (a)와 같이 프로브 이동면을 측정한 후 그림. 16 (b)와 같이 Ka-band 안테나 상의 표적을 측정하였다.

4.3 측정 데이터 해석

각각의 Ku-band 및 Ka-band 안테나 측정은 3회 이상 실시하여 측정 평균값을 산출하였다. 이는 측정 중 발생할 수 있는 측정 오차를 최소화하기 위한 것이다.

측정이 완료된 후 데오드라이트 시스템에서 정의된 측정 좌표계와는 독립된 안테나의 좌표계와 프로브 좌표계 간의 얼라인먼트 상태를 확인하기 위하여 4.1절과 4.2 절과 같이 별도로 측정된 3차원 좌표 값들을 하나의 좌표계로 통합하여야 한다. 이와 같은 데이터 처리는 프로브 좌표계를 기준으로 하는 회전편차와 병진편차의 형태로 쉽게 확인할 수 있기 때문이다.

그러나 프로브 이동면의 경우 사실상 모든 측정 데이터가 정확한 수학적 평면상에 존재하는 것이 불가능하며, 안테나 측정의 경우는 제작 시 측정된 데이터와 정확히 일치하는 것이 불가능하다. 따라서 측정 중 확인된 오차를 제외한 모든

데이터를 이용하면서도 가장 오차가 작은 좌표계 및 평면을 정의하기 위하여 최적화된 결과가 요구된다. 이를 위하여 기존에는 3차원 측정값을 CATIA 등의 CAD 프로그램에 직접 입력하여 분석을 수행하고 최소 오차를 가진 값을 산출하였다. 그러나 테오드라이트 데이터 처리 프로그램인 Axyz의 기능 중 하나인 "best fit" 기능을 이용한 결과 좌표계를 자유롭게 변환시키면서 CAD 프로그램을 이용할 경우보다 빠르고 신뢰성 높은 분석을 할 수 있었다.

그림. 17은 Ka-band 안테나 측정시의 데이터 처리과정을 보여주고 있다. 즉, 측정된 프로브의 삼차원 좌표값을 이용하여 그림. 17의 우측에 나타나는 최적화된 면을 형성하고 이 중심부에 프로브 좌표계인 Default/PL_Probe를 만든다. 또한 안테나의 측정으로 얻은 좌표값을 이용하여 안테

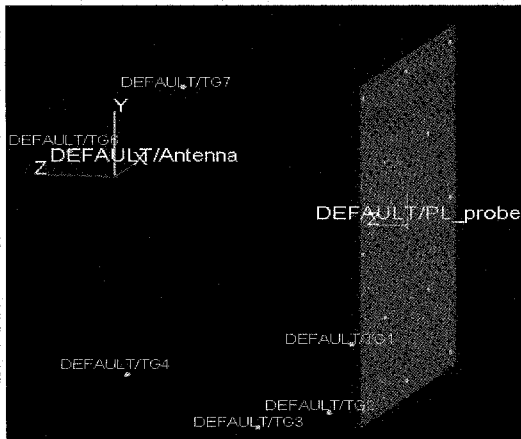


그림 17. 측정 데이터를 이용한 최적화된 평면 형성

나 좌표계 Default/Antenna를 만든다. 다음에 이 두 좌표계 중 어느 하나의 좌표계를 기준좌표계로 설정하면 좌표계 사이의 거리 및 각도 정보를 바로 확인할 수 있었다.

4.4 측정결과

본 레인지 얼라인먼트는 환경시험 전과 후의 성능 시험 수행 전에 각 안테나에 대해 실시하였다. 먼저 안테나를 각 축에 대하여 각도가 0.001°, 위치가 0.01 mm 단위로 조정이 가능하도록 제작되어진 미세 조정 장치 위에 설치하였다.

다음에 얼라인먼트 측정을 수행하고 분석결과를 요구조건과 비교하여 조정을 한 후 재 측정을 실시하는 것을 약 3~5회 반복하여 다음과 같은 측정 결과를 얻었다. 이때 요구 조건은 병진 편차 (translation deviation)가 각 X, Y, Z 축에 대하여 ± 1 mm 이내가 되어야 하며 회전 편차 (rotation deviation)는 각 축의 방향으로 ± 0.05° 이내가 되어야 한다.

4.4.1 Ku-band 안테나의 레인지 얼라인먼트 결과

표 1.에서 나타난 바와 같이 안테나 반사면 중심축과 RF probe의 이동면 중심축과의 병진편차에 대해서는 X, Y, Z 세 방향 모두 시험전·후에 제작 상태 그대로 얼라인먼트 작업을 통하여 조정할 수 있었다. X방향 회전 편차의 경우 안테

표 1. Ku-band 안테나의 레인지 얼라인먼트 결과

Function test	Reflector	Requirement	Deviation		
			X	Y	Z
Initial	Translation (mm)	Tx,Ty,Tz < ± 1	0.0	0.0	0.0
	Rotation (deg)	Rx, Ry, Rz < ± 0.05	0.056	0.00	0.00
Final	Translation (mm)	Tx, Ty, Tz < ± 1	0.0	0.0	0.0
	Rotation (deg)	Rx, Ry, Rz < ± 0.05	0.025	0.012	0.005

표 2. Ka-band 안테나의 레인지 얼라인먼트 결과

Function test	Reflector	Requirement	Deviation		
			X	Y	Z
Initial	Translation (mm)	Tx,Ty,Tz < ± 1	0.0	0.0	0.0
	Rotation (deg)	Rx, Ry, Rz < ± 0.05	0.01	0.00	0.01
Final	Translation (mm)	Tx, Ty, Tz < ± 1	0.0	0.0	0.0
	Rotation (deg)	Rx, Ry, Rz < ± 0.05	0.01	0.01	0.01

나 회전 구동부 조정장치의 불안정성으로 인하여 환경시험 전에 얼라인먼트를 최대 $\pm 0.056^\circ$ 까지만 조정할 수 있었다. 그러나 이것을 환경시험 후에 얼라인먼트 작업을 수행하여 측정한 결과, X, Y, Z 세 방향 모두 $\pm 0.05^\circ$ 이내로 조정할 수 있었다. 이것은 안테나의 열진공 및 진동 시험으로 인한 구조체에 미세 변형에 의한 것으로 판단된다.

4.4.2 Ka-band 안테나의 레인지 얼라인먼트 결과

표 2.에서 나타난 바와 같이 환경시험 전에 병진편차는 요구조건에 만족시켰고 회전편차의 경우 X와 Z 방향은 0.01° 까지 조정하였다. 환경시험 후에도 병진편차는 요구조건에 만족하도록 조정하였다. 회전편차의 경우 X, Y, Z 세 방향 모두 0.01° 까지 조정을 수행하였다. 이는 Ka-band 안테나가 Ku-band 안테나에 비하여 구조적으로 더 안정된 형상을 가지고 있기 때문으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구를 통하여 통신위성에 탑재되는 탑재체인 Ku-band 및 Ka-band 안테나의 레인지 얼라인먼트를 데오드라이트 측정 시스템을 이용하여 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) Ku-band 및 Ka-band 안테나의 레인지 얼라인먼트 측정 방법과 절차를 수립할 수 있었다.
- 2) 레인지 얼라인먼트의 요구조건인 병진 편차 ± 1 mm와 회전 편차 $\pm 0.05^\circ$ 이내로 탑재 안테나를 조정할 수 있었다.
- 3) 측정값에 대한 좌표 변환의 최적화 방법을 개선하여 해석시간의 단축 및 보다 정확한 정확도를 얻을 수 있었다.

향후 본 데오드라이트 측정 시스템을 이용한 측

정 방법과 절차의 개선을 통하여 항공·우주 분야의 활용은 물론이고, 산업응용 분야에서의 3차원 정밀 측정으로의 적용 범위도 넓히고자 한다.

참 고 문 헌

1. 이주진, 윤용식, 최종연, "3차원 좌표 측정을 위한 광학측정 기기 및 활용," 기계저널, 제 40권, 제5호, 2000. pp.65-68.
2. Y.S. Yoon, H. C. Park, Y.S. Son, J.Y. Choi, "A Study of Spacecraft Alignment Measurement with Thodolite", 2003, Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 31, No. 10, pp. 105 ~ 111.
3. J.Y. Choi, Y.S. Yoon, J.J. Lee, "Methods and Result of Satellite Alignment Measurement", 1998, Proceedings of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Fall Annual Meeting, pp. 515-518.
4. Scott C. Sandwith, 1993, "Gageless Tool Building with Computer-Aided Theodolites", Leica Practice Report.
5. K. H. Munch, H. Baertlein, "Dimensional Measuring Techniques in the Automotive and Aircraft Industry", Leica Practice Report, 1993.
6. H. C. Park, Y. S. Yoon, S. W. Choi, 2003, "A Study on Measurement Error Factors of Theodolite System", Proceedings of the KSPE Spring Conference.
7. Y. S. Yoon, J. Y. Lee, C. L. Cho, S. S. Lee 2001, "3-Dimensional Precision Measurement of Spacecraft Structure Test Model", Proceedings of the KSPE Spring Conference.