

Ka대역 위성통신용 타원형 이중오프셋 그레고리안 안테나 설계

The Design of Elliptical Dual Offset Gregorian Antenna for Satellite Communication on Ka-band

김 춘 원* 정 치 현* 김 건 우* 이 성 재**
 Chun-Won Kim Chi-Hyun Cheong Kun-Woo Kim Seong-Jae Lee

ABSTRACT

In this paper, we have designed the elliptical dual offset gregorian antenna which can use Ka band earth station antennas in the fixed-satellite service. The structure of antenna is increasing the antenna gain by decreasing blockage areas and decreasing wind effects by shortening height of the antenna. The corrugate horn antenna for this antenna has symmetric radiation patterns and low side lobe levels that can meet ITU-R envelope. The distribution of electric field on a aperture of main reflector is calculated by an ray-tracing method that use the radiation pattern of the feed horn. The final geometric of antenna is decided by choosing the distribution that comply with antenna requirement. The FEKO analysed electrical performance of this antenna. The fabricated antenna has 45.0dBi(@30.0GHz)/41.7dBi(@20.2GHz), high efficiency and low side lobe level that meet ITU-R S. 580-6 envelope.

Keywords : Satellite Antenna(위성안테나), Reflector Antenna(반사판 안테나), Ka-band(Ka대역)

1. 서 론

반사판 안테나는 전파천문학, 위성통신, 초고주파통신 등이 발전하면서 안테나의 이득을 높이기 위한 목적으로 다양하게 발전하였다. 초창기 반사판 안테나는 파라볼라, 카세그레인, 그레고리안 안테나와 같이 반

사판 시스템의 중심에 급전흔이 놓이게 되는 형상으로 급전흔, 부반사판의 차폐에 의한 효율·이득 감소와 반사판에서 회귀되어오는 전파에 의한 전파손실 및 정제파 특성 열화를 막지 못하였다. 위와 같이 급전흔이 반사판 중심에 위치하여 발생하는 안테나 특성 열화를 개선하기 위해 안테나 이득 및 사이드로브 특성, 교차편파 특성 등이 우수한 오프셋 안테나가 최근 들어 위성통신 안테나로 널리 사용되고 있다^[1].

그러나 일반적인 오프셋 안테나의 경우 비대칭적인 무게 중심 특성으로 인해 자동 접이식 안테나의 경우 고각 방향에 대한 모터 토크의 부담이 크다. 이는 풍

† 2013년 7월 16일 접수~2013년 11월 15일 게재승인

* 삼성탈레스

** 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 김춘원(chunwon.kim@samsung.com)

압에 의한 토크를 증가 시켜 안테나, 지지구조물, 모터 등 주요 구성품의 무게 증가와 소모 전력 증대를 야기한다. 따라서 본 논문에서는 풍압 및 운용성에 유리하도록 타원형의 주반사판 형상을 채택하여 안테나 구동 토크를 최소화하고 기계적 안정성을 높이고자 한다. 또한 이중 옅셋 그레고리안 구조를 기본으로 안테나는 크기, 높이, 길이를 최소화하여 부피를 줄이고, 고효율 및 국제전기통신연합(International Telecommunication Union ; 이하 ITU)의 규정을 만족하는 Ka대역 위성 지구국 고정형 안테나로 운용할 수 있도록 설계하고자 한다.

2. 본 론

고정 위성 지구국 고정형 안테나의 가장 중요한 전기적 사양은 이득, 빔폭, 사이드로브레벨, 교차편파레벨, 축비 등이다. 본 논문에서는 위성과의 통신을 위한 지구국 고정형 안테나의 목표 성능은 송신이득 44.4dBi, 수신이득 41dBi로 하였고, 사이드로브레벨은 ITU에서 고정 위성 업무에 대해 권고하는 ITU-R S. 580-6을 만족하도록 설계하였다.

타원형 이중 옅셋 그레고리안 안테나는 목표 이득에 맞춰 크기를 선정 후 토크를 최소화하고 전파 경로에 구조물에 의한 차폐를 없앤 기본 형상을 설계하였다. 안테나 기본 구조 설계 후에는 반사판 안테나의 전체 성능을 결정하는 급전흔을 설계하였다. 설계된 급전흔을 이용하여 타원형 이중 옅셋 그레고리안 안테나 개구면에서의 개구분포와 방사패턴을 계산하여 반사면 최적 구조를 형상 설계하였다. 안테나 형상 및 반사면이 설계된 후에는 급전흔, 주반사판, 부반사판을 모두 결합하여 EM시뮬레이터인 FEKO의 MLFMM(Multilevel Fast Multipole Method)기법을 사용하여 전기적 성능을 계산하고 요구조건 만족 여부를 확인하였다.

가. 안테나 기본 형상 설계

일반적인 타원형 이중 옅셋 그레고리안 안테나의 형상을 결정짓기 위한 형상은 Fig. 1과 같다. 일반적인 그레고리안 안테나 구조에서 급전흔, 부반사판, 지지구조물 등에 의한 차폐를 방지하기 위하여 부반사판과 급전흔을 α 와 β 만큼 회전 시킨 구조이다.

주반사판의 유효 개구면 면적은 안테나 효율 50%에서 송신이득 44.4dBi, 수신이득 41dBi를 만족하도록

식 (1)을 사용하여 반경 0.75m로 선정하였다^[3]. 타원형 이중 옅셋 그레고리안 안테나의 주반사판 가로($D_{m,w}$)와 세로($D_{m,h}$)의 길이는 식 (2)에 의해 안테나 정면으로 부는 풍압에 의한 토크가 최소화 되도록 선정하였다^[4].

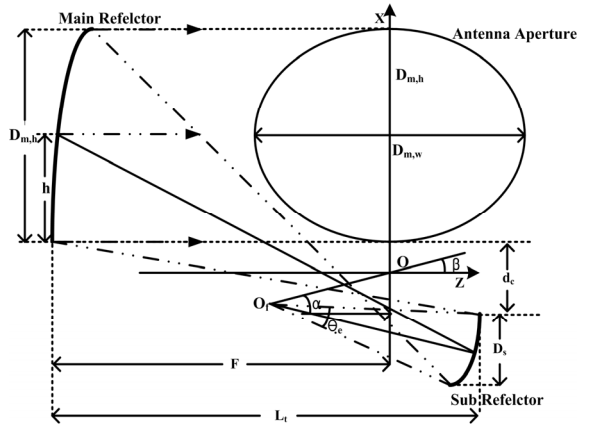


Fig. 1. The Elliptical Dual offset Gregorian Antenna Geometry

$$G = \epsilon_{ap} \frac{4\pi}{\lambda^2} A = \epsilon_{ap} \frac{4\pi}{\lambda^2} (\pi D_m^2) \quad (1)$$

(ϵ_{ap} : 안테나 효율, D_m : 유효개구면 반경)

$$T = \frac{1}{2} \rho C_d A (V \cos\theta + \omega x)^2 x \quad (2)$$

(T : 풍압에 의한 토크, ρ : 공기밀도(1.4kg/m³), C_d : 풍압계수(= 2.3), A : 안테나 단면적, V : 풍속(18m/s), x : 구동 중심축 안테나 중심 간 거리, ω : 안테나 구동 속도(10°/s), θ : 풍향과 안테나 간 교각(0°))

Fig. 2는 풍속 18m/s에서 주반사판 세로 높이에 따른 토크량을 나타낸다. 이때, 주반사판의 단면적은 식 (1)에서 구한 반경을 이용하였으며, 구동 속도는 초당 10° 이상, 길이 x 는 주반사판의 세로길이($D_{m,h}$)에 주반사판 하단에서 부반사판 하단까지의 거리 0.1m를 추가하여 계산하였다. 계산 결과, 안테나 높이가 증가함에 따라 토크량이 상승함을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 주반사판의 높이를 최소화하도록 하였다. 그러나, 주반사판 높이가 낮아질수록 너비는 넓어져 안테나 보관성의 문제가 생긴다. 따라서 주반사판의 너비는 분할/보관성을 고려하여 가로길이($D_{m,w}$)는 0.877m,

세로길이(Dm,h)는 0.64m로 선정하였다. 이때 주반사판 중심에 걸리는 토크량은 173.0Nm로 원형 안테나 199.1Nm 대비 13.1%가 감소된다.

Fig. 3은 풍속에 따른 안테나 고각 방향에 대한 토크량을 계산한 결과이다. 안테나 토크량은 속도의 제곱배로 증가하기 때문에 본 논문에서 제시한 타원형 이중 웁셋 그레고리안 안테나 형상이 원형구조를 갖는 일반적인 안테나 보다 높은 풍속에서 훨씬 유리한 구조임을 알 수 있다.

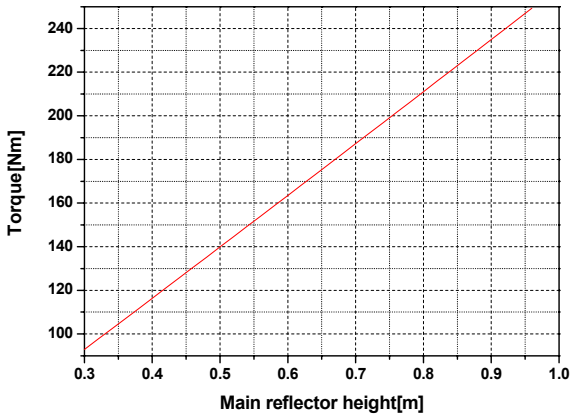


Fig. 2. The torque against the main reflector height (wind velocity 18m/s)

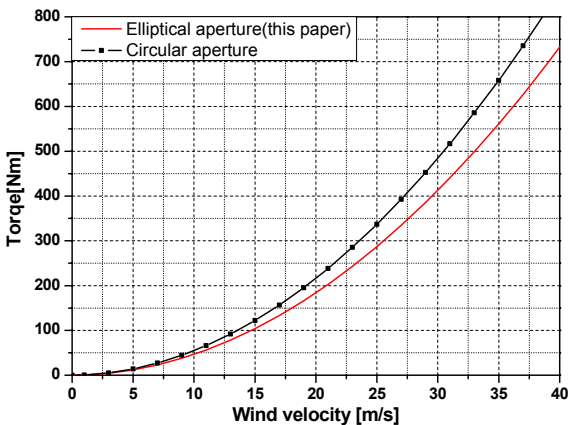


Fig. 3. The torque against wind velocity

주반사판의 크기가 정해지고나면 안테나의 타원형 이중웁셋 그레고리안 안테나의 기구적 형상을 설계해야 한다. 본 논문에서는 안테나의 길이는 약 0.6m 이하가 되도록 주반사판의 초점과 주반사판 직경의

비(FD ratio)를 0.7로 하였다. 부반사판의 크기는 약 0.2m가 되도록 하고, 여기에 조사되는 급전혼의 반치각은 2.2절의 급전혼 설계 결과를 참고하여 26.5°가 되도록 설계 기준을 정하였다. 나머지 전체 형상을 결정짓기 위한 나머지 변수는 참고문헌^[2]의 option 11의 수식을 참고하여 값을 바꾸며 차폐면적이 생기지 않도록 회전각을 정하였고 이 때 α 는 20.07°, β 는 30°가 되도록 기본 형상을 설계하였다.

나. 급전혼 설계

타원형 이중 웁셋 그레고리안 안테나의 급전혼은 높은 이득과 낮은 부엽 레벨과 교차편파 특성을 갖는 코러게이트 혼(corrugated horn)을 참고문헌^[5,6]의 설계 방법과 CST사의 MICROWAVE STUDIO™를 사용하여 설계하였다.

Fig. 4, 5, 6은 설계된 코러게이트 급전혼의 모델링 형상과 시뮬레이션 방사패턴, 위상 패턴을 나타낸다. 방사패턴은 -40dBc 이하의 낮은 부엽준위와 90° 이내의 지향각에서 수직방향과 수평방향 간 90%이상의 패턴 일치도를 보인다. 또한 설계된 급전혼은 빔 ±36° 이상에서는 -10dBi 이하의 이득을 갖도록 설계되어, 반사판 안테나와 결합시 스펬오버(spill over)에 의한 성능 열화를 막을 수 있다. 즉, 반사판 안테나 형상 설계 시 급전혼 안테나의 이득이 -10dBi 이상 되는 모든 전파는 부반사판으로 조사되고 스펬오버 전파는 ITU 요구조건을 만족하도록 하는 것이다.

급전혼의 위상중심은 개구면 기준 6.2mm 들어간 지점이며 위상패턴의 경우 송수신대역에서 ±35°까지 비교적 균일한 위상분포를 가지므로 타원형 이중웁셋 그레고리안 안테나의 개구면 효율을 증대시킬 수 있다.

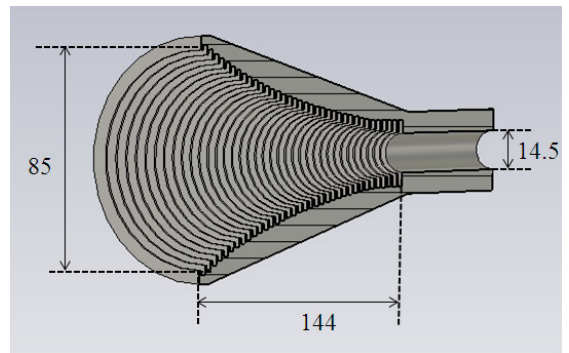
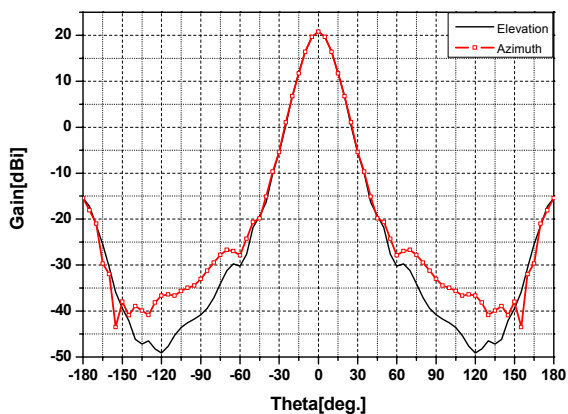
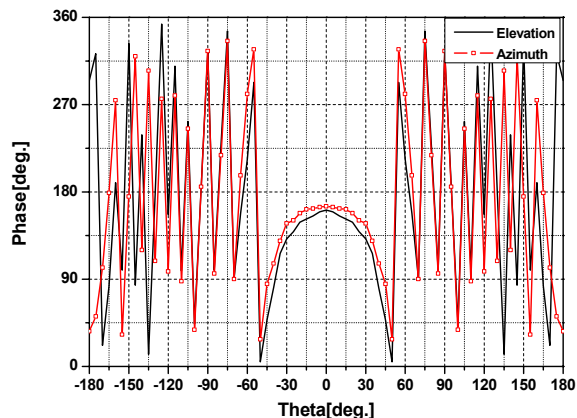


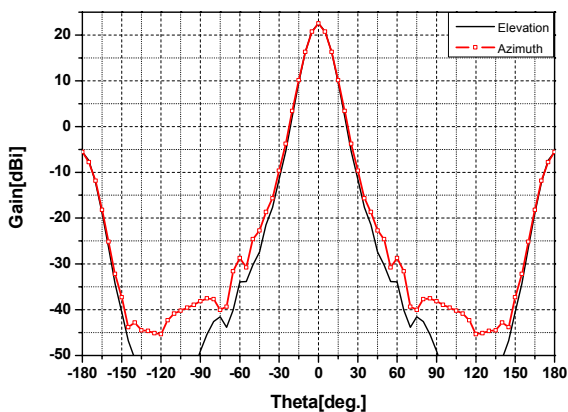
Fig. 4. The corrugated horn geometry



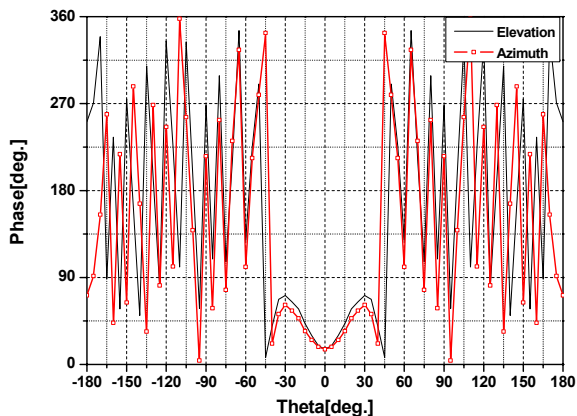
(a) Rx(@20.2GHz)



(a) Rx(@20.2GHz)



(b) Tx(@30.0GHz)



(b) Tx(@30.0GHz)

Fig. 5. The simulated radiation pattern of the corrugated horn

Fig. 6. The simulated phase pattern of the corrugated horn

다. 개구면 전계 분포와 예상 방사패턴 해석

타원형 이중웁셋 그레고리안 안테나 기본형상과 급전혼의 방사패턴이 주어지면 ray-tracing 기법에 의해 안테나 개구면의 전계분포를 예측하여 안테나 방사패턴을 예측 할 수 있다. ray-tracing 기법은 전파의 입사면의 수직 벡터 기준 입사각과 반사각은 같다는 snell의 법칙을 이용하여 전파가 급전혼-부반사판-주반사판-대기 중으로 전달되어 질 때 개구면에서의 예상 전계 분포를 아래와 같은 방법으로 구하는 기법이다.

- ① 임의의 방위각 ϕ_1 의 단면에서, 급전혼의 위상중심 점 O_f 에서 θ_1 의 각도로 부반사판으로 향하는 벡터 \mathbf{v}_{fs} 와 부반사판과의 교점 p_s 계산

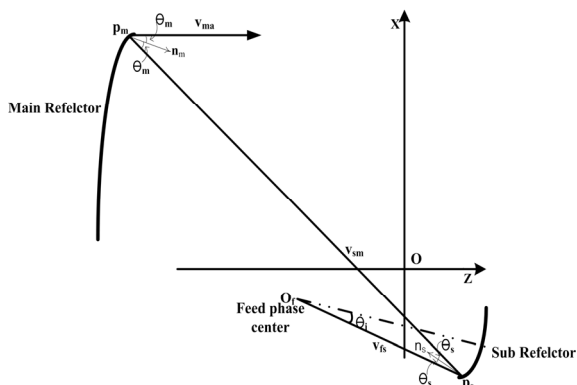


Fig. 7. The ray-tracing Method for calculating path of e-field propagation

- ② 부분사판의 교점 p_s 에서의 수직벡터 \mathbf{n}_s 와 반사각 θ_s 를 구해 주반사판으로 향하는 벡터 \mathbf{v}_{sm} 와 이동거리 및 위상변화 계산
- ③ 벡터 \mathbf{v}_{sm} 과 주반사판의 교점 p_m 에서의 수직벡터 \mathbf{n}_m 와 반사각 θ_m 를 구해 공기 중으로 향하는 벡터 \mathbf{v}_{ma} 와 초점 \mathbf{O} 까지의 이동 거리 및 위상 변화 계산
- ④ 위상중심점 O_f 에서 전파 입사각의 범위를 θ_i 는 $0^\circ \sim \pm\theta_o$, ϕ_i 는 $0 \sim 180^\circ$ 까지 1-3의 과정을 반복
- ⑤ 급전혼 각도(θ_i, ϕ_i)별 전계 세기 및 위상 값과 전파 진행에 따른 신호 감쇄율과 위상변화율을 계산하여 초점 \mathbf{O} 에서의 개구면 전계분포를 계산
- ⑥ 계산된 개구면 전계분포에 전파 진행에 따른 신호 감쇄와 위상변화가 반영된 급전혼의 스피오버값을 더하여 최종 개구면 전계분포 예측

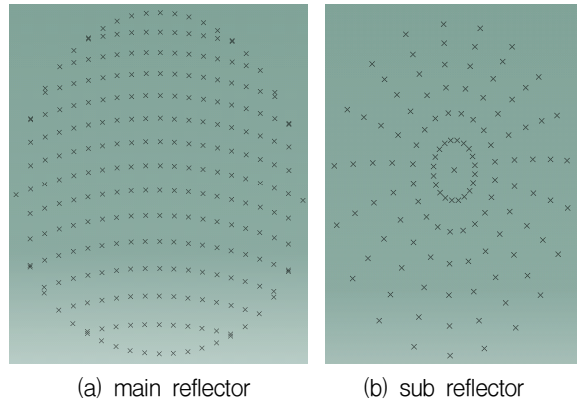


Fig. 8. The coordinate of Elliptical Dual offset Gregorian Antenna

ray-tracing 기법에 의해 전계분포가 구해지면 반사판 안테나의 효율, 이득, 빔폭, 사이드로브특성 등 주요 특성을 예측할 수 있다. 일반적으로 개구면 전계분포 $\{E_r(\rho', \phi')\}$ 로부터 식 (5)의 피 적분 함수로 대체하여 전체 안테나의 방사 패턴을 구할 수 있다^[3]. 이때, 개구면 가장자리의 전계레벨이 낮은 경우 낮은 부엽 특성을 가지나 이득은 감소하고 빔폭은 넓어지는 특성을 갖는다. 반면에 개구면 가장자리의 전계 레벨이 높은 경우 이득은 증가하나 부엽 또한 증가하는 특성을 갖기 때문에 인접위성과의 상호간섭억제가 중요한 위성 안테나에서는 낮은 부엽과 높은 이득을 갖도록 최적의 개구 분포를 선정하여야 한다.

$$F(\theta, \phi) = \iint_s E_a^r(\rho', \phi') e^{jk\rho' \sin\theta \cos(\phi - \phi')} \rho' d\rho' d\phi' \quad (5)$$

본 논문에서는 ray-tracing 기법을 사용하여 초점 \mathbf{O} 에서의 개구면 분포를 구하고 식 (5)를 사용하여 예상 방사패턴을 확인하는 방식의 과정을 주반사판의 포물면 곡선과 부분사판의 타원 곡선의 좌표를 수정하고 다시 위 과정을 반복하여 Fig. 8과 같이 주/부 반사판의 좌표와 Fig. 9의 전계분포를 얻었다. 시뮬레이션 전계분포는 개구면 중심에서 모서리까지는 일정한 전계 세기를 유지하다 모서리부에서 테이퍼를 감소시킴으로써 개구면 효율은 증대시키고 Edge taper 손실은 감소 시킴으로써 이득은 최대로 높이고, 부엽은 최소로 낮추도록 하였다.

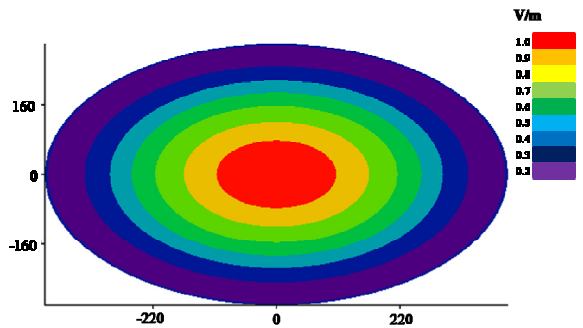


Fig. 9. The normalized E-field distribution on aperture of main reflector

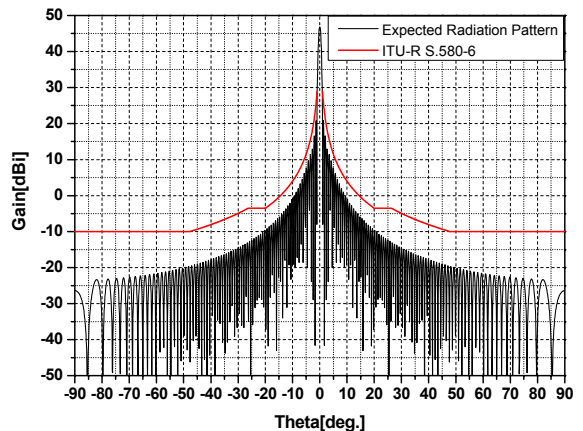


Fig. 10. The expected radiation pattern of normalized E-field distribution

안테나 개구면 전계 분포에 의한 방사패턴 예측은 식 (5)의 적분함수를 이용하여 Fig. 10과 같이 방사패턴을 계산하였다. 이때 이득은 Ka대역 50% 효율을 기준으로 송신이득을 44.4dBi로 놓고 plot하였고, 사이드 로브레벨은 정지위성 지구국의 안테나 요구 규격인 ITU-R S. 580-6 envelope의 90% 이상을 만족하도록 개구면 분포를 선정하였다⁷⁾. 여기서 D는 반사판 안테나의 유효면적 직경으로 본 논문에서는 개구면 유효면적인 750mm를 적용하였다.

라. 안테나 전기적 성능 계산

안테나 기본 형상을 앞서 기술한 ray-tracing 기법을 이용하여 안테나 주/반사판의 곡면좌표를 획득한 후 Fig. 11과 같이 모델링하여 EM시뮬레이터인 FEKO의 MLFMM기법을 이용하여 해석하였다.

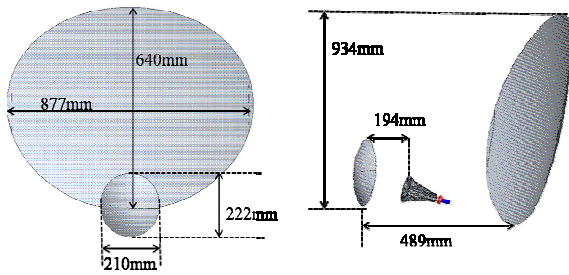


Fig. 11. The simulated antenna geometric

Table 1. The simulated characteristics of Elliptical Dual offset Gregorian Antenna

주파수 [GHz]		20.2	30
이득 [dBi]		43.2	46
효율 [%]		83.7	72.3
HPBW [deg]	수직	1.6	1.2
	수평	1.1	0.8
ITU-R 부엽 만족도	수직	97.7%	98.6%
	수평	100%	100%
정재파비		1.17:1	1.08:1

Table 1은 FEKO를 사용하여 해석된 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 시뮬레이션결과 설계된 안테나는 Fig. 13, 14의 시뮬레이션 결과와 같이 송신 이득 46.0dBi

(@30.0GHz), 수신 이득 43.1dBi(@20.2GHz)로 70% 이상의 높은 효율을 가지며 낮은 정재파 특성과 ITU-R S. 580-6의 envelope 요구 규격을 송신 98.6%, 수신 97.7%를 만족하여 ITU-R 규격을 준수한다. 수신대역의 3dB 빔폭은 수평방향 1.1°, 수직방향 1.6°이며 송신대역은 수평방향 0.8°, 수직방향 1.2°로 수직 방향이 수평 방향보다 1.5배 정도 넓어 진동, 풍압 등 외부 환경 조건에 의해 안테나 pointing error가 발생하더라도 상대적으로 변화폭이 작아 안테나 진동에 유리할 것으로 사료된다.

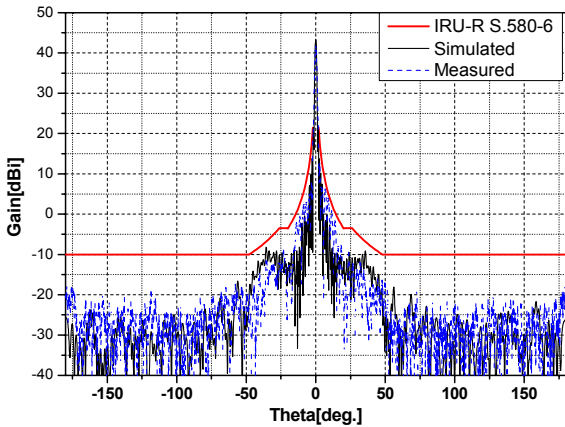
마. 안테나 제작 결과

설계가 완료된 안테나의 정확성 검증을 위하여 Fig. 12와 같이 제작하여, Compact Range 챔버에서 측정하였다. 제작된 안테나는 주반사판의 회전 중심축에 부반사판과 급전혼을 고정할 수 있는 지지대가 연결된 구조로 제작되었다. 또한 안테나의 제작 공차에 의한 손실을 보상하기 위하여 부반사판과 급전혼이 이동 가능한 구조로 적용되었다.

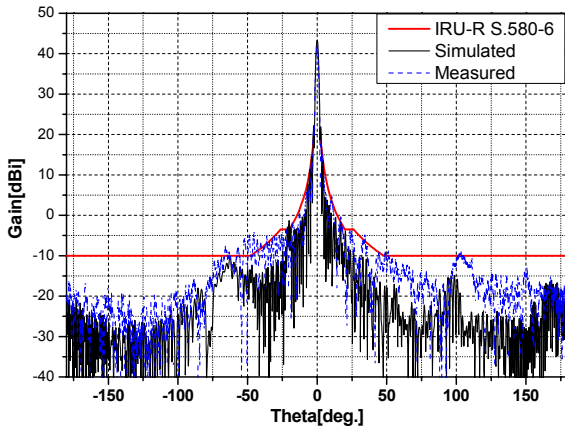


Fig. 12. The fabricated antenna geometric

Fig. 13은 제작된 안테나를 Compact Range 챔버에서 측정한 수신대역(@20.2GHz)의 방사패턴 결과이다. 측정결과는 반사판, 급전혼 등 구성품 제작공차, 안테나 윗셋 축 틀어짐 등의 원인으로 인한 시뮬레이션 결과 대비 1.2dB의 이득 차이와 고각 100° 부근의 약 5dB의 부엽 상승을 제외하곤 전체적인 방사패턴은 시뮬레이션 결과와 유사하다. ITU-R S. 580-6 envelope기준으로는 고각 94.4%, 방위각 100%를 만족하여 ITU-R 요구 규격을 준수함을 알 수 있다.



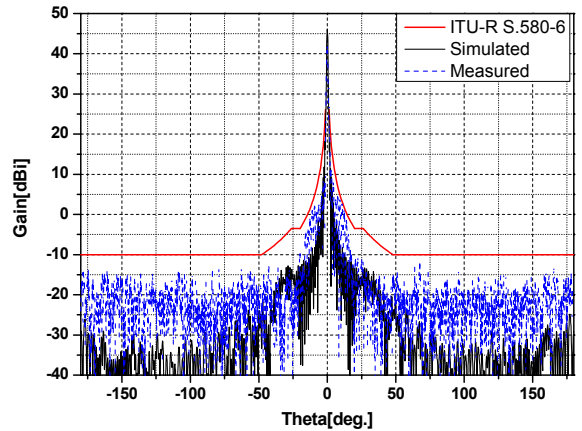
(a) Azimuth



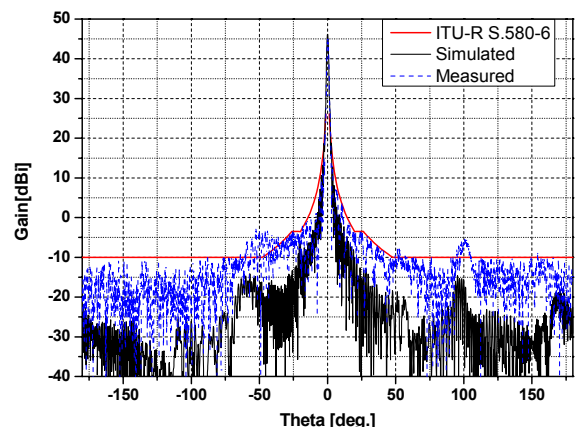
(b) Elevation

Fig. 13. The simulated and measured Rx(@20.2GHz) radiation patterns of the antenna

Fig. 14는 송신대역(@30.0GHz)의 방사패턴 측정 결과이다. 측정결과는 시뮬레이션 결과와 비교하여 구성품 제작공차에 의한 손실, 초점오류, 안테나 offset축 틀어짐 등에 의하여 1.0dB의 이득 차이를 보이며 $\pm 30^\circ$ 범위 이내의 방사패턴은 시뮬레이션 결과와 유사하나 나머지 부분에서 전체적으로 부엽이 상승하며 특히 고각 100° 부근에서 10dB이상 크게 상승하는 결과를 보인다. ITU-R S. 580-6 envelope를 기준으로 고각 92.2%, 방위각 98.25%를 만족하여 요구 규격을 준수한다. 이러한 오차는 반사면에 대한 표면 오차 보정과 안테나 축에 대한 보정, 보다 정밀한 급전흔 가공공차 관리 등의 정밀 가공법을 통해 오차 성능을 보완 할 수 있을 것으로 사료된다.



(a) Azimuth



(b) Elevation

Fig. 14. The simulated and measured Tx(@30.0GHz) radiation patterns of the antenna

3. 결론

본 논문에서는 Ka대역 위성의 지구국 고정형 안테나로 사용 가능한 타원형 이중 웁셋 그레고리안 안테나의 기본 형상을 설계하고 전기적 성능을 해석하였다. 먼저, 풍압 및 운용성에 유리하도록 타원형의 주 반사판 형상을 채택하여 전체적인 안테나의 높이를 낮춰 기계적 안정성을 높인 기본구조로 선정하였다. 안테나 요구이득을 만족하도록 주반사판의 크기 및 기본형상을 결정짓는 기본 파라미터를 계산하여 안테나 기본구조를 선정 후 원형대칭의 저부엽을 가지며 ITU-R S. 580-6을 만족할 수 있는 급전흔을 설계하였다

다. 설계된 급전혼의 패턴으로부터 부반사판-주반사판-대기중으로 이어지는 전파의 전달 경로 분석을 통하여 안테나 개구면 전계분포를 예측하였다. 예측된 전계분포로부터 방사패턴을 계산하였고 안테나 이득, 부엽 등 안테나 주요 성능을 만족하도록 반사판 좌표를 수정하여 주/부반사판을 형상 설계하였다. 반사면 수정을 통해 설계된 안테나 최종형상은 FEKO의 MLFMM 해석 기법을 이용하여 방사패턴을 해석하고 이득, 빔폭, 부엽 등 주요 특성 확인 후 안테나를 제작 측정하였다. 측정 결과 타원형 이중 오프셋 그레고리안 안테나는 송신 이득 45.0dBi(@30.0GHz), 수신 이득 41.7dBi(@20.7GHz)으로 약 58%의 높은 효율 가진다. 안테나 방사패턴은 ITU-R S. 580-6 요구 envelope 대비 송수신 방위각 98.25%, 100%고각 92.2%, 94.4%로 요구 규격을 만족하였다. 하지만 시뮬레이션 대비 약 1.0dB 이상의 이득 오차와 송신 부엽이 10dB 이상 상승하였다. 이는 주/부반사판 곡면, 급전혼 제작 오차에 의한 손실, 초점 오류와 이에 의한 안테나 오프셋축 틀어짐 등 제작 공차에 의한 원인으로 예측되어지며, Ka대역에서 시뮬레이션 결과와 같은 성능을 구현하기 위해선 제작 공차를 더욱 정밀하게 가공하여야 한다.

이상으로 Ka대역 위성통신용 지구국 고정형 안테나로 사용 가능한 이중 오프셋 그레고리안 안테나를 설계, 제작 측정하였다. 설계된 안테나는 위성 안테나로 사용 가능한 높은 이득과 ITU-R 규격을 만족하는 낮은 부엽 특성을 가진다. 또한 급전혼 뒷 단에 우수한 성능의 축비를 갖는 편파기와 송수신 격리도가 높은 직교모드변환기를 장착할 경우 송신, 수신대역에서 좌현 또는 우현편파를 각각 다르게 선택하여 위성안테나로 사용 될 수 있을 것으로 사료된다.

References

- [1] 이동진, 최학근, 윤소현, 한재홍, 박재홍, 이성팔, “국내위성을 위한 경면수정 오프셋 그레고리안 안테나의 설계”, 한국전자과학회논문지, 12(5), pp, 765~ 776, 2001년 8월.
- [2] Tom Milligan, “Designing Classical Offset Cassegrain or Gregorian Dual-Reflector Antenna from Combinations of Prescribed Geometric Parameters”, IEEE Trans. Antennas and Propagation, Vol. 44, No. 3, June, 2002.
- [3] C. A. Balans, Antenna Theory Analysis and Design, 2nd Edition, John Wiley & Sons 1997.
- [4] 천일용, “합상용 레이더 안테나의 진동/피로 특성에 대한 연구”, 석사학위 논문, 충남대학교, pp. 5 ~6, 2005.
- [5] 전경진, “X-밴드 데이터 전송용 위성 안테나의 설계 및 해석”, 석사학위 논문, 한국항공대학교, 2011.
- [6] 서수덕, “커리게이트 혼 안테나로 급전된 Ku대역 캐서그레인 안테나 최적설계”, 석사학위 논문, 청주대학교, 1997.
- [7] ITU-R Recommendation S.580-6, “Radiation Diagrams for Use as Design Objectives for Antennas of Earth Stations Operating with Geostationary Satellites”, 2003.
- [8] VICTOR GALINDO-SRAE, WILLIAM A. IMBRIALE and RAJ MITTRA, “On the Theory of the Synthesis of Single and Dual Offset Shaped Reflector Antenna”, IEEE Trans. Antennas and Propagation, Vol. AP-35, No. 8, August, 1987.