

Ray-tracing 기법을 이용한 축변위 그레고리안 안테나 설계

김춘원*

The Axial-displaced gregorian antenna design
using Ray-tracing Method

Chun-Won Kim*

SAMSUNG THALES Co.

ABSTRACT

In this paper, we designed axis-displaced Gregorian antenna by using Ray-tracing method. This antenna improves gain, VSWR by rotating the axis of the sub-reflector to get rid of E-field wave returned from sub-reflector to feed horn. Therefore it reduce the sub-reflector size and the volume of antenna. This method is used to track the propagation path for radiation pattern of feed horn from feed horn to sub-reflector, main-reflector and air. We get E-field distribution of this antenna aperture and calculate antenna radiation pattern and optimize the antenna performance. The Ray-tracing Method was verified because the gain, radiation patterns, side lobe level, beam width and return loss of the designed antenna are very similar to CST simulation result and a measured result of the fabricated antenna.

초 록

본 논문에서는 Ray-tracing 기법을 이용하여 그레고리안 안테나의 부반사판을 축변위 후 회전하여 급전혼으로 회귀되는 전파를 없애 이득 및 정재파비를 개선 시키고 부반사판의 크기와 전체적인 부피를 줄여 효율적인 구조를 갖는 축변위그레고리안 안테나를 설계하였다. 설계된 급전혼의 방사패턴을 이용하여 급전혼-부반사판-주반사판으로 전달되는 전파의 경로를 추적하여 주반사판 개구면에서의 전계분포를 구하고 이로부터 원거리 복사패턴을 계산하는 프로그램을 작성하여 안테나 성능을 최적화 하였다. 설계된 안테나는 CST와 제작·측정을 통해 계산결과와 비교하여 이득, 빔폭, 방사패턴, 부엽준위, 반사손실이 계산 결과와 매우 유사함을 확인함으로써 Ray-tracing기법에 대한 타당성을 검증하였다.

Key Words : Axis-displaced Gregorian Antenna(축변위 그레고리안 안테나), Ray-tracing method(전파경로추적기법)

1. 서 론

오늘날 반사경 안테나는 전파천문학, 위성통신, 초고주파통신, 데이터링크 등이 발전하면서

안테나의 이득을 높이기 위한 목적으로 다양하게 발전하였다. 초창기 반사판 안테나는 파라볼라, 카세그레인, 그레고리안 안테나와 같이 반사판 시스템의 중심에 급전혼이 놓이게 되는 형상으로

† Received: April 5, 2014 Accepted: May 27, 2014

* Corresponding author, E-mail : chunwon.kim@samsung.com

http://journal.ksas.or.kr/

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

급전혼, 부반사판의 차폐에 의한 효율·이득 감소와 반사판으로 회귀되어오는 전파에 의한 전파손실 및 정재파 특성 열화를 막지 못하였다. 위와 같은 구조를 갖는 안테나의 단점을 개선하기 위하여 축변위 그레고리안 안테나가 개발되었다 [1]. 축변위 그레고리안 안테나는 타원형 구조를 갖는 부반사판의 제 1초점을 기준으로 회전시켜 주반사판으로 향하는 전파가 급전혼으로 되돌아오지 않도록 하여 안테나의 효율·이득과 정재파 특성을 크게 개선한 반사판형 안테나이다. 또한 그 구조적 특성으로 인하여 부반사판의 크기를 작게 할 수 있으며 급전혼과 부반사판 간 거리를 감소시켜 부피와 체적을 더욱 감소시킬 수 있는 장점을 가진다. 하지만 이러한 특이한 기하학적 구조로 인하여 SABOR, GRASP 등의 반사판 설계 해석 프로그램으로는 설계 안테나의 직관적 성능 예측이 어렵다. 따라서 안테나를 설계 후 FEKO, HFSS, CST 등의 EM 시뮬레이터를 이용해야 하는데 이는 수 시간 이상의 상당한 시간이 걸리고 해석할 수 있는 크기에 제약이 있어 안테나를 설계하는데 여러 가지 어려움이 있다. 특히, 안테나 초기 설계 시 주/부반사판의 크기 및 곡률, Edge Taper 각도, 급전혼의 크기 및 성능을 변경하며 이에 대한 성능 변화와 영향성을 파악해야 하기 때문에 이를 모두 EM시뮬레이터를 이용한다면 너무 많은 시간을 필요로 한다. 따라서 본 논문에서는 축변위 그레고리안 안테나의 빠른 해석을 위하여 Ray-tracing기법을 이용하여 안테나 기본 성능인 이득, 방사패턴과 빔폭, 부엽준위를 예측하는 프로그램을 작성하고자 한다.

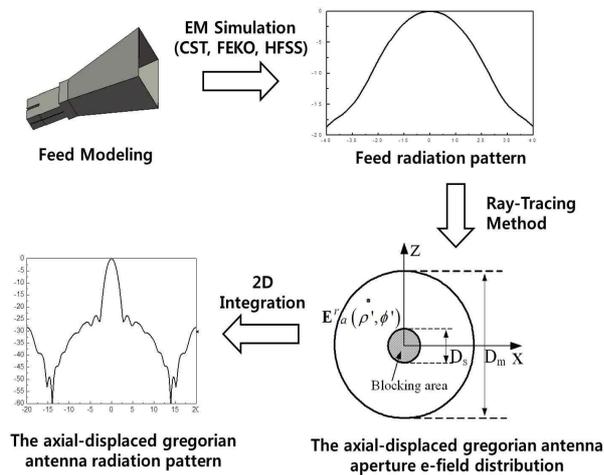


Fig. 1. Calculating performance of the axial-displaced gregorian antenna by using Ray-tracing method

II. 본 론

Ray-tracing 기법에 의한 안테나 성능 예측 프로그램을 Fig. 1과 같은 방법으로 작성하고자 한다. 먼저 EM시뮬레이터를 이용하여 급전혼을 설계 후 방사패턴을 계산한다. 얻어진 급전혼의 패턴을 이용하여 급전혼에서 부반사판, 주반사판으로 전달되어 지는 전파의 이동경로를 Ray-tracing 기법으로 예측하고 이에 따른 신호 감쇄를 계산하면 급전혼의 방사패턴으로부터 주반사판 개구면에서의 전계분포를 구할 수 있다. 개구면 전계분포가 구해지면 이를 피 적분 함수로 대체하여 대형구조를 가지는 축변위 그레고리안 안테나의 방사 패턴을 구할 수 있다. 이때, 축변위그레고리안 안테나의 반사손실은 급전혼으로 되돌아오는 전파를 모두 굴절시키는 축변위그레고리안의 특성 때문에 급전혼의 반사손실 시뮬레이션 결과로부터 간단히 유추 할 수 있다.

2.1 축변위 그레고리안 안테나 형상 설계

축변위 그레고리안 안테나는 Fig. 2와 같이 타원의 제 1초점(F1)를 기준으로 타원을 ϕ 만큼 회전시켜 필요한 면적 만을 부반사판으로 사용하고 파라볼릭 함수 곡률을 갖는 주반사판을 덧붙여 이득은 높이는 구조를 갖는다. 이 때 타원의 제 1초점에는 급전혼의 위상중심, 제 2초점(F2)에는 주반사판의 초점을 위치 시키고 x축을 대칭을 360° 회전한 구조이다. 여기서, D_m 은 주반사판의 크기, D_s 는 부반사판의 크기, F는 주반사판의 초점거리, θ_f 는 급전혼의 Edge Taper, a는 부반사판의 장축 길이, b는 부반사판의 단축길이, f는

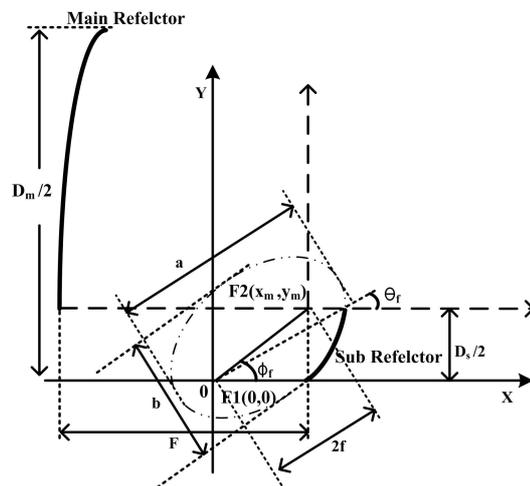


Fig. 2. Geometry of the axial-displaced gregorian antenna

부반사판의 초점 간 거리를 나타낸다. 이러한 구조는 타원의 전파 특성과 주반사판의 전파 반사 특성에 의해 급전혼의 전계가 강한 중심에서 방사된 전파는 부반사판의 중심을 거쳐 주반사판의 모서리로 보내지고 급전혼의 Θ_r 부 방사되는 낮은 세기의 전파는 부반사판의 가장자리를 맞고 주반사판의 안쪽으로 보내지게 된다. 이러한 전파의 굴절특성을 이용하면 급전혼에서 방사된 전파가 부반사판을 맞고 다시 되돌아오는 전파를 없앨 수 있다. 이는 축변위 그레고리안 안테나가 일반적인 이중반사판 안테나보다 높은 효율과 이득을 갖도록 하고 급전혼과 축변위 그레고리안 안테나의 반사손실이 유사한 특성을 가져 축변위 그레고리안 안테나의 반사손실 특성을 쉽게 예측하도록 돕는다.

축변위 그레고리안 안테나의 형상은 주반사판의 크기 D_m 과 초점거리 F , 부반사판의 크기 D_s 와 부반사판의 곡률을 결정짓는 급전혼의 Edge Taper 각 θ_f 에 의하여 결정되어진다. 주반사판의 크기 D_m 은 유효 개구면 면적(A)에 의해 계산되는 이득 계산 식 (1)에 의하여 결정 할 수 있다. 즉, 일반적인 반사판 안테나의 목표 개구면 효율 (ϵ_{ap})을 50~60%로 잡고 이득을 정한다면 목표이득에 맞는 주반사판의 크기를 정할 수 있다[2]. 주반사판의 초점 거리 F 는 전기적 성능에 크게 영향을 주지 않고 안테나 전체의 부피를 결정하므로 안테나 장착 플랫폼에 맞춰 결정 할 수 있다.

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

주반사판의 크기와 초점거리가 결정되고 나면 부반사판의 직경과 급전혼의 초점거리를 정해야 하는데 이는 안테나 형상 설계 시 여러 번 변경해 가며 시행 착오법에 의한 최적의 값을 찾아야 한다. 부반사판의 크기는 작게 할수록 차폐영역에 의한 손실을 줄이고 부엽 상승을 막을 수 있지만 그 크기가 작아지면 급전혼의 빔폭 또한 작아져야하므로 급전혼이 커지게 되고 이는 다시 주반사판의 중심부를 가리게 된다. 급전혼의 방사패턴은 반사판 안테나의 전계 분포를 결정하므로 매우 중요하다. 테이퍼 레벨이 낮을수록 반사판 안테나 전체 부엽이 내려가는 효과를 보인다. 하지만 개구효율이 나빠져 이는 다시 이득을 감소시키는 원인이 되므로 최적값을 찾는 여러 번의 과정을 거쳐야 한다[3]. 따라서 임의의 부반사판의 크기 D_s 와 급전혼의 Edge Taper 각도 θ_f 를 변경해가며 형상 설계를 하여 최적 값을 찾는 과

정이 필요하다. 주요변수간의 관계는 식 (2) ~ (4)와 같다[4].

$$\phi_f = \text{atan} \left(\frac{2}{\frac{\cos(\theta_f) + 1}{\sin(\theta_f)} - 4 \frac{F}{D_m - D_s}} \right) \quad (2)$$

$$a = \frac{D_s}{8} \left[\frac{\cos(\theta_f) + 1}{\sin(\theta_f)} \right] + \frac{F \frac{D_s}{2}}{D_m - D_s} \quad (3)$$

$$b = \sqrt{a^2 - \left(\frac{D_s}{4 \sin(\theta_f)} \right)^2} \quad (4)$$

$$f = \sqrt{a^2 - b^2} \quad (5)$$

주반사판의 좌표는 일반적인 파라볼릭 함수 식 (6)이 x축으로 $(x_m - F)$, y축으로 y_m 만큼 이동한 구조이므로 식 (7)의 함수를 갖는다. 또한, 부반사판은 일반적인 타원의 함수인 식 (8)이 원점을 기준으로 x축으로 초점간 거리 f 의 반값 만큼 이동 후 ϕ_f 만큼 회전한 구조이므로 식 (9)의 함수로 표현 될 수 있다. 여기서 F 는 주반사판의 초점거리이고, a 는 타원의 장축길이, b 는 단축 길이를 나타낸다.

$$x = \frac{y^2}{4F} \quad (6)$$

$$x - (x_m - F) = \frac{(y - y_m)^2}{4F} \quad (7)$$

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (8)$$

$$\frac{[\cos(\phi_f)x + \sin(\phi_f)y - f]^2}{a^2} + \frac{[-\sin(\phi_f)x + \cos(\phi_f)y]^2}{b^2} = 1 \quad (9)$$

식 (1) ~ (9)를 이용한다면 Fig. 2와 같은 축변위 그레고리안 안테나의 전체 단면 형상을 얻을 수 있다. 이렇게 얻어진 단면 형상을 x축을 기준으로 360°회전하게 되면 축변위 그레고리안 전체 형상을 얻을 수 있을 것이다.

2.2 Ray-tracing 기법을 이용한 개구면 전계분포 획득

2.1의 방법에 의해서 축변위 그레고리안 안테

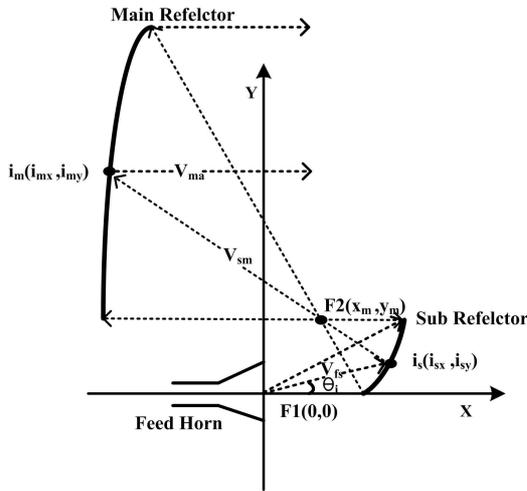


Fig. 3. The Ray-tracing Method for calculating path of e-field propagation

나의 단면 형상이 구해지고 나면 Ray-tracing 기법을 이용하여 안테나의 개구면 전계 분포를 예측 할 수 있다. Ray-tracing 기법은 전파의 경계면에서의 반사 및 굴절 특성을 이용하여 전파의 진행 경로를 추적하는 방법이다. 본 논문에서는 급전혼에서 부반사판과 주반사판으로 전달되어지는 전파의 경로를 추적하여 급전혼의 방사패턴으로부터 주반사판 개구면 전계분포를 얻으려 한다. Fig. 3은 급전혼-부반사판-주반사판으로 이어지는 전파의 이동 경로를 나타낸다. 먼저 급전혼에서 부반사판으로 향하는 방향의 벡터 V_{fs} 는 입사각 θ_i 에 따라 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$y = \tan(\theta_i)x \tag{10}$$

벡터 V_{fs} 는 부반사판의 함수 식 (9)에 y 값을 대입하여 근의 공식에 의해 두 함수간의 교점 $i_s(i_{sx}, i_{sy})$ 을 구 할 수 있다. 부반사판에서 반사되어 주반사판으로 향하는 신호는 타원의 특성과 snell의 법칙에 의해 제 2초점 $F2(x_m, y_m)$ 을 경유하여 주반사판 방향으로 진행하게 된다[5]. 따라서 두점을 지나는 벡터 V_{sm} 는 식 (11)과 같이 나타 낼 수 있다.

$$(y - i_{sy}) = \frac{y_m - i_{sy}}{x_m - i_{sx}}(x - i_{sx}) \tag{11}$$

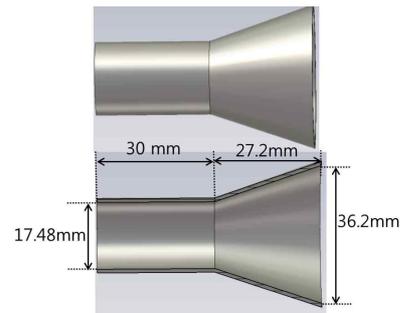
벡터 V_{sm} 은 주반사판의 함수 식 (7)에 대입하면 교점 $i_m(i_{mx}, i_{my})$ 을 구할 수 있게 된다. 마지막으로 주반사판에서 대기중으로 향하는 벡터는 파라볼릭 함수의 특성에 의해 x 축과 평행하게 진행

하게 된다[5]. 따라서 주반사판의 (x_m, i_{my}) 위치에서는 급전혼 θ_i 각에서의 전계값을 갖게 된다. 하지만 이 때 전파의 이동에 의한 신호 감쇄 값을 가감해줘야 한다. 전파신호의 감쇄세기는 파장 대비 이동거리의 제곱에 비례하여 감소한다는 Friis 전송 공식에 의하여 구해질 수 있다[2].

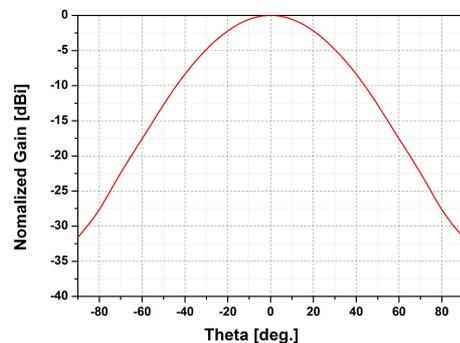
따라서, 급전혼-부반사판-주반사판-개구면으로 이어지는 전파 진행 길이를 전부 더하면 전기적 파장 길이를 구하고 이에 의한 신호 감쇄를 계산하면 최초 급전혼에서 방사된 전파신호를 기준으로 주반사판의 개구면에서 변환된 전계분포를 구할 수 있을 것이다. Ray-tracing방법에 의해 θ_i 의 값을 0도에서 θ_f 까지 변경해 가며 이에 따른 y_m 값을 구한다면 개구면 직경 $x=0$ 에서 $D_m/2$ 까지의 단면 전계분포를 Fig. 6 (a)와 같이 구 할 수 있고 이를 다시 x 축에 대하여 360° 회전하게 되면 Fig. 6 (b)와 같이 개구면 전계 분포를 구할 수 있다.

2.3 Ray-tracing기법에 의한 안테나 성능 예측

Ray-tracing기법을 이용하면 Fig. 1에서 설명한 바와 같이 설계된 급전혼의 방사패턴으로부터 더욱 큰 구조를 가지는 축변위그레고리안 안테나의 성능을 예측 할 수 있게 된다. 먼저 Fig. 4의 구



(a) Geometry



(b) Radiation pattern

Fig. 4. The designed feed horn

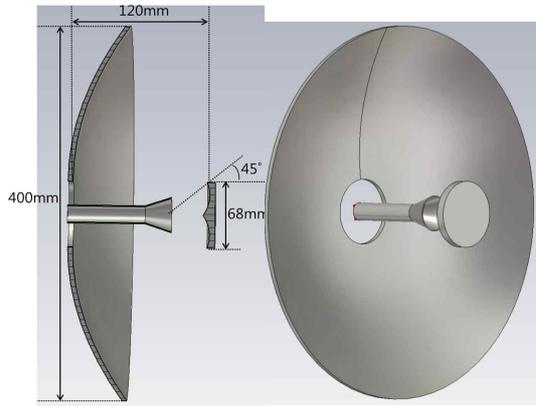


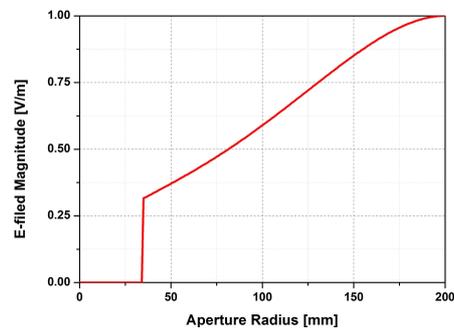
Fig. 5. The Geometry of the axis-displaced Gregorian antenna

조와 복사패턴을 가지는 급전혼을 CST를 사용하여 설계 후 2.2에서 설명한 Ray-tracing기법에 의해 축변위그레고리안 안테나 개구분포를 계산하였다. Fig. 4는 축변위 그레고리안 안테나 설계에 사용된 급전혼의 구조로 45도에서 약 -10dB의 테이퍼 값을 갖는다. Fig. 5는 Fig. 3의 Ray-tracing 기법에 의해 형성된 안테나 단면형상을 x축을 기준으로 360° 회전하여 EM시뮬레이터인 CST MWS로 모델링한 안테나 형상이다.

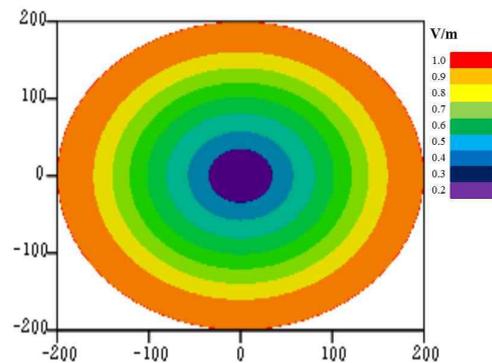
주반사판의 크기는 11.75GHz에서 31dB의 이득을 만족시키기 위해 식 (1)을 이용하여 400mm로 선정하였고 초점거리는 장착공간의 한정성으로 인해 120mm의 길이로 하였다. 그리고 부반사판의 크기와 급전혼 Edge Taper각도와 테이퍼 레벨은 2.2에서 설명한 방법으로 최적화를 거쳐 부반사판의 크기는 68mm로 하고 급전혼의 Edge Taper각도 θ_f 는 45°이며 -10dB의 Taper값을 갖도록 선정하였다. 설계된 모델링 형상은 CST 해석 결과와 비교를 통해 Ray-tracing 기법에 대한 정확성 및 신뢰성 검증에 활용할 것이다.

Figure 6은 Ray-tracing기법에 의해 예측된 축변위그레고리안 안테나 개구면에서 단면축과 개구면 전개분포를 나타낸다. 이는 앞서 설명한 구조에 의해 개구면 가장자리에서는 그 세기가 가장크고 중심에서는 낮은 분포를 갖는다. 특히 중심의 차폐영역에 의한 전파가 진행되지 않는 면적은 매우 작음을 알 수 있다. Ray-tracing기법에 의해 전개분포가 구해지면 반사판 안테나의 효율, 이득, 빔폭, 사이드로브특성 등 주요 특성을 예측할 수 있으며 반사계수 특성은 급전혼의 성능으로부터 유추 가능하다.

개구면 전개 분포 $\{E_a^r(\rho', \phi')\}$ 로부터 식 (12)의 피 적분 함수로 대체하면 전체 안테나의 방사 패턴을 구할 수 있다[2]. 이때, 개구면 가장자리와



(a) YZ plane



(b) Aperture

Fig. 6. The normalized E-field distribution of the axis-displaced Gregorian antenna.

중심의 전계레벨차이가 큰 경우 낮은 부엽 특성을 가지나 이득은 감소하고 빔폭은 넓어지는 특성을 갖는다. 반면에 레벨차이가 작은 경우 이득은 증가하나 부엽이 증가하는 특성을 갖기 때문에 안테나의 용도에 맞게 최적의 개구 분포를 갖도록 선정하여야 한다. Fig. 8은 식 (12)를 이용하여 계산된 정교화 방사패턴으로 -15dBc 이하의 낮은 부엽비를 가지며 3dB 빔폭은 4.2°이며, 예상 이득은 반사판 안테나의 일반적 효율 60%정도로 감안하여 31.6dB이정도로 예측되어 진다.

$$F(\theta, \phi) = \iint_s E_a^r(\rho', \phi') e^{jk\rho' \sin\theta \cos(\phi - \phi')} \rho' d\rho' d\phi' \quad (12)$$

이렇게 초기 설계가 완료된 안테나는 CST를 이용하여 Fig. 5과 같이 모델링 후 더욱 정확한 설계 해석을 하였다. 그 결과 Fig. 8, Table 1의 결과와 같이 Ray-tracing방법에 의해 계산되어진 값과 유사한 방사패턴과 빔폭, 부엽준위를 가지며 반사손실 특성은 앞서 설명한 축변위 그레고리안 안테나의 굴절 특성으로 인하여 측정 반사손실 값은 급전혼 반사손실 값과 유사한 값과 분포도를 갖는다.

2.4 안테나 설계 성능 비교

설계가 완료된 안테나의 정확성 검증을 위하여 Fig. 7과 같이 제작하여, Near Field 챔버에서 측정하였다.

제작된 안테나는 주반사판의 중심축에 급전홀을 결합 할 수 있는 구조로 제작되었고, 부반사판은 주반사판에 모서리에 지지대를 세워 조립할



Fig. 7. The fabricated Geometric of the axis-displaced gregorian antenna

Table 1. The nomalized claculation and simulation and measure result of the axis-displaced gregorian antenna

주요결과	이득 [dBi]	빔폭 [deg]	부엽비 [dBc]
Ray-tracing	31.6	4.2	14.8
simulation	31.8	3.9	15.6
measured	31.1	4.2	15.0

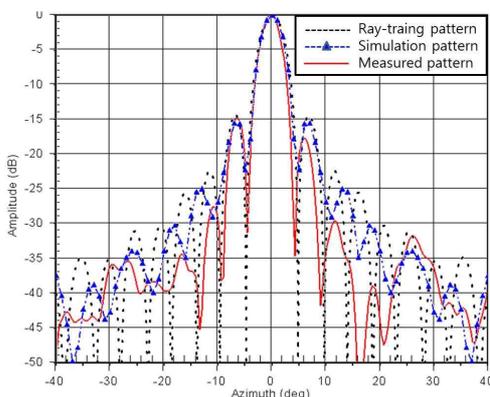


Fig. 8. The nomalized claculation and simulation and measured radiation pattern of the axis-displaced gregorian antenna

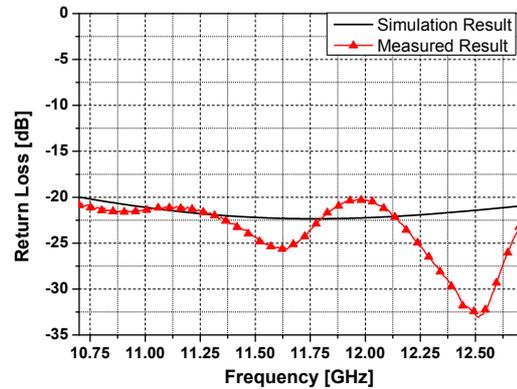


Fig. 9. The simulation and measured return loss of the axis-displaced gregorian antenna

수 있는 타입으로 제작되었다. 또한 안테나의 제작 공차에 의한 손실을 보상하기 위하여 부반사판과 급전홀이 이동 가능한 구조로 적용되었다. Fig. 8은 제작된 안테나를 Near Field 챔버에서 11.75GHz에서 측정한 정교화 방사패턴 결과이다. 측정결과는 반사판, 급전홀 등 구성품 제작공차와 반사면 곡률 오차, 이상적이지 않은 재질, 모서리부분의 라운드 등의 원인으로 인한 계산한 결과와는 약간의 오차를 갖는다. 또한 안테나 축틀어짐 등의 원인으로 인하여 좌우 비대칭의 결과를 보이니 대체로 주요 성능인 빔폭과 부엽준위, 방사패턴은 유사한 값을 가진다. Fig. 9는 축변위 그레고리안 안테나 반사손실 측정결과이다. 이는 2.1장에서 설명한 축변위 그레고리안 안테나의 기하학적 굴절 특성으로 인하여 10.7GHz ~ 12.75GHz까지의 측정값은 급전홀의 시뮬레이션 결과로부터 얻은 반사손실 특성과 축변위 그레고리안 안테나 측정 반사손실 값이 유사한 분포와 값을 가진다.

이상으로 Ray-tracing 기법에 의해 계산한 안테나 해석결과와 시뮬레이션, 측정값을 비교하여 안테나 주요 성능인 이득, 빔폭, 부엽비, 반사계수 특성을 비교하였다. 결과적으로 제작상의 공차의 해석상의 오차로 약간의 값 차이는 발생하나 그 값이 크지 않아 본 논문에서 제시한 Ray-tracing에 의한 안테나 성능 예측이 상당히 타당하며 유용하다는 것을 알 수 있다.

III. 결 론

본 논문에서는 타원형 구조를 갖는 부반사판을 회전시켜 급전홀으로 회귀되는 전파를 없애고

부반사판의 크기와 안테나 전체의 크기를 줄인 축변위 그레고리안 안테나를 Ray-tracing 기법을 이용하여 설계하였다. EM 시뮬레이터를 이용하여 설계된 급전혼의 방사패턴을 이용하여 급전혼에서 부반사판, 주반사판으로 전달되어 지는 전파의 경로를 Ray-tracing 기법으로 예측하고 이에 따른 신호 감쇄를 계산하여 주반사판 개구면에서의 전개분포를 구하였다. 계산된 개구분포는 피적분 함수로 대체하여 전체 안테나의 방사 패턴을 구하였으며 반사손실은 급전혼으로 회귀되어 오는 축변위 그레고리안 안테나의 굴절 특성으로 인하여 급전혼의 반사손실로부터 쉽게 예측할 수 있었다. Ray-tracing 기법에 의해 계산된 안테나의 빔폭, 방사패턴, 부엽비는 EM 시뮬레이터인 CST 해석결과와 안테나 제작·측정을 통하여 얻어진 결과와 비교하여 그 정확성과 타당성을 검증하였다. 그 결과 안테나 방사패턴 해석결과는 계산결과와 주빔에서는 매우 유사한 분포를 가지며 1차 부엽비와 빔폭까지도 상당히 일치함을 알 수 있었다. 또한, 축변위 그레고리안 안테나의 동작대역 측정 반사손실 값은 회귀전파를 없애는 기하학적 굴절 특성으로 급전혼의 반사손실 값과 유사한 값과 분포도를 가져 본 논문에서 제시한 Ray-tracing에 의한 안테나 성능 예측이 상당히 타당하며 유용하다는 것을 알 수 있었다.

따라서 본 논문에서 제시한 계산 방법을 이용한다면 축변위 그레고리안 안테나의 형상 설계 후 FEKO, CST, HFSS 등을 이용하여 수 십 시간에 걸쳐 다양한 파라미터를 바꾸면서 특성을 파악해

야하는 초기 설계에 매우 빠르고 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

References

- 1) Jae-Hung Han, So-Hyeun Yun, Jong-Heung Park, Seong-Pal Lee, "Ka-Band Antenna Design Using the Reflector Shaping for the Communications & Broadcasting Satellite", *J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 32, No. 4, pp. 88-94, May 2004.
- 2) C. A. Balans, *Antenna Theory Analysis and Design*, 2nd Edition, *John Wiley & Sons*, 1997.
- 3) Chun-won Kim, "Design of a Cassegrain Antenna", *Department of radio Engineering graduate School, Chungbuk National University*, 2009.
- 4) Tom Milligan, Alexandre P. Popov, "Amplitude Aperture-Distribution Control in Displaced-axis Two Reflector Antenna", *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 39, no.6, December, 1997.
- 5) 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.