

광선추적방법을 이용한 KVN 21m 전파망원경 광학계의 해석

배재한[†], 변도영
한국천문연구원 전파천문연구부

Analysis of KVN 21m Radio Antenna Optics using Ray-Tracing Method

Jae-Han Bae[†] and Do-Young Byun

Radio Astronomy Division, Korea Astronomy & Space Science Institute, Daejeon 305-348, Korea
E-mail: whorujh@kasi.re.kr

(Received February 27, 2009; Accepted May 8, 2009)

요 약

이 연구에서는 KVN(Korean VLBI Network)의 구경 21m 전파망원경의 변형된 카세그레인식 안테나 광학계에 정렬 어긋남이 있을 때 안테나 이득의 감소, 구경면에서의 상 오차, 그리고 빔 틀어짐 정도를 광선추적방법을 이용하여 수치적으로 계산하였다. 고려한 광학계 어긋남의 종류는 피드의 광축방향 편이, 부경의 광축방향 편이, 피드의 광축과 수직방향 편이, 부경의 광축과 수직방향 편이, 그리고 부경의 기울어짐 등 다섯 가지이다. 먼저 이들 광학계 어긋남이 독립적으로 존재할 경우에 대해서 계산을 하였고, 서로의 어긋남 효과를 상쇄시킬 수 있는 보완관계의 어긋남이 복합적으로 존재하는 경우에 대해서도 계산을 하였다. 광선추적방법을 이용한 계산은 전자기적 효과가 고려되지 않은 순수한 기하학적 계산이지만 이 연구로 효율적인 관측을 위한 KVN 21m 안테나 광학계의 정렬이 가능할 것으로 기대된다.

Abstract

In this work, we calculate drop in antenna gain, aperture phase distribution, and antenna pointing shift of KVN(Korean VLBI Network) 21m shaped Cassegrain antenna due to misalignments of antenna optics using ray-tracing method. The misalignments we considered are axial displacement of feed, axial displacement of sub-reflector, lateral displacement of feed, lateral displacement of sub-reflector, and sub-reflector tilt. Calculations are performed not only when these misalignments exist separately, but also when they exist at the same time. Although ray-tracing method is based on geometric optics which does not consider electromagnetic effects, we expect that this work enables us to align antenna optics which give the maximum gain.

Keywords: ray-tracing, antenna optics

[†]corresponding author

1. 서 론

카세그레인 안테나 혹은 KVN(Korean VLBI Network) 21m 안테나와 같은 변형된 카세그레인 안테나의 경우 관측 대상에서 방출된 전파가 주경에서 반사된 후 부경에서 재반사되어 피드 혼(이하 피드)으로 입력된다. 전파가 수신기로 들어오기까지 거치는 일련의 시스템(주경, 부경, 피드)을 안테나 광학계라고 하며 안테나 광학계가 정확하게 정렬되어 있어야 안테나의 이득을 극대화시킬 수 있다. 만약 광학계가 정확히 정렬되어 있지 않고 어긋나 있을 경우 이는 안테나 이득의 감소 뿐 아니라 빔 틀어짐 현상을 야기시켜 효율적인 관측을 어렵게 만든다.

광학계의 어긋남이 안테나에 미치는 영향을 이론적으로 알아보기 위해서 광선추적방법(ray-tracing method)이 널리 이용된다. 여러 전파망원경에 대해 광선추적방법을 이용한 연구가 있었고(Subrahmanyam 2002, Butler 2003), KVN 안테나에 대해서도 Chung et al.(2006)이 광선추적방법을 이용하여 광학계의 어긋남으로 인한 안테나 이득의 감소에 대한 연구를 수행하였다. Chung et al.에서는 피드와 부경에 광축방향과 광축과 수직방향으로 편이가 있을 때 안테나의 이득이 얼마나 감소하는지를 계산하고, 이를 이용해 안테나의 이득 감소가 1% 이내이기 위한 광학계 어긋남의 허용 범위를 알아보았다. 또, 같은 정도의 광학계 어긋남이 있을 경우 변형된 카세그레인 방식으로 제작된 KVN 안테나의 이득 감소를 KVN 안테나에 상응하는 고전적인 카세그레인 안테나의 이득 감소와 비교하였다. Chung et al.의 계산 결과에 의하면 관측 파장을 λ 라고 할 때 KVN 안테나의 이득 감소가 1%보다 작기 위해서는 (1) 피드의 광축방향 편이가 8λ 이내; (2) 부경의 광축방향 편이가 0.07λ 이내; (3) 피드의 광축과 수직방향 편이가 1.2λ 이내; (4) 부경의 광축과 수직방향 편이가 0.16λ 이내 여야 한다. 또한, KVN 안테나에 상응하는 고전적인 카세그레인 안테나와 비교해 보았을 때 같은 정도의 광학계 어긋남에 대해 KVN 안테나의 이득 감소가 고전적인 카세그레인 안테나의 이득 감소보다 큰 것으로 알려졌다. Chung et al.의 연구는 안테나 광학계에 어긋남이 있을 때 이득의 감소를 계산하고, 이를 통해 안테나 광학계 위치의 대략적인 오차 허용 범위를 가늠할 수 있게 해주었지만 부경의 기울어짐이 있는 경우나 광학계의 여러가지 어긋남이 복합적으로 존재하는 경우는 고려하지 않았다.

이 논문에서는 Sletten(1981)을 참고, 수정하여 수치적으로 광선추적방법을 구현하는 알고리즘을 만들었다. 이를 이용하여 KVN 안테나에 대하여 기존에 연구되었던 피드의 광축방향 편이가 있는 경우, 부경의 광축방향 편이가 있는 경우, 피드의 광축과 수직방향 편이가 있는 경우, 부경의 광축과 수직방향 편이가 있는 경우 외에 부경의 기울어짐이 있는 경우에 대해서도 안테나의 이득이 어떻게 변하는지 알아보았다. 또한, 각각의 경우에 구경면에서의 상 오차와 빔 틀어짐 정도도 계산하였다. 그리고 이들 어긋남이 독립적으로 존재하는 경우 뿐만 아니라 어긋남에 의한 효과를 서로 상쇄시킬 수 있는 보완관계를 가진 광학계의 어긋남이 복합적으로 존재하는 경우에 대해서도 이득의 변화를 계산하고 이득의 감소를 최소화하는 광학계 어긋남 사이의 보정비를 구하였다.

논문의 2장에서는 KVN 안테나의 제원에 대해 간략하게 소개하고, 3장에서는 광선추적방법을 설명하겠다. 4장에서는 광선추적방법을 이용한 수치 계산결과를 제시하고, 마지막으로 5장에서는 결론에 대해 이야기하겠다.

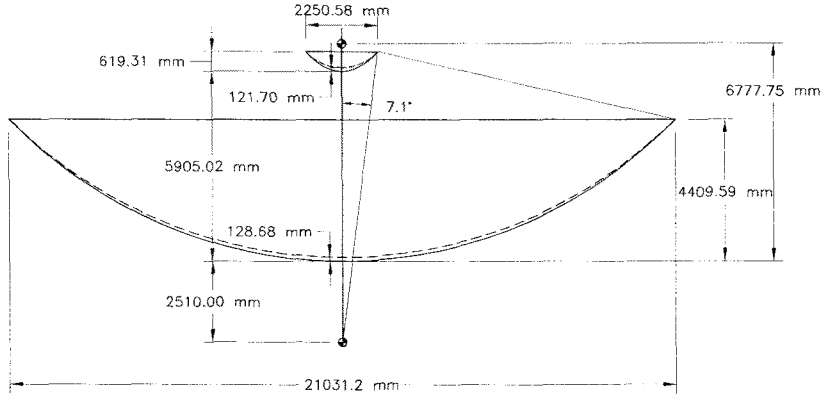


그림 1. KVN 21m 변형된 카세그레인 안테나의 단면도(Antedo 2005). 비교를 위하여 KVN 안테나에 상응하는 고전적인 카세그레인 안테나를 파선을 이용하여 같이 나타내었다.

표 1. KVN 21m 안테나에 상응하는 카세그레인 안테나의 제원.

Antenna Parameters	Specification
Diameter of main-reflector	21031.2 mm
Diameter of sub-reflector	2250.6 mm
Conic constant of main-reflector	-1
Conic constant of sub-reflector	-1.14
Focal length of main-reflector	6586.3 mm
Angle subtended by sub-reflector	7.1 deg
Effective focal length	84750.0 mm
Magnification	12.9
Inter-focal distance	9290.0 mm
Feed edge taper	-17.0 dB

2. KVN 안테나의 제원

KVN은 VLBI(Very Long Baseline Interferometry) 관측을 위한 세 개의 변형된 카세그레인 안테나로 구성된다. 고전적인 카세그레인 안테나의 경우 포물면 형태의 주경과 쌍곡면 형태의 부경으로 이루어지는데, KVN의 세 안테나는 부엽(sidelobe) 레벨의 감소와 보다 높은 안테나 이득을 위하여 고전적인 카세그레인 안테나의 주경과 부경을 그 크기를 증가시키지 않고 모양만을 바꾼 변형된 카세그레인 형식을 따라 제작되었다. 그림 1은 KVN 21m 변형된 카세그레인 안테나와 KVN 안테나에 상응하는 고전적인 카세그레인 안테나의 단면을 보여준다. 두 안테나의 주경과 부경의 지름은 같지만 변형된 카세그레인 안테나의 주경과 부경이 고전적인 카세그레인 안테나의 주경과 부경보다 더 큰 곡률을 가짐을 확인할 수 있다. 변형된 카세그레인 안테나 주경의 지름은 21031.2mm, 부경의 지름은 2250.6mm이고 피드는 주경의 꼭짓점으로부터 2510.0mm 떨어져 위치한다. 또, 주경의 높이는 4409.6mm이며 부경의 높이는 619.3mm이다.

광선추적방법을 구현한 코드의 정확도 시험에 사용한 KVN 21m 안테나에 상응하는 카세그레인 안테나의 제원을 표 1에 제시하였다.

3. 광선추적방법(Ray-Tracing Method)

전파망원경으로 천체를 관측할 때 관측대상으로부터 방출된 전파는 안테나 구경면 바깥에서 들어와 주경, 부경에 반사되어 피드로 들어온다. 하지만 상호호환의 원리(Reciprocity theorem)에 의해 위의 과정과 거꾸로 피드에서 전파가 방출되어 부경, 주경에 차례로 반사된 후 안테나 구경면에 도달한다고 생각해도 무방하다. 이 연구에서는 상호호환의 원리에 입각해 전파가 피드에서 출발하여 부경, 주경에 차례로 반사된 후 구경면에 도달하기까지의 경로를 광선추적방법을 이용해 계산하고, 이를 이용해 각 광선의 경로차에 의해 발생하는 안테나 이득의 변화, 구경면에서의 상 오차, 그리고 빔 들어짐 정도를 계산하였다.

광선추적방법을 구현하는 알고리즘은 Sletten을 참고, 수정하여 만들었고 계산은 파이썬(Python)을 이용해 수행하였다. 이 알고리즘의 목적은 각각의 광선이 안테나와 만나는 점과 그 점에서 반사되는 전파의 방향을 찾아 이로부터 각 광선의 이동거리를 구하는 것이다. 이를 위해 Sletten은 먼저 xy 좌표계가 직교좌표계인 유한개의 점으로 이루어진 3차원 안테나를 정의하였다. 그리고 안테나의 모든 점 $P(x_n, y_m, z_{n,m})$ 에 대해서 $z = z_{n,m}$ 인 평면상에서 광선이 지나가는 x,y 좌표와 P의 x,y 좌표인 x_n, y_m 과의 차를 나타내는 x, y 방향 miss function¹ $G_{x,n,m}$ 과 $G_{y,n,m}$ 의 절대값의 합 $L = |G_{x,n,m}| + |G_{y,n,m}|$ 을 계산해 이 값이 최소가 되는 점 $P_A(x_A, y_A, z_A)$ 를 찾는다. 다음으로 P_A 를 중심으로 주변의 3×3 크기의 격자에 대해 테일러 전개를 이용한 유한차분법으로 광선이 안테나와 만나는 점 $P_J(x_J, y_J, z_J)$ 와 P_A 의 좌표의 차 $\Delta x (= x_J - x_A)$, $\Delta y (= y_J - y_A)$, $\Delta z (= z_J - z_A)$ 를 구해 광선이 안테나의 주경 또는 부경과 만나는 점 P_J 를 찾고, 스넬의 법칙(Snell's law)을 이용해 P_J 에서 반사되는 광선의 방향을 구한다.

이 연구에서 사용한 좌표계는 그림 2와 같이 주경의 꼭짓점을 원점으로 광축(z축)을 따라 부경 방향을 z축의 양의 방향으로, 피드 방향을 음의 방향으로 정의하고 광축과 수직으로 즉, 구경면과 평행하게 xy평면이 위치하도록 한다. 그리고 KVN 안테나 설계도에 제시된 주경과 부경 판넬의 x,z 좌표를 광축을 중심으로 회전시켜 얻은 유한개의 점으로 이루어진 3차원 회전 포물면을 사용하였다. 이 경우 xy 좌표계가 Sletten의 경우처럼 직교좌표계가 아닌 극좌표계이기 때문에 앞서 설명한 방법을 사용하려면 좌표계의 수정이 필요하다. 우선 Sletten의 방법과 마찬가지로 L 이 최소가 되는 점 P_A 와 P_A 를 포함한 극좌표계상의 주변 9개의 점 $P_A - P_I$ 를 찾는다. 그리고 그림 1과 같이 이 9개의 점, $P_A - P_I$ 를 모두 포함하는 일정 간격의 국부적인 직교좌표계를 만든다. 이 연구에서는 이 국부적인 xy 좌표계를 9×9 크기의 격자(그림 2의 점선)로 나누어 이에 대해 다시 L 이 최소가 되는 점 P_A^* 을 찾은 후, P_A^* 를 중심으로 주변의 3×3 크기의 격자(그림 2의 실선)를 만들고 테일러 전개를 이용한 유한차분법으로 P_J 를 찾았다. 국부 직교좌표계의 z좌표를 찾는 데에는 실제 안테나의 x, z좌표를 30차로 근사한 다항식을 사용하였다.

코드의 정확도는 KVN 안테나에 상응하는 카세그레인 안테나에 대하여 광학계의 어긋남이 있을 때 수신되는 전파의 경로차를 수치적으로 계산하고 그 결과를 해석적인 결과와 비교해봄으로써 검

¹ 임의의 점 $P(x_n, y_m, z_{n,m})$ 에 대한 x 방향과 y 방향 miss function은 안테나 표면으로 입사하는 광선의 벡터 \vec{S} 를 $\vec{S} = k_x \hat{x} + k_y \hat{y} + \hat{z}$ 라 하고, 이 광선의 출발점을 (x_0, y_0, z_0) 라고 했을 때, 각각 $G_{x,n,m} = k_x(z_{n,m} - z_0) - (x_n - x_0)$ 와 $G_{y,n,m} = k_y(z_{n,m} - z_0) - (y_m - y_0)$ 으로 정의되며, 이 값은 광선이 안테나의 표면과 만나는 점에서 0이 된다.

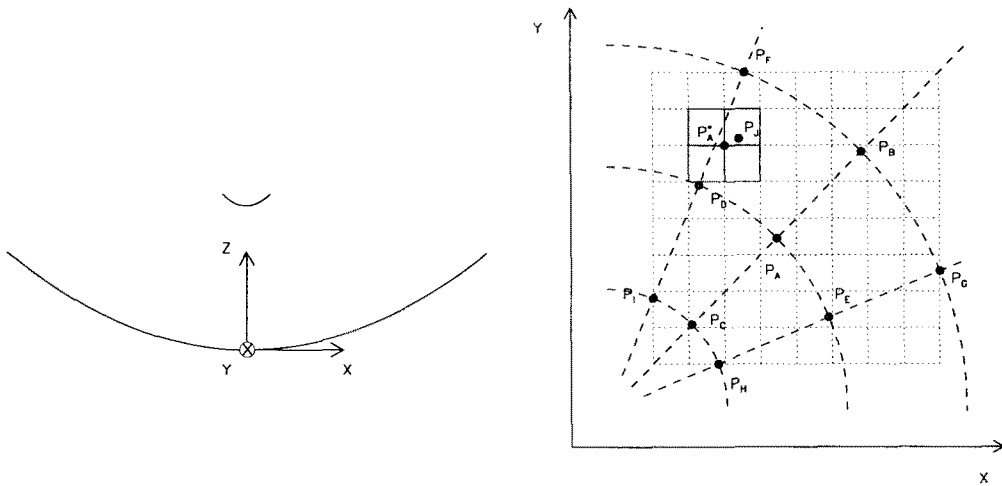


그림 2. (좌) KVN 안테나의 좌표 설정 모습. y축 방향에서 바라본 모습이며 주경에서 부경으로 향하는 방향이 양의 z방향이다. (우) KVN 안테나의 xy극좌표계(파선)와 Sletten의 알고리즘을 사용하기 위해 새롭게 만든 국부적인 xy직교좌표계(점선 및 실선). 그림에서 $P_A - P_I$ 는 극좌표계상의 점이고, P_J 는 실제로 광선이 안테나와 만나는 점이다. P'_A 는 P_J 근방의 국부 직교좌표계에서 L 이 최소가 되는 점이다.

증하였다. 수치 계산은 구경면에서 y축상에 일정한 간격으로 50개의 광선이 배치되도록 광선을 만든 후, 이를 광축을 중심으로 10° 간격으로 회전시킨 총 1800개의 광선을 가지고 수행하였으며 해석적인 결과는 Ruze(1966)의 방법과 같은 방법으로 계산하였다. 다만 Ruze의 논문에서는 광학계 어긋남에 대한 1차항만을 고려하였으나 이 연구에서는 광학계 어긋남에 대한 2차항까지를 고려하였다. 계산 결과 3차항부터는 고려하지 않아도 결과값에 큰 영향을 주지 않았다. 그림 3은 관측 파장(λ)을 3mm로 하였을 때 어긋남의 1차항만을 고려한 경우와 2차항까지 고려한 경우 해석적인 결과와 수치 계산 결과의 오차를 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 이 논문에서 고려한 어긋남 범위² 내에서 광학계 어긋남에 대한 1차항까지만 고려해 준 경우에는 관측 파장의 $\sim 0.7\%$ 이내의 오차를 가진다. 하지만 2차항까지 고려한 경우 1차항까지만 고려해 준 경우의 $\sim 1/10$ 에 해당하는 관측 파장의 $\sim 0.08\%$ 이내의 오차를 가진다.

또, 카세그레인 안테나와 KVN 21m 변형된 카세그레인 안테나에 광학계의 어긋남이 없는 경우 광선추적방법을 이용해 수치계산을 해 본 결과 두 경우 모두 전파 이동경로 오차의 제곱평균제곱근(rms)이 관측 파장보다 매우 작은 $\sim 2\mu\text{m}$ 였다. 이 결과와 더불어 앞서 제시한 해석적인 결과와 수치 계산의 오차를 고려해 볼 때, 이 연구에서 사용한 코드의 계산 결과를 신뢰할 수 있다고 판단된다.

4. 수치계산 결과 및 해석

계산은 3장에서 설명한 광선추적방법을 이용하여 피드의 광축방향 편이, 부경의 광축방향 편이,

²이 연구에서는 피드의 광축방향 편이의 경우 50λ , 부경의 광축방향 편이의 경우 0.5λ , 피드의 광축과 수직방향 편이의 경우 10λ , 부경의 광축과 수직방향 편이의 경우 1λ , 부경의 기울어짐의 경우 0.1° 까지의 기울어짐을 고려하였다.

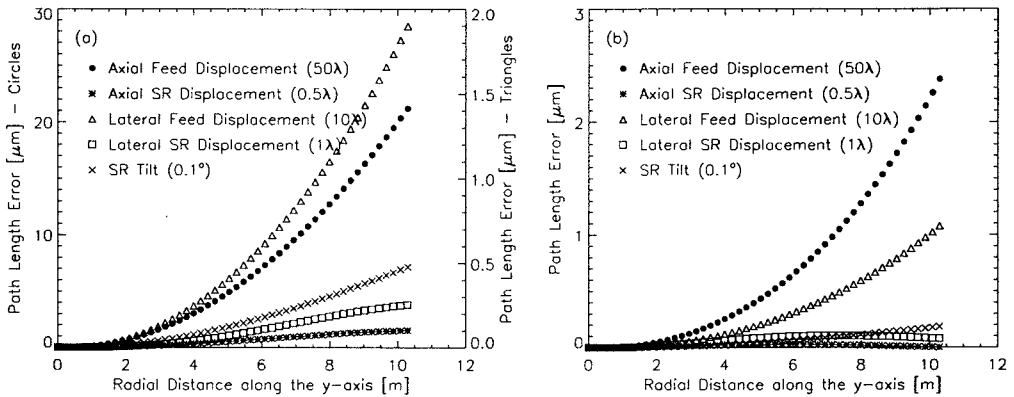


그림 3. 카세그레인 안테나에 광학계의 어긋남이 있을 때 광선추적방법을 이용한 수치 계산 결과와 (a) 어긋남에 대한 1차항만을 고려한 경우, (b) 어긋남에 대한 2차항까지 고려한 경우 해석적인 결과의 차이를 나타낸 그림. 계산 결과는 관측 파장(λ)을 3mm로 하였을 때의 결과이며, (a)에서 피드의 광축방향 이동을 나타내는 동그라미 모양의 점들은 좌측의 y축을, 나머지 점들은 우측의 y축을 참고하면 된다.

피드의 광축과 수직방향 편이, 부경의 광축과 수직방향 편이, 그리고 부경의 기울어짐이 각각 독립적으로 존재하는 경우에 대해서 수행하였고, 이들이 복합적으로 존재하는 경우에 대해서도 계산을 수행하였다. 광학계에 어긋남을 줄 때 피드와 부경 모두 광축방향으로는 z축의 양의 방향으로, 광축과 수직방향으로는 y축의 양의 방향으로 이동시켰고, 부경 기울어짐의 경우에는 부경을 부경의 꼭짓점을 중심으로 yz평면상에서 시계방향으로 회전시켰다. 광선추적방법에 사용된 모든 광선은 피드에서 출발하였으며 광학계의 어긋남이 없을 때 구경면에서 중심으로부터 y축을 따라 100개의 광선이 일정한 간격으로 배치되도록 하였다. 그리고 각 광선을 z축을 중심으로 10° 간격으로 회전시켜 만든 총 3600개의 광선을 뿌려주었다.

안테나 이득(G)은 구경면에서의 상오차가 없을 때의 이득을 G_0 , 관측 파장을 λ , 경로 길이 오차의 제곱평균제곱근의 절반을 ϵ 이라고 했을 때 다음과 같이 나타낼 수 있다(Ruze 1966의 식 (1)).

$$\frac{G}{G_0} = e^{-\left(\frac{4\pi\epsilon}{\lambda}\right)^2} \tag{1}$$

$$\epsilon = \frac{1}{2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - p_{f,i})^2 w_i} \tag{2}$$

식 (2)에서 p_i 는 각각의 광선의 경로 길이, $p_{f,i}$ 는 광선 경로의 길이를 1차로 근사한 근사값, 그리고 w_i 는 각각의 광선이 가지는 가중치를 나타낸다. 일반적으로 광선이 가지는 가중치는 구경면에서의 조명패턴에 의해 결정되는데, KVN 안테나의 경우 균일조명패턴을 가지도록 카세그레인 안테나를 변형시켰기 때문에 광선의 가중치가 구경면에서 각각의 광선이 차지하는 면적에 의해서만 결정된다. 따라서 이 경우 각 광선의 가중치는 광선이 구경면에서 차지하는 면적을 전체 구경면의 면적으로 나눈 값으로 정의된다. 광선의 가중치를 구할 때, 전파가 안테나로 들어오는 과정에서 구경면을

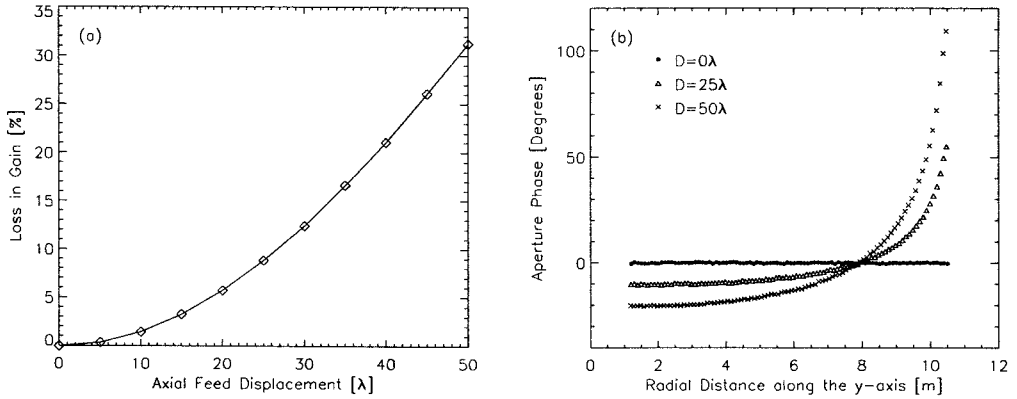


그림 4. 피드의 광축방향 편이가 있는 경우 (a) 안테나 이득의 변화와 (b) y축의 양의 방향을 따라 그린 구경면에서의 상 오차

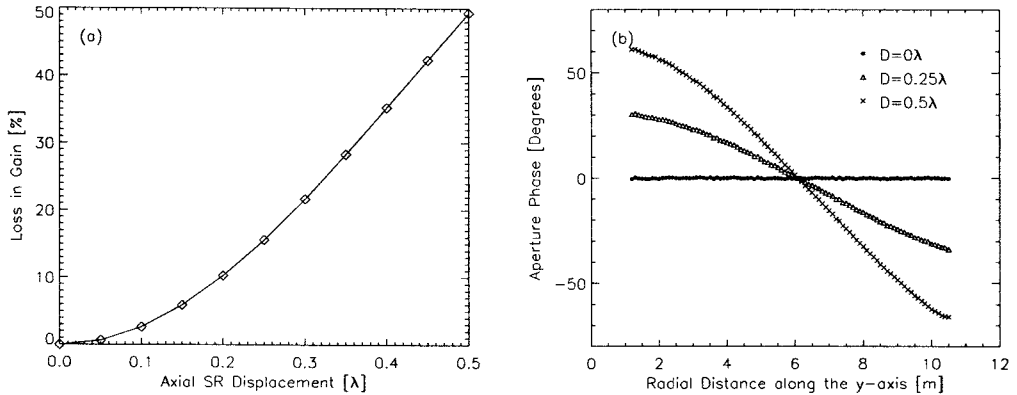


그림 5. 부경의 광축방향 편이가 있는 경우 (a) 안테나 이득의 변화와 (b) y축의 양의 방향을 따라 그린 구경면에서의 상 오차

가로막고 있는 부경과 부경 지지대의 방해효과를 고려해주었으며 방해효과를 고려하면 전체 구경면의 ~88%에 해당하는 면적에 전파가 들어온다.

4.1 광축방향 편이

그림 4와 5는 각각 피드와 부경에 광축방향 편이가 있을 때 안테나 이득의 변화와 구경면에서 중심으로부터의 거리에 따른 상 오차를 나타내었다. 피드의 광축방향 편이는 50λ 까지, 부경의 광축방향 편이는 0.5λ 까지 고려하였으며 상 오차는 구경면 중심에서부터 y축을 따라 자른 단면에서 y좌표가 양인 점들에 대해서만 나타내었다. 계산 결과에 따르면 이득의 감소가 1% 이하이기 위한 피드와

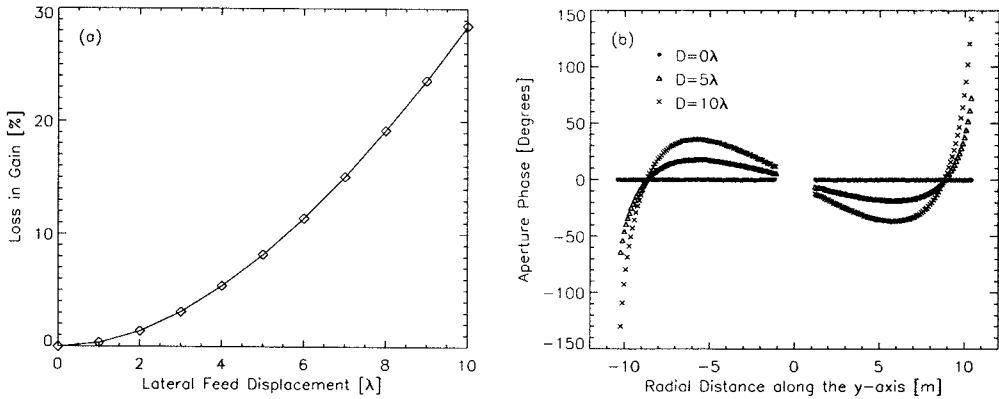


그림 6. 피드의 광축과 수직방향으로의 편이가 있는 경우 (a) 안테나 이득의 변화와 (b) y축을 따라 그린 구경면에서의 상 오차

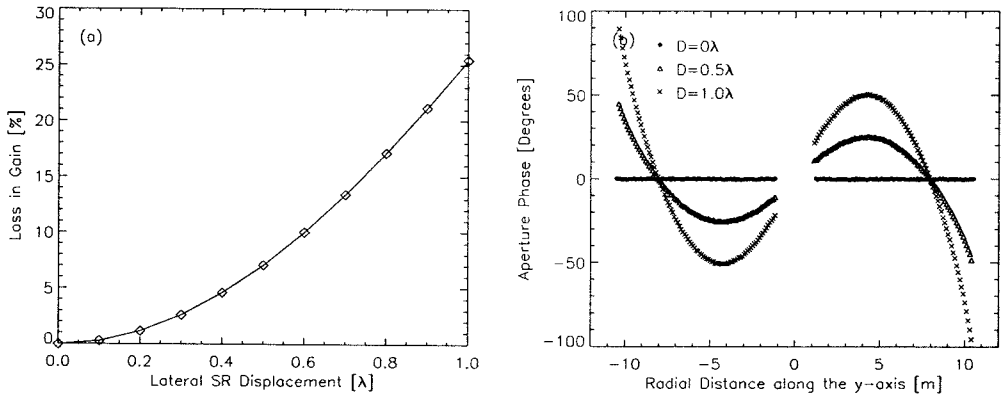


그림 7. 부경의 광축과 수직방향으로의 편이가 있는 경우 (a) 안테나 이득의 변화와 (b) y축을 따라 그린 구경면에서의 상 오차

부경의 편이 허용오차는 각각 8.26λ 와 0.06λ 이다. 피드와 부경이 광축방향으로만 움직였기 때문에 이 경우에 광선의 이동 경로는 광축에 대해 대칭적이며 따라서 안테나 빔의 틀어짐은 없다. 그림 4와 5에 제시한 결과는 피드와 부경을 z축의 양의 방향으로 이동시켰을때의 결과이며 피드와 부경을 z축의 음의 방향으로 이동시켜도 이 연구에서 고려한 어긋남 범위 내에서는 이득 변화의 오차가 계산값의 1% 이하이다.

4.2 광축과 수직방향 편이

그림 6과 7은 각각 피드와 부경에 광축과 수직방향 편이가 있을 때 안테나 이득의 변화와 구경면

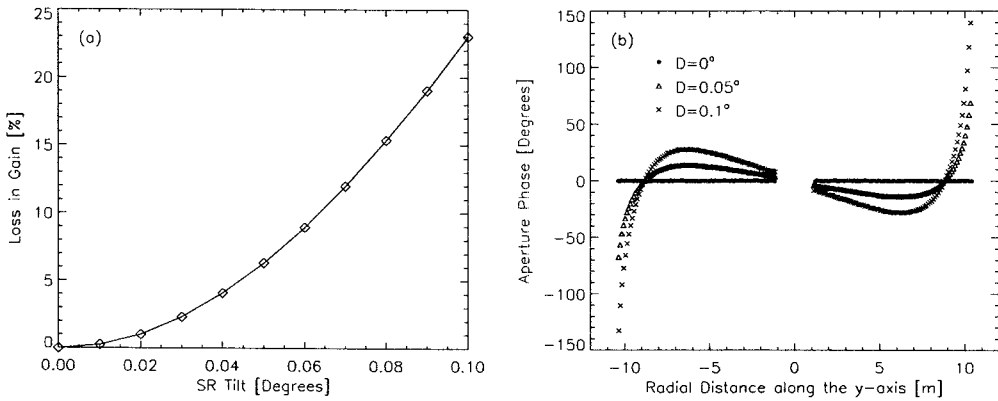


그림 8. 부경에 기울어짐이 있는 경우 (a) 안테나 이득의 변화와 (b) y축을 따라 그린 구경면에서의 상 오차. 관측 파장(λ)이 3mm인 경우의 결과이다.

에서 반경에 따른 상 오차를 나타내었다. 피드의 광축과 수직방향 편이는 10λ 까지, 부경의 광축과 수직방향 편이는 1λ 까지 고려하였다. 계산 결과 이득의 감소가 1% 이하이기 위해서는 피드의 이동을 1.69λ 이내로, 부경의 이동을 0.19λ 이내로 해야한다. 피드나 부경이 광축 방향으로 움직였을 때에는 빔 틀어짐 현상이 없지만 광축과 수직방향으로 움직였을 경우에는 광선의 이동 경로가 광축을 중심으로 대칭적이지 않기 때문에 빔 틀어짐 현상이 발생한다. 부경의 경우 광축과 수직방향으로 15mm까지 움직일 수 있으며 피드와 부경에 광축과 수직방향으로 1mm의 편이가 있는 경우 빔 틀어짐은 각각 $-1.53''$ 와 $-21.9''$ 이다. 여기서 (-) 부호가 의미하는 것은 광학계의 움직임과 반대방향으로 빔이 틀어짐을 나타낸다. 예를 들어, 피드를 y축의 양의 방향으로 1mm만큼 이동시킬 경우 빔은 이와 반대 방향인 y축의 음의 방향으로 $1.53''$ 틀어진다.

4.3 부경의 기울어짐

그림 8은 부경을 부경의 꼭짓점을 중심으로 yz평면상에서 반시계방향으로 회전시켰을 때 안테나 이득의 변화와 구경면에서의 상 오차를 나타내었다. 부경의 기울어짐은 0.1° 까지 고려하였다. 관측 파장(λ)이 주파수 100GHz에 해당하는 3mm일 때, 이득의 감소를 1% 이하로 하기 위한 부경 기울어짐의 허용오차는 0.02° 이고, 부경을 $1''$ 회전시켰을 때 빔의 틀어짐은 $0.11''$ 이다. 참고로 부경은 1.8° 까지 기울일 수 있다.

4.4 광학계의 복합적인 어긋남

지금까지는 한 가지 종류의 안테나 광학계에 대해 하나의 어긋남이 있는 경우를 다루었다. 하지만 실제로는 앞에서 다룬 여러가지 광학계 어긋남이 동시에 존재할 수 있고, 이러한 경우 여러 광학계 어긋남 사이의 관계를 알고있는 것이 유용하다. 하나의 광학계 어긋남을 다른 광학계 어긋남으로 완전히 보완할 수는 없지만 어긋남으로 인한 이득의 감소를 효과적으로 상쇄시킬 수 있다. 예를 들어, 피드에 편이가 있는 경우 피드를 최적 위치로 옮기는 것은 힘든 일이지만 안테나 광학계 사이의

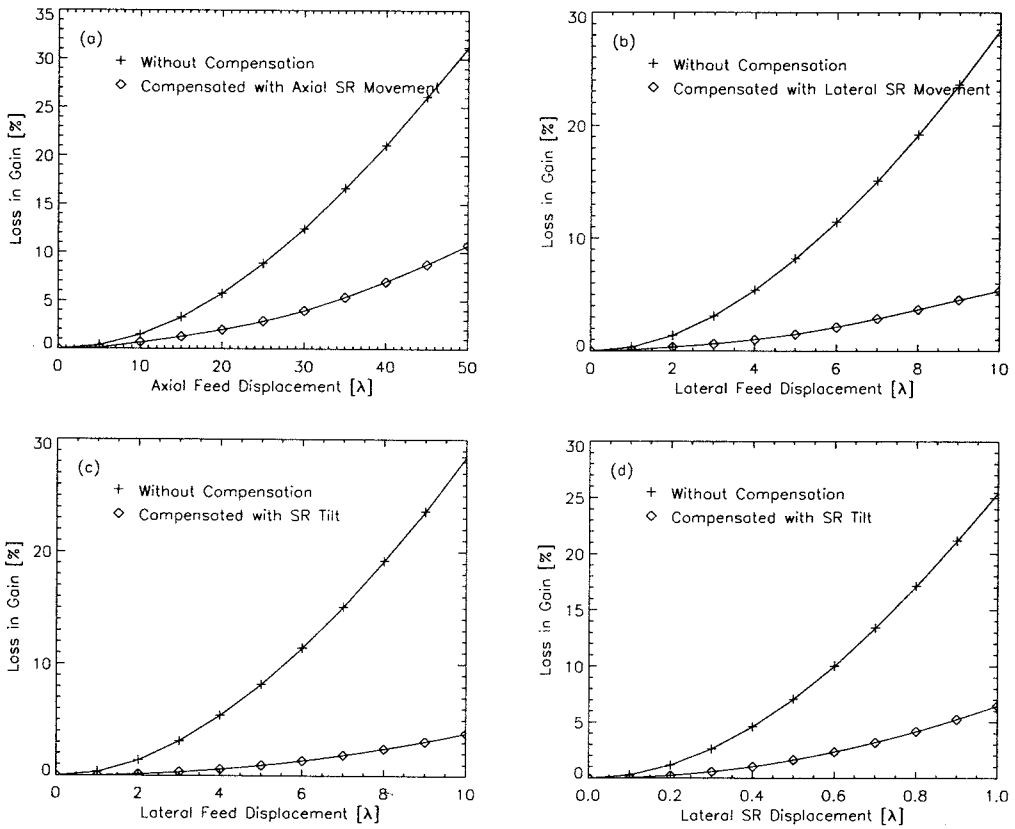


그림 9. 네 개의 그림은 각각 (a) 피드의 광축방향 편이를 부경의 광축방향 편이로 보정한 결과, (b) 피드의 광축과 수직방향 편이를 부경의 광축과 수직방향 편이로 보정한 결과, (c) 피드의 광축과 수직방향 편이를 부경의 기울어짐으로 보정한 결과, 그리고 (d) 부경의 광축과 수직방향 편이를 부경의 기울어짐으로 보정한 결과를 나타내었다. 각각의 그림에서 십자가 모양의 그래프는 보정을 하기 전의 안테나 이득의 감소율, 마름모 모양의 그래프는 안테나 이득의 감소가 최소가 되도록 어긋남을 보정을 해 주었을 때의 결과를 나타낸다.

관계를 알고 있다면 이를 이용해 피드 대신 부경을 움직임으로써 광학계 어긋남의 효과를 최소화 할 수 있다. 피드의 광축방향 편이와 부경의 광축방향 편이가 서로 이러한 보완관계에 있으며, 피드의 광축과 수직방향 편이와 부경의 광축과 수직방향 편이, 부경의 기울어짐도 서로의 효과를 보완할 수 있다.

그림 9는 각각 피드의 광축방향 편이를 부경의 광축방향 편이로 보정한 경우, 피드의 광축과 수직방향 편이를 부경의 광축과 수직방향 편이로 보정한 경우, 피드의 광축과 수직방향 편이를 부경의 기울어짐으로 보정한 경우, 그리고 부경의 광축과 수직방향 편이를 부경의 기울어짐으로 보정한 경우에 이득 감소의 변화를 나타내었다. 서로 보완관계에 있는 광학계 어긋남으로 이득의 감소가 최소화 되도록 보정해 주었을 때, 이 연구에서 고려한 어긋남 범위 내에서 최대 ~33%까지 이득의 감소

표 2. 안테나 광학계에 어긋남이 있을 때 계산 결과.

광학계 어긋남의 종류	이득의 감소가 1% 이내이기 위한 허용 오차	빔 틀어짐
피드의 광축방향 편이	$< 8.26\lambda$	없음
부경의 광축방향 편이	$< 0.06\lambda$	없음
피드의 광축과 수직방향 편이	$< 1.69\lambda$	$-1.53''/mm$
부경의 광축과 수직방향 편이	$< 0.19\lambda$	$-21.9''/mm$
부경의 기울어짐	$< 0.02^\circ$	$0.11''/''$

를 줄일 수 있음을 확인할 수 있다. 이득의 감소를 최소로 하기 위해서는 부경이 광축방향으로 1mm 어긋나 있을 때 피드를 광축방향으로 160mm만큼 같은 방향으로 이동시켜 주어야 하고, 부경이 광축과 수직방향으로 1mm 어긋나 있을 때 피드를 광축과 수직방향으로 10mm만큼 역시 같은 방향으로 움직여 주어야 한다. 또한, 관측 파장이 3mm인 경우 피드가 광축과 수직방향인 y축의 양의 방향으로 1mm 어긋나 있을 경우에는 부경을 18''만큼 시계방향으로 기울어줌으로써 이득의 감소를 최소화 할 수 있고, 부경이 광축과 수직방향인 y축의 양의 방향으로 1mm 어긋나 있을 경우에는 부경을 182''만큼 시계 반대방향으로 기울여 주어야 한다.

5. 결 론

이 논문에서는 광선추적방법을 이용해 KVN 21m 변형된 카세그레인 안테나 광학계에 어긋남이 있을 때 안테나 이득의 변화, 구경면에서의 상 오차, 그리고 빔 틀어짐 등을 수치적으로 계산하였다. 고려한 광학계 어긋남의 종류는 피드의 광축방향 편이, 부경의 광축방향 편이, 피드의 광축과 수직방향 편이, 부경의 광축과 수직방향 편이, 그리고 부경의 기울어짐이다. 계산 결과는 표 2에 제시하였다. 앞에서 언급한 광학계의 어긋남은 독립적으로 존재할 수도 있지만 동시에 복합적으로 존재할 수 있으며, 이들 사이의 관계를 알고있다면 이동이 힘든 피드에 편이가 있을 경우 이동이 쉬운 부경의 움직임으로 피드의 편이를 보완하는 등의 이점이 있다. 피드의 광축방향 편이와 부경의 광축방향 편이가, 피드의 광축과 수직방향 편이와 부경의 광축과 수직방향 편이, 그리고 부경의 기울어짐이 서로의 어긋남 효과를 상쇄할 수 있는 보완관계에 있다. 이득의 감소가 최소가 되도록 서로 보완관계에 있는 어긋남을 이용해 보정을 해 주었을 때, 이득의 감소를 보정 전 이득 감소의 1/3 이하로 줄일 수 있었다. 그 때의 보정비는 각각 피드의 광축방향 움직임 : 부경의 광축방향 움직임 = 160mm : 1mm, 피드의 광축과 수직방향 움직임 : 부경의 광축과 수직방향 움직임 = 10mm : 1mm, 피드의 광축과 수직방향 움직임 : 부경의 기울어짐 = 1mm : 18'', 그리고 부경의 광축과 수직방향 움직임 : 부경의 기울어짐 = 1mm : 182''이다. 단, 부경 기울어짐의 경우에는 관측 파장으로 3mm를 사용하였을 때의 결과이다.

이 연구 결과는 이득을 극대화 하기 위한 피드와 부경 위치의 오차 허용 범위를 제시해주고, 광학계의 어긋남이 있을 때 구경면에서의 상 오차와 빔 틀어짐 정도를 알려주었다. 또한, 광학계의 어긋남 사이의 보완효과도 알아보았다. 하지만 이 연구에서 고려되지 않은 피드의 빔 패턴에 의한 효과나 중력에 의한 안테나의 변형 효과는 향후 연구에서 고려되어야 할 것이며, 실제 관측 데이터를 이용한 확인도 필수적으로 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

Antedo, Inc. 2005, Technical Memo, KVN-21M-TM-130

Butler, B. J. 2003, ALMA (Atacama Large Millimeter Array) Memo, No.479

Chung, M., Byun, D., & Khaikin, V. B. 2006, JA&SS, 23, 327

Ruze, J. 1966, Proc. IEEE, 54, 633

Sletten, C. J. 1981, Proc. IEEE, 69, 743

Subrahmanyam, R. 2002, ATNF (Australia Telescope National Facility) Memo, 39.3/113