

論文99-36D-8-2

100/150GHz 대역용 이중채널 SIS수신기의 준광학계 설계, 제작 및 측정

(The Design, Development, and Measurement of Quasioptical system for Dual Channel SIS Receiver of 100/150GHz Band)

朴鍾愛*, 韓錫太*, 金泰成*, 金光東*, 金煥寧*,
鄭玄洙*, 趙世衡*, 梁鍾萬**

(Jong Ae Park, Seog Tae Han, Tai Seong Kim, Kwang Dong Kim,
Hyo Ryong Kim, Hyun Soo Chung, Se Hyung Cho,
and Jongmann Yang)

요 약

100GHz와 150GHz 대역의 우주전파를 동시에 관측하기 위한 준광학계가 설계, 제작되었다. 밀리미터파 및 서브밀리미터파 대역의 전송수단으로 널리 이용되고 있는 준광학계는 가우시안 빔으로 해석된다. 따라서 가우시안 빔 이론을 이용하여, 광대역 주파수 범위에서 주로 사용되는 영상 빔 방법으로 준광학계를 해석한다. 이중채널 준광학계는 두 대역의 전파를 동시에 관측하기 위해서, 두 개의 빔을 유도하는 시스템이다. 따라서 두 빔을 유도하기 위한 준광학계와 준광학계를 구성하는 각 부품은 영상 빔 방법을 이용하여 설계하였다. 이러한 설계를 바탕으로 준광학계의 각 소자들이 제작되었고, 전체 시스템이 구현되었다. 제작된 준광학계는 자체에서 제작한 빔 측정장치를 이용하여 측정함으로써, 설계에 대한 검증과 정확한 제작여부를 확인하였다. 그리고 제작된 시스템은 이중채널 수신기에 설치되어, 우주전파를 동시에 성공적으로 관측함으로써 그 성능이 입증되었다.

Abstract

We have designed and built the quasioptical system for the dual channel receiver which is used for the simultaneous observation of the cosmic radio with 100GHz band and 150GHz band. The quasioptical system has been widely used to guide the beam for the millimeter and submillimeter waves. A Gaussian distribution of field and power transverse to their axis of propagation allow the simple and elegant theory of Gaussian quasioptics. Using the theory of Gaussian beam, we introduced the analysis of image beam which is applied for a wide range of frequency.

In order to guide two beams from the Cassegrain antenna simultaneously, the quasioptical system and its components for the dual channel receiver were designed by using the image beam method. We have checked the characteristics of the quasioptical components and the system by using the beam measurement system, which is made by us. The quasioptical system has been installed in the dual channel receiver on the Cassegrain antenna. The performance of this system has been finally confirmed through the successful simultaneous observation with two bands of the cosmic radio.

* 正會員, 韓國天文研究院 大德電波天文臺

(Korea Astronomy Observatory)

** 正會員, 梨花女子大學校 物理學科 및 天體應用物理 센터

터

(Ewha Women's University)

※ 본 연구는 천문대의 "광학 및 전파망원경을 활용한 천체분광관측연구"의 일환으로 일부는 학술진흥재단 (기초과학연구소) 1998-015-D00129 지원에 의해 수행되었음.

接受日字:1999年4月2日, 수정완료일:1999年7月13日

I. 서론

밀리미터파 대역의 전자파를 전송하는 전송선로로 주로 이용되고 있는 도파관은 전송손실이 매우 커서 실제로 원거리를 전송하는데 어려운 점이 발생될 뿐만 아니라, 시스템을 구성하는 부품의 크기가 매우 작아져서 제작이 곤란해진다. 이러한 문제를 해결하고자 밀리미터파 및 서브밀리미터파 대역의 전자파를 원거리까지 전송하는 수단으로서 가우시안 빔(Gaussian beam)으로 기술되는 준광학계(Quasioptical system)가 이용된다. 레이저 공진기 이론^[1]으로부터 비롯된 이러한 빔 가이드(Beam guide) 시스템은 이들 주파수 대역에서 매우 광범위하게 활용되고 있다. 더욱이 밀리미터파 및 서브밀리미터파 대역의 전파천문학 및 통신 위성용으로 이용되고 있는 카세그레인(Cassegrain) 안테나는 일반적으로 안테나의 직경에 비해 매우 긴 초점길이를 갖기 때문에 안테나의 초점에 집중된 전파 빔의 전송은 준광학 이론으로 해석된다^[2-4]. 따라서 안테나의 초점에 집중된 전파 빔을 수신기의 피드 혼(Feed horn)까지 최적 결합시키기 위해서는 초점소자를 비롯한 준광학 소자들이 사용된다. 이러한 준광학 소자들의 특성과 설치될 위치를 결정하는 준광학계 설계에는 가우시안 빔이 이용된다. 대덕전파 천문대에서 보유하고 있는 카세그레인 안테나는 안테나의 직경이 14m인 주경과 1m의 부경으로 구성되어 있다. 이 안테나와 125-175GHz의 주파수 범위를 갖는 쇼트키(Schottky) 믹서를 이용한 헤테로다인 수신기용 준광학계는 가우시안 빔의 전송이론이 적용된 준광학계 설계 기법을 이용하여 설계, 제작하여 관측연구에 활용한 바 있다^[5]. 또한 85-115GHz의 주파수 범위를 갖는 초전도체(SIS, Superconductor Insulator Superconductor) 믹서를 이용한 헤테로다인 수신기용 준광학계도 설계, 제작되어 우주전파관측 연구에 이용되었다^[6]. 그러나 이들 수신기 시스템에서 이용되고 있는 믹서를 초저온으로 냉각시키기 위한 냉각 시스템이 각각 분리되어 있으므로 이들 수신기를 카세그레인 안테나에 동시에 설치하여 우주전파를 관측하는 것은 불가능하였다. 그러므로 이들 수신기를 안테나에 설치하고 분리하는데 많은 시간이 소비되어 관측효율이 저하되는 결과를 초래하였다. 따라서 한 개의 냉각시스템으로 두 대역의 초전도체 믹서를 냉각시켜 동시에 관측할 수 있는 새로운 형태의 수신기 시스템인 이중채널 수신기를 개발하기 위하여 준광학계 시

스템을 설계, 제작하였다. 이러한 수신기 시스템은 수신기의 분리 및 설치로 인한 시간손실이 없어 획기적으로 관측효율을 높일 수 있음은 물론, 두 주파수 대역의 우주전파에 대해 동시관측이 가능한 천문학적으로도 다양한 형태의 관측연구를 제공할 수 있다.

새로운 이중채널 수신기의 준광학 시스템에서는 카세그레인 초점에 집중된 전파의 빔이 편광 빔 분할기(Polarization beam splitter)에 의해 수직편파 빔과 수평편파 빔으로 나뉘어져 각각의 빔 경로를 통해서 한 개의 냉각기 안에 설치된 각각의 피드 혼에 전송된다. 따라서 이중채널 수신기의 준광학 설계 목적은 카세그레인 초점근처의 주어진 공간에 몇 개의 준광학 소자들을 이용하여, 각 채널의 빔을 손실 없이 피드 혼에 최적 결합시키는 것이다.

본 논문에서 소개하는 준광학계 이론에서는 가우시안 빔에 대한 기본적인 이론을 정리하고, 정리된 이론을 근거로 가우시안 빔과 초점소자와의 관계, 광대역의 주파수 범위를 갖는 이미지(Image) 빔 방법을 제시한다. 제시된 이론을 바탕으로 이중채널 수신기용 준광학계의 설계방법과 제작에 관하여 기술하고, 제작한 준광학계를 측정할 목적으로 자체에서 제작한 빔 측정장치를 이용하여 측정한 결과도 제시한다.

II. 준광학계 이론

1. 가우시안 빔의 전송특성

자유공간에서의 파동방정식을 전기장 ψ 에 대해서 기술할 때, z 축으로 천천히 변하면서 진행되는 전자파는 시간에 대한 변화는 고려하지 않을 경우 다음과 같은 기본 모드의 해를 갖는다^[1, 7].

$$\begin{aligned} \Psi(x, y, z) = & A \frac{w_0}{w(z)} \exp \left[- \left\{ \frac{t}{w(z)} \right\}^2 \right] \exp \left[- i \frac{\pi t^2}{\lambda r(z)} \right] \\ & \cdot \exp \left[i \arctan \left\{ \frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right\} \right] \exp \left[- ikz \right] \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 λ 는 신호의 파장, t 는 $(x^2 + y^2)^{1/2}$ 이다. 그리고 $w(z)$ 는 전자파의 빔이 진행되는 방향의 축에 수직인 장의 세기의 변화를 의미하는 것으로, 가우시안 형태를 갖는 장의 세기로부터 1/e되는 지점의 빔 반경을 나타낸다. 그 크기가 최소가 되는 빔 반경을 w_0 로 나타내며 빔 허리(Beam waist)라고 부른다. 빔 허리 부분에서 빔의 파면(Wave front)은 평면이 되지만,

빔 허리로부터 충분히 떨어진 거리에서의 파면은 구면파(Spherical wave)가 된다. 빔 반경과 구면파의 곡률 반경(Radius of curvature)을 나타내는 $r(z)$, 그리고 빔의 확산각(θ)은 다음 식으로 주어진다.

$$w(z) = w_0 \left\{ 1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$r(z) = z \left\{ 1 + \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda z} \right)^2 \right\} \quad (3)$$

$$\theta = \lambda / \pi w_0 \quad (4)$$

이러한 가우시안 빔의 전송 특성은 그림 1에 나타내었다.

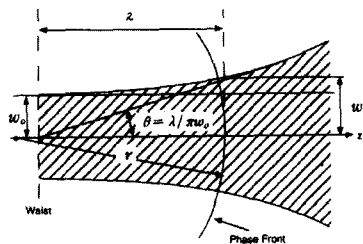


그림 1. 빔 허리 근처에서 가우시안 빔
Fig. 1. Gaussian beam near the beam waist.

2. 가우시안 빔과 초점소자와의 결합

기하광학에서 널리 이용되는 얇은 렌즈 근사(Thin lens approximation) 이론을 가우시안 빔과 초점소자의 결합에도 적용할 수 있다. 이 이론을 적용하면 그림 2에 제시한 바와 같이 빔 허리가 w_{01} 인 가우시안 빔이 초점길이가 f 인 렌즈에 의해서 다른 빔 허리(w_{02})를 갖는 빔으로 전송될 때, 렌즈는 렌즈 면에서 빔의 세기에는 영향을 미치지 않고, 다만 한 쪽에서 들어온 곡률 반경이 r_1 인 빔을 r_2 의 곡률 반경을 갖는 빔으로 전달시킨다. 따라서 입사 빔과 렌즈에 의하여 형성된 빔 사이의 관계는 가우시안 빔에 관한 식

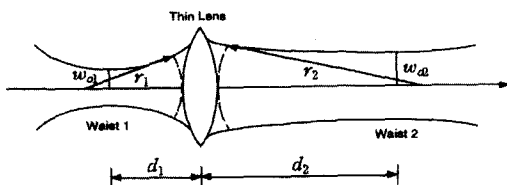


그림 2. 얇은 렌즈에 의한 빔 허리
Fig. 2. Schematic illustration for transformation of Gaussian beam waists by thin lens.

(2), (3)과 얇은 렌즈 근사로부터 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\left(\frac{w_{02}}{w_{01}} \right)^2 = \frac{1}{\left(\frac{d_1}{f} - 1 \right)^2 + \left(\frac{\pi w_{01}^2}{f \lambda} \right)^2} \quad (5)$$

$$\frac{d_2}{f} = 1 + \frac{\frac{d_1}{f} - 1}{\left(\frac{d_1}{f} - 1 \right)^2 + \left(\frac{\pi w_{01}^2}{f \lambda} \right)^2} \quad (6)$$

여기서 렌즈에 의해 형성된 가우시안 빔 허리의 위치는 식 (6)의 오른쪽 두 번째 항에서 본도의 2번째 항 때문에 일반적인 기하광학과는 다르게 해석되는 경우가 있다. 즉 일반적인 기하광학에서는 입사 빔의 빔 허리(w_{01})로부터 렌즈까지의 거리(d_1)가 증가함에 따라 렌즈로부터 렌즈에 의해 형성된 또 다른 빔 허리(w_{02})까지 거리(d_2)는 반비례 관계가 있다. 그러나 가우시안 빔은 기하광학에 비해 파장이 길어서 어떤 특정 영역에서는 비례하여 증가하는 전송특성이 나타나게 된다. 따라서 렌즈를 이용하여 준광학계를 설계할 때는 기하광학 해석과 일치하도록 빔 변수 또는 초점길이를 적절히 조정하여야 한다. 매우 특수한 가우시안 빔의 전송특성으로서, 입사 빔의 빔 허리(w_{01})로부터 초점렌즈까지의 거리(d_1)가 초점길이(f)와 같아지면 렌즈에 의하여 형성된 빔의 빔 허리(w_{02})는 초점길이만큼 떨어진 곳에 위치하게 된다. 이 때 초점길이는 특성 초점길이라고 정의되고 다음 식으로 주어진다.

$$f_0 = \frac{\pi w_{01} w_{02}}{\lambda} \quad (7)$$

이와 같은 방법을 이용하면 렌즈에 의하여 형성된 빔의 빔 허리 위치는 주파수에 관계없이 일정하게 된다. 따라서 광대역 특성이 요구되는 수신기의 준광학계 설계에 유용하게 쓰인다. 그러나 이러한 경우는 초점길이가 항상 렌즈와 빔 허리사이의 거리와 같아야 한다는 제약이 따른다. 따라서 다음절에서는 준광학계를 구성하는 초점소자들이 설치될 공간과 위치를 자유롭게 선택하면서 주파수에 무관한 빔 설계에 대해서 알아본다.

3. 영상(Image) 빔을 이용한 광대역 주파수의 결합

그림 3과 같이 카세그레인 안테나의 부경에 형성된 빔(w_1, r_1)은 초점길이가 f_1 인 렌즈에 의해서 가우시

안 빔의 영상 (w_i, r_i)으로 형성되며 이러한 영상은 일반적으로 주파수에 따라 위치와 크기가 변하게 된다. 그러나 렌즈의 초점길이와 렌즈가 설치될 위치 및 이들 빔 변수가 특별한 조건을 만족하면 렌즈에 의한 영상 빔 (w_i, r_i)과 부경에 형성된 빔 (w_1, r_1)이 주파수에 관계없이 결합될 수 있으므로 이러한 조건을 알아본다^[8]. 우선 [w_i, r_i]에 상응하는 빔 허리(w_o)와 거리(z)는 식 (2)와 (3)으로부터 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$z = r_i \left\{ \frac{1}{1 + \left(\frac{\lambda r_i}{\pi w_i^2} \right)^2} \right\} \quad (8)$$

$$w_o^2 = w_i^2 \left\{ \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi w_i}{\lambda r_i} \right)^2} \right\} \quad (9)$$

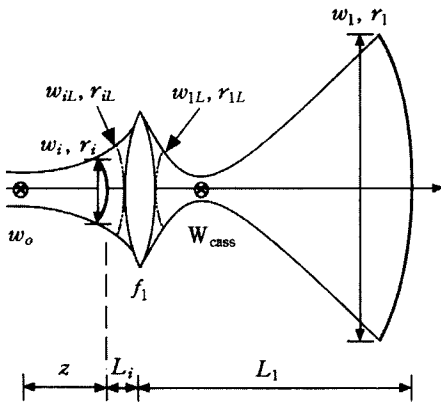


그림 3. 렌즈에 의한 영상

Fig. 3. Gaussian beam image through the lens.

다시 빔 허리로부터 ($z + L_i$)만큼 떨어진 렌즈 면에서의 빔 변수 [w_{iL}, r_{iL}]는 다음과 같이 [w_i, r_i]의 함수로 주어진다.

$$w_{iL}^2 = w_i^2 \left\{ \left(1 + \frac{L_i}{r_i} \right)^2 + L_i^2 \left(\frac{\lambda}{\pi w_i^2} \right)^2 \right\} \quad (10)$$

$$\frac{1}{r_{iL}} = \frac{1}{L_i} - \frac{\frac{1}{r_i} + \frac{1}{L_i}}{\left(1 + \frac{L_i}{r_i} \right)^2 + L_i^2 \left(\frac{\lambda}{\pi w_i^2} \right)^2} \quad (11)$$

같은 방법으로 반대편 렌즈 면에서의 빔 변수를 구해보면,

$$w_{1L}^2 = w_1^2 \left[\left(1 + \frac{L_1}{r_1} \right)^2 + L_1^2 \left(\frac{\lambda}{\pi w_1^2} \right)^2 \right] \quad (12)$$

$$\frac{1}{r_{1L}} = \frac{1}{L_1} - \frac{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{L_1}}{\left(1 + \frac{L_1}{r_1} \right)^2 + L_1^2 \left(\frac{\lambda}{\pi w_1^2} \right)^2} \quad (13)$$

가 된다. 얇은 렌즈 근사로부터 [w_{iL}, r_{iL}]와 [w_{1L}, r_{1L}]는 초점길이가 f_1 인 렌즈에 의해서 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$w_{iL} = w_{1L} \quad (14)$$

$$\frac{1}{r_{iL}} + \frac{1}{r_{1L}} = \frac{1}{f_1} \quad (15)$$

마지막으로 식 (10)-(13)을 식 (14)와 (15)에 대입하여 정리하면, 부경의 빔과 렌즈에 의하여 형성된 영상 빔이 주파수에 무관하게 결합될 조건은 다음과 같이 된다.

$$\frac{1}{L_i} + \frac{1}{L_1} = \frac{1}{f_1} \quad (16)$$

$$\frac{w_i}{w_1} = \frac{L_i}{L_1} \quad (17)$$

$$\frac{1}{r_1} = \frac{1}{L_1} \left[1 + \frac{L_i}{L_1} \left(1 + \frac{L_i}{r_i} \right) \right] \quad (18)$$

따라서 식 (16)-(17)은 광대역의 주파수 범위를 갖는 준광학계 설계에 적용되는 방법을 표현하는 수식으로서, 두 개 이상의 초점 소자로 이루어진 경우에도 유용하게 사용된다.

III. 준광학계의 설계

1. 안테나의 부경과 피드 혼의 빔 변수 결정

카세그레인 안테나에 형성된 빔이 여러 가지 초점소자로 구성된 준광학계를 거쳐서 전송되어, 최종적으로 믹서의 입력단에 연결된 피드 혼에 손실이 최소화 되도록 빔을 결합시키는 것이 준광학계 설계의 목적이다. 따라서 수신기용 준광학계를 설계하기 위해서는 우선 안테나와 피드 혼의 빔 변수가 결정되어야 한다.

카세그레인 안테나의 부경 중심과 가장자리에서의 전력 비로 정의되는 에지테이퍼(Edge taper: T_E)는 다음과 같이 표현되며, 부경에서의 빔 반경은 다음 식으로 결정된다^[9].

$$T_E(\text{dB}) = 8.686 \left(\frac{a}{w_1} \right)^2 \quad (19)$$

여기서 a 는 카세그레인 안테나 부경의 반경, w_1 은 부경에서의 빔 반경이다. 안테나의 빔 효율(Beam efficiency), 넘침 손실(Spillover loss)과 구경 효율(Aperture efficiency) 등을 고려해서 에지테이퍼가 결정된다. 이러한 효율과 손실을 고려하여 안테나의 에지테이퍼는 일반적으로 11-15dB 범위 내로 한다^[4, 7]. 그러므로 에지테이퍼가 결정되면 부경에서의 빔 변수인 빔 반경은 식 (19)에 의해서 결정된다. 부경은 카세그레인 안테나 초점으로부터 멀리 떨어져 있기 때문에, 부경에서의 또 하나의 빔 변수인 곡률 반경은 안테나 부경의 정점(Vertex)에서 카세그레인 안테나 초점까지의 거리로 주어진다.

일반적으로 피드 혼의 빔 변수는 혼 개구면의 반경과 사면 길이(Slant length)로부터 결정된다. 즉 피드 혼 개구면에서 형성되는 가우시안 빔의 기본모드 대한 출력은 $w_h/a_h=0.6435$ 일 때, 최대의 세기를 갖는다^[10]. 여기서 w_h 는 혼 개구면에서의 빔 반경이고, a_h 는 혼 개구면의 반경이다. 그러므로 혼의 제원이 결정되면 혼의 빔 변수인 혼 개구면에서 형성되는 빔 반경을 결정할 수 있다. 피드 혼의 복사 특성을 결정짓는 개구면의 위상오차(Aperture phase error) Δ 는 피드 혼의 꼭지점으로부터 개구면의 중심까지의 거리와 꼭지점으로부터 개구면의 가장자리까지의 거리차로서 정의된다^[11]. 그리고 피드 혼이 형성하는 각이 작으면 혼의 사면 길이(Slant length) R 은 다음과 같이 기술될 수 있다.

$$\Delta \approx \frac{a_h^2}{2\lambda R}. \quad (20)$$

그러므로 혼의 반경이 결정되면 혼의 빔 변수의 하나인 곡률 반경이 혼의 사면 길이와 동일하므로 식 (20)을 이용하여 결정할 수 있다^[11, 12]. 개구면의 위상오차가 0.3 이하가 되면 피드 혼의 빔 효율 특성이 우수하며, 혼의 복사 패턴도 가우시안 형태를 나타낸다^[10]. 이러한 점을 고려하여 설계하고자 하는 혼의 제원에 따른 위상 개구면의 위상오차는 약 0.2가 되도록 하였다.

2. 이중채널 수신기의 광대역용 준광학계 설계

이중채널 수신기는 두 대역의 전파를 동시에 관측하기 때문에 준광학계 설계에 상당히 많은 제약 조건이 따른다. 따라서 준광학계를 설계하기 전에 몇 가지 사항을 검토하여야 한다. 첫째, 카세그레인 안테나 초점

에 모아진 빔은 빔 분할기에 의하여 두 개로 나뉘어져 각각의 준광학계를 거쳐 100GHz 대역의 피드 혼과 150GHz 대역의 피드 혼으로 전송된다. 그러므로 각 대역의 준광학계를 구성하는 부품들이 서로 간섭을 받지 않도록 설치되어야 하므로 이들이 설치될 위치와 크기를 고려하여야 한다. 둘째, 각 대역에 사용되는 믹서는 초전도체 소자를 이용한 믹서이므로 냉각기에서 온도가 가장 낮은 부분에 반드시 설치되어야 한다. 마지막으로 각 대역에는 각각의 단측파대 여파기(Single side band filter)를 설치하여야 하므로 이를 통과하는 빔의 경로도 고려해야 한다. 이러한 점들을 고려하여 본 연구의 준광학계는 안테나에 설치될 수신기의 크기와 수신기가 설치될 위치를 고려하여 두 개의 초점소자를 사용하기로 결정하였다. 안테나의 부경으로부터 전송된 빔이 카세그레인 초점을 통과한 후에는 확산되므로 확산된 빔을 다시 모아주고 빔의 방향을 전환시키기 위해서 첫 번째 초점소자로는 타원면경(Ellipsoidal mirror)을 이용하였다. 두 번째 초점소자인 유전체 렌즈(Dielectric lens)를 이용하여 두 초점소자 사이의 공간을 확보시켜서 이미지 신호를 제거하기 위한 단측파대 여파기를 설치할 수 있도록 하였다^[13]. 최종적으로 준광학계를 거쳐 전송된 빔이 피드 혼과의 최적 결합이 되도록 하였다. 설계하고자 하는 100GHz 대역과 150GHz 대역의 준광학계에서 실제로 빔 변수에 영향을 미치는 것은 두 개의 초점소자인 유전체 렌즈와 타원면경뿐이므로 설계하고자 하는 준광학계는 타원면경을 렌즈로 등가화 시켜 그림 4와 같이 간단히 나타낼 수 있다. 그리고 100GHz 대역 준광학계와 150GHz 대역 준광학계는 같은 방법으로 설계하였다. 그림 4와 같이 두 렌즈를 포함하는 준광학계의 설계 절차는 다음과 같다.

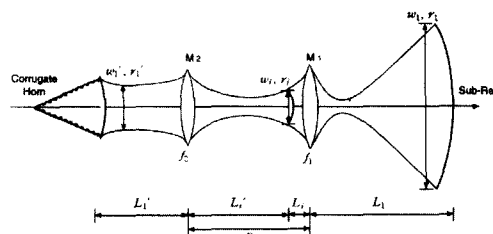


그림 4. 두 개의 초점소자에 의한 가우시안 빔
Fig. 4. Transformation of Gaussian beam by two thin lenses.

안테나의 효율과 넘침 손실을 고려하여 안테나의 에

지테이퍼는 12.5dB로 결정하였다. 따라서 부경의 직경은 1086mm이므로 부경에서의 빔 반경(w_1)은 식 (19)로부터 451.37mm가 된다. 카세그레인 초점에서 부경의 정점까지의 거리가 4238mm이므로 부경에서의 곡률 반경(r_1)은 이 값과 같다. 그림 4에 제시한 바와 같이 앞에서 결정된 부경에서의 빔 변수 [w_1, r_1]이 초점길이가 f_1 인 타원면경을 통해서 주파수에 무관한 영상 빔 [w_i, r_i]으로 형성되기 위한 조건은 식 (16)-(18)로부터 결정된다. 마찬가지로 이렇게 형성된 영상 빔은 다시 초점길이가 f_2 인 유전체 렌즈를 통해서 주파수에 무관한 새로운 영상 빔 [w_i', r_i']으로 맺히게될 조건도 식 (16)-(18)로부터 결정된다. 이 마지막 영상 빔 변수와 피드 혼의 빔 변수가 일치될 때 최대의 가우시안 빔 결합효율을 갖게된다. 따라서 유전체 렌즈에 의하여 형성된 주파수에 무관한 영상 빔 변수를 혼의 빔 변수로 대치시켜 최종적으로 준광학계를 설계한 후 이 빔 변수를 이용하여 피드 혼의 제원을 결정하면 된다. 이와 달리 먼저 적절한 혼의 제원을 결정하고 그 제원에 의하여 앞 절에서 검토한 바와 같은 혼의 빔 변수를 결정할 수도 있다. 그리고 이러한 혼의 빔 변수가 렌즈에 의하여 형성된 주파수에 무관한 영상 빔 변수와 일치하도록 준광학계의 변수를 결정하면 된다. 따라서 본 연구에서는 부경의 빔 변수와 각 대역의 피드 혼에 대한 빔 변수를 먼저 결정하여 초기 값으로 지정하고, 이 값들로부터 초점 소자들의 초점길이를 이들이 설치될 위치를 구한다. 다시 렌즈에 의하여 형성된 영상 빔의 변수와 피드 혼의 빔 변수를 확인하고, 앞서 언급된 준광학계를 설계할 때 고려되어야할 사항들을 검토하는 일련의 반복적 방법을 통하여 최적 값을 찾는 방법으로 준광학계를 설계하였다. 이러한 준광학계를 설계하는 알고리즘은 자체 개발하여 준광학계 설계에 활용하였다. 최종적으로 100GHz 대역과 150GHz 대역의 광대역 우주전파를 수신하기 위하여 설계된 각각의 준광학계 초점소자에 대한 초점길이를 설치될 위치는 표 1에 나타났다. 그리고 안테나 부경과 각각의 피드 혼에서의 빔 변수는 표 2에 제시하였다. 표 2에서 w_h 와 r_h 는 피드 혼 개구면에서의 빔 반경과 곡률 반경을 나타내며, w_1 과 r_1 은 카세그레인 안테나 부경에서의 빔 반경과 곡률 반경을 나타낸다. 피드 혼의 빔 변수가 준광학계의 초

점소자인 유전체 렌즈와 타원면경을 거쳐 안테나 부경에 형성된 빔은 표 1과 표 2에 제시한 바와 같이 100GHz 대역은 물론 150GHz대역에서도 빔 변수와 그 위치가 주파수에 무관하게 일정하게 나타났다. 이것은 설계된 준광학계가 주파수에 무관한 빔 반경의 크기로 형성되므로, 일정한 안테나 에지테이퍼가 유지되어 설계된 준광학계가 광대역 수신기 시스템에 적합함을 확인하였다. 준광학계 설계를 통해서 확정된 이중 채널 수신기용 준광학계를 구성하는 초점소자의 초점길이를와 빔 변수는 표 3에 제시하였으며, 이들 빔 변수는 초점소자를 제작하는데 사용된다. 그림 5는 이들 변수들을 바탕으로 최종적으로 설계된 이중채널 수신기용 준광학계의 전체 도면이다.

표 1. 초점소자의 초점길이를와 설치될 위치

Table 1. The positions and the focal lengths of focus elements.

unit: mm					
Frequency band	L_1	D	L_1'	f_1	f_2
100GHz-band	4718	867	143.6	279.13	114.72
150GHz-band	4665	1065	131.5	280.99	112.20

표 2. 부경과 피드 혼에서의 빔 변수

Table 2. The beam parameters of the feed horn and the sub-reflector as a function of frequency.

unit: mm				
Frequency band	Frequency	$w_h(r_h)$	$w_1(r_1)$	T_E (dB)
100GHz band	85GHz	7.147(125.45)	451.37(4238)	12.5
	100GHz	7.147(125.45)	451.37(4238)	12.5
	115GHz	7.147(125.45)	451.37(4238)	12.5
150GHz band	125GHz	4.965(76.79)	451.39(4238)	12.5
	150GHz	4.965(76.79)	451.39(4238)	12.5
	175GHz	4.965(76.79)	451.39(4238)	12.5

표 3a. 100GHz 대역 초점소자들의 특성

Table 3a. The characteristics of focusing elements for 100GHz band.

unit: mm				
Focusing element	Focal length	Radius of curvature		Beam radius
Ellipsoidal mirror	279.13	RI(input)	496.35	52.09
		RO(output)	637.83	
Dielectric lens	114.72	RI(input)	331.18	24.55
		RO(output)	175.51	

표 3b. 150GHz 대역 초점소자들의 특성
Table 3b. The characteristics of focusing elements for 150GHz band

unit: mm				
Focusing element	Focal length	Radius of curvature	Beam radius	
Ellipsoidal mirror	280.99	RI(input)	435.09	45.95
		RO(output)	793.35	
Dielectric lens	112.20	RI(input)	416.82	21.56
		RO(output)	153.52	

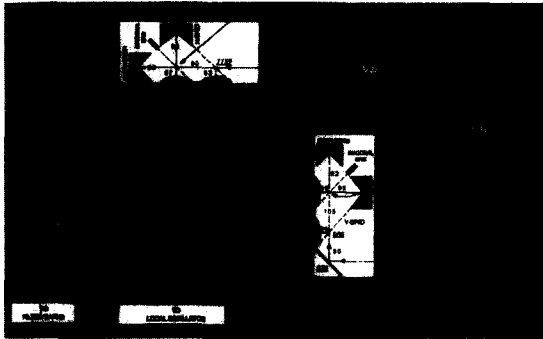


그림 5. 설계된 이중채널 수신기용 준광학계
Fig. 5. The layout of quasi-optical system for dual channel receiver.

IV. 제작

1. 소자

준광학계를 구성하는 준광학 소자는 다음과 같이 구성되어 있다. 우선 카세그레인 초점 근처에서 빔을 두 개의 편파성분, 즉 수평편파와 수직편파로 나누어 100GHz와 150GHz 대역으로 빔을 유도해 주는 빔 분할기와 카세그레인 초점을 통과한 빔이 진행되는 동안 확산된 것을 다시 모아주고 빔의 방향을 바꾸어주기 위한 타원면경이 있다. 헤테로다인 수신기를 사용함으로써 야기되는 이미지 성분을 제거하기 위한 단측파대 여파기가 있으며, 이러한 단측파대 여파기를 경유하여 다시 퍼진 빔을 모아주고 피드 혼과의 빔 결합을 고려한 유전체 렌즈가 있다. 마지막으로 가우시안 빔을 믹서로 전달하기 위한 컬리게이트 피드 혼이 있다. 이 외에 빔의 방향을 바꾸어 주기 위한 평면경(Flat mirror)이 사용되었다. 준광학계를 구성하는 각 소자의 제작 방법과 그 특성은 참고문헌^[14]에 언급되어 있으므로 여기서는 언급하지 않았다.

2. 설치

준광학계의 성능을 결정하는 요인 중에서 준광학 소자들의 개별적인 특성 못지 않게 중요한 것은 소자들의 정확한 설치와 소자들 사이를 진행하는 빔의 진행축에 대한 정렬(Alignment)이다. 본 시스템에서 빔이 진행되는 축은 수신기가 설치될 기준면으로부터 178mm인 점을 고려하여 빔 분할기나 타원면경, 그리고 렌즈 등은 각각의 지지대와 프레임을 두었다. 이들 지지대와 프레임은 가능한 두껍고 넓게 제작하여 기준면에 대해서 직각이 유지되고 또한 변형이 되지 않도록 하였다. 그리고 이러한 소자들을 정확히 설치하기 위하여 피드 혼을 제외한 모든 준광학 부품들이 모두 설치될 수 있는 10mm 두께의 알루미늄 판을 두어, 이 판 위에 준광학계 소자들이 설치될 위치를 직접 제도한 후 각 소자들을 설치하였다. 그리고 각 소자들의 바닥에는 가이드 핀(Guide pin)을 두어서 볼트에 의한 밀림이나, 다시 설치할 때 생기는 설치오차가 생기지 않도록 하였다. 이러한 준광학계 판은 두 개의 홈을 만들어 이중채널 수신기 듀어와 맞물리는 구조로 제작하여 수신기 피드 혼과의 빔 축 정렬이 용이하고 설치오차가 최소가 되도록 하였다. 각 준광학계 구성부품을 제작하여 설치한 이중채널 수신기용 준광학계의 모습은 사진 1에 제시하였다.

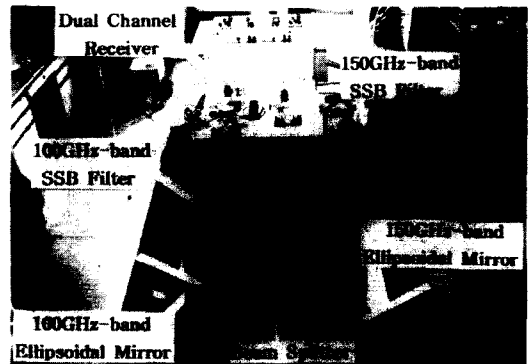


사진 1. 제작된 이중채널 수신기용 준광학계
Pic. 1. The quasi-optical system for dual channel receiver.

V. 측정 및 결과

1. 측정 시스템

준광학계 소자 및 시스템을 측정하기 위해서 자체에서 제작한 빔 측정장치는 XYZ의 3축으로 움직일 수 있는 구동부와 구동부 위에 설치되어 전파의 세기를

측정하는 수신부, 그리고 구동부를 제어하고 수신부로 부터 자료를 받아들이는 컴퓨터부로 구성되어 있다. 송신은 Gunn 발진기, 주파수 체배기와 발진 주파수를 모니터할 수 있는 주파수 카운터로 구성되어 있다. 구동부와 연결된 모니터를 통해서 3축의 위치를 알 수 있고, 이것은 컴퓨터와 연결되어 자동 제어된다. 최소 0.01mm 간격으로 250mm(X축) × 250mm(Y축)의 면에 대한 빔 패턴 측정도 가능하다. 수신부에서는 100GHz 대역을 측정하기 위해서 W 밴드 검출기(Detector)가 사용되고, 150GHz 대역에 대해서는 D 밴드의 검출기가 사용된다. 각 주파수 대역 검출기에는 도파관을 두고, 이 도파관의 전단에는 유전체 봉(Dielectric rod)을 두었다^[15]. 검출기에서 DC로 바뀐 신호는 자체에서 제작된 DVM(Digital volt meter)으로 전달되어 다시 증폭된 후 위치정보와 함께 컴퓨터에 저장된다.

마지막으로 컴퓨터부에서는 XY 빔 패턴에 대한 공간 분해능과 측정할 전체 넓이를 지정함으로써 원하는 빔의 진행방향에 수직한 빔의 분포를 측정할 수 있다. 마찬가지로 X축 또는 Y축 중에서 한 개를 선택하여 측정함으로써 준광학계에서 기술되는 가우시안 빔의 수평성분과 수직성분을 측정할 수 있다. 제작된 빔 측정 장치와 측정될 준광학계 시스템은 사진 2에 제시하였다.

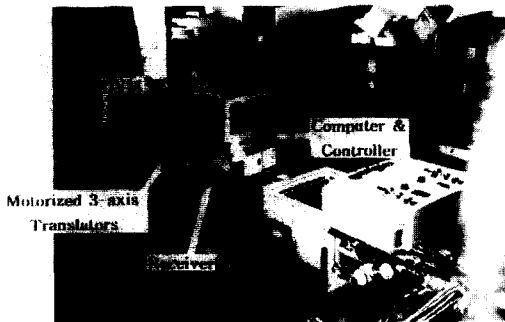


사진 2. 빔 측정장치를 이용한 준광학계의 측정
Pic. 2. The measurement for the quasioptical system using the beam measurement system.

2. 배열

수신기가 설치될 기준면에 대한 피드 혼의 수평배열은 혼의 개구각(Opening angle)과 같은 각을 갖는 원뿔형의 혼 얼라이너(Horn aligner)를 제작하여 사용하였다. 기준면에 대해서 수평이 이루어진 피드 혼과 렌즈의 중심 축을 맞추기 위해서 레이저 빔(Laser

beam)을 이용하였다. 피드 혼과 유전체 렌즈에 이어 다음에 놓일 단축파대 여파기는 사선 그리드(Diagonal grid)와 수평 혹은 수직 그리드, 그리고 고정 직각면경과 이동 직각면경으로 구성되어 있다. 따라서 빔이 이러한 소자들을 통과할 때, 소자들의 지면에 대한 직각도와 소자들의 정확하지 못한 배열이 원인이 되어 빔 손실이 발생한다. 이러한 손실을 줄이기 위해서 앞서 기술된 준광학 판과 같이 여파기의 밑판에 직각면경과 각종 그리드가 설치될 위치와 각도를 정밀 가공기를 이용하여 제도한 후 설치하였다. 100GHz와 150GHz 대역용 각각의 타원면경과 빔 분할기, 그리고 빔의 방향전환에 사용되는 평면경은 이미 제도된 준광학 판에 설치된다. 이렇게 피드 혼으로부터 카세그레인 초점 근처의 빔 분할기에 이르는 모든 준광학 소자들이 설치되면, 레이저 빔을 이용하여 준광학 소자들의 빔 축을 맞춘다. 그리고 미세 조정을 위하여 피드 혼에서 전파를 송신하고, 카세그레인 초점 근처에 빔 측정장치를 설치한 후, 빔을 측정하여 중심 축을 확인하는 방법으로 준광학계의 모든 소자들에 대한 배열을 최종적으로 점검한다.

3. 측정 및 결과

카세그레인 안테나 초점에서 안테나의 부경까지의 거리가 4238mm이고, 안테나 부경에서의 직경도 1086mm 정도가 되어, 부경을 포함한 준광학계의 성능측정은 실제적으로 매우 어렵다. 그러나 안테나 부경에서의 빔은 카세그레인 초점으로 진행되어 가장 작은 가우시안 빔의 크기로 형성되므로 비교적 작은 빔 측정 장치를 이용하여도 빔 반경과 빔 분포 측정이 용이하게 된다. 따라서 카세그레인 안테나 초점 부근에서 빔 반경과 빔 분포를 측정하면 간접적으로 전체적인 준광학계 시스템의 성능을 검증할 수 있다. 따라서 제작된 준광학계의 성능 측정은 카세그레인 안테나 초점 부근에서 빔 반경과 빔 분포를 측정하여 이론치와 비교하였다.

우선 설계된 준광학계의 카세그레인 초점 부근에서 진행되는 빔이 가우시안 분포를 갖는지 여부와 초점에서 가장 작은 빔 크기, 즉 빔 허리가 형성되는지를 확인하였다. 그림 6은 카세그레인 초점을 기준으로 빔 분할기 방향으로 60mm, 그 반대 방향인 부경 쪽으로 150mm(그림에서는 -로 표시)까지 측정된 100GHz 전파의 전기장 분포이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 전파가 진행하는 방향에 대해서 위치에 따른 수

직한 전기장의 분포는 가우시안 분포를 나타냈으며, 또한 카세그레인 초점에서 빔 반경이 가장 작은 빔 허리가 형성되어 이론과 잘 일치함을 알 수 있다. 150 GHz 대역에 대한 측정 결과도 100GHz 대역과 마찬가지로의 결과를 보였으나 결과는 제시하지 않았다.

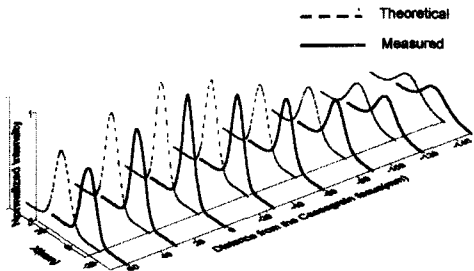


그림 6. 카세그레인 근처에서 진행방향에 수직한 전기장의 가우시안 분포
 Fig. 6. Gaussian distribution of field transverse to its axis of propagation near Cassegrain focus.

제작된 이중채널 수신기 준광학계의 전체적인 성능을 검증하기 위하여 빔이 진행되는 방향에 수직한 전기장의 분포와 빔이 진행되면서 변화되는 빔 반경의 변화를 측정하였다. 우선 86GHz, 100GHz, 112GHz와 125GHz, 150GHz, 165GHz의 각각 두 대역 주파수들에 대한 초점부근에서의 가우시안 빔의 전기장 분포를 35mm×35mm의 영역에 대해서 1mm 간격으로 측정하였으며 측정된 결과는 그림 7과 그림 8에 각각 나타났다. 150GHz 대역은 100GHz 대역에 비해서 빔의 크기가 작기 때문에 보다 정밀한 소자들의 설치와 정렬이 요구된다. 따라서 세심한 정렬과 그에 따른 측정을 반복적으로 수행하여 측정오차가 최소가 되도록 하였다. 두 그림에서 이론적인 가우시안 빔 반경을 나타내는 -8.686dB(1/e)는 굵은 실선으로 표시하였고, 이에 해당하는 측정된 -8.686dB는 점선으로 나타내었다. 그리고 측정된 나머지 준위는 실선으로 표시되어 -20dB를 넘는 준위의 분포까지를 볼 수 있다. 125GHz 주파수를 제외한 두 대역의 주파수에 대한 가우시안 빔의 분포는 이론치와 측정치와의 차이가 최대 1mm 이하가 되는 우수한 특성을 보였다. 그러나 125GHz에서 이론치와 측정치가 약 2mm 정도의 차이가 발생한 것은 다음에 언급될 준광학계를 구성하는 초점소자의 주파수 의존성에서 비롯되는 것으로 여겨진다. 이상적인 준광학계의 빔 분포는 원모양으로 형성되지만 측정된 빔 분포가 약간 타원모양을 보인 것

은 준광학 소자들의 특성과 더불어 소자들이 빔 축에 대해서 정확히 정렬되지 않아 발생하는 것으로 판단된다. 따라서 이상적인 특성을 얻기 위해서는 보다 정확한 정렬이 요구된다.

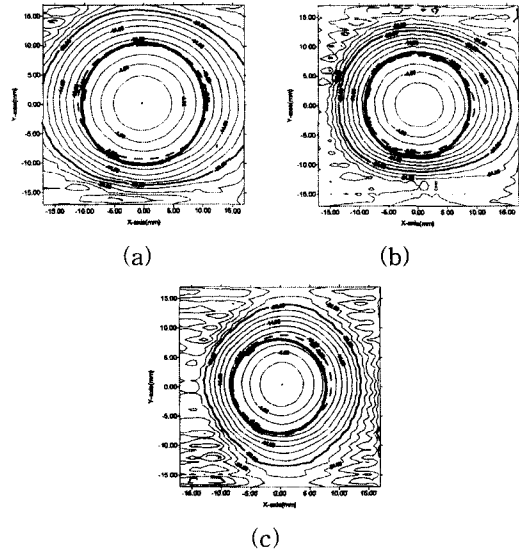


그림 7. 100GHz 대역 전파의 진행방향에 수직한 전기장의 분포 (a)86GHz, (b)100GHz, (c)112GHz
 Fig. 7. Maps of the fields transverse to their axis of propagation for 100GHz band. (a)86GHz, (b)100GHz, (c)112GHz.

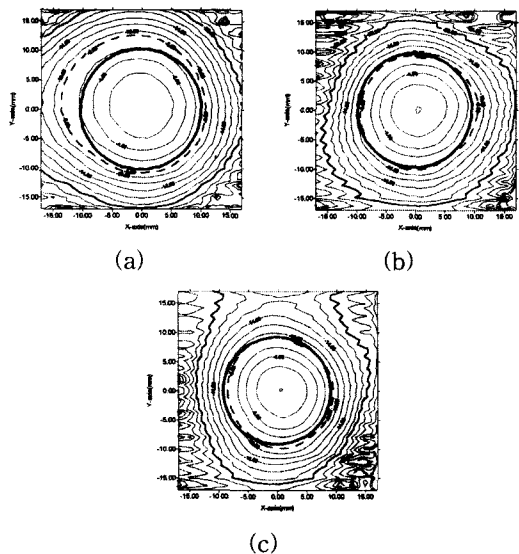


그림 8. 150GHz 대역 전파의 진행방향에 수직한 전기장의 분포 (a)125GHz, (b)150GHz, (c)165GHz
 Fig. 8. Maps of the fields transverse to their axis of propagation for 150GHz band. (a)125GHz, (b)150GHz, (c)165GHz.

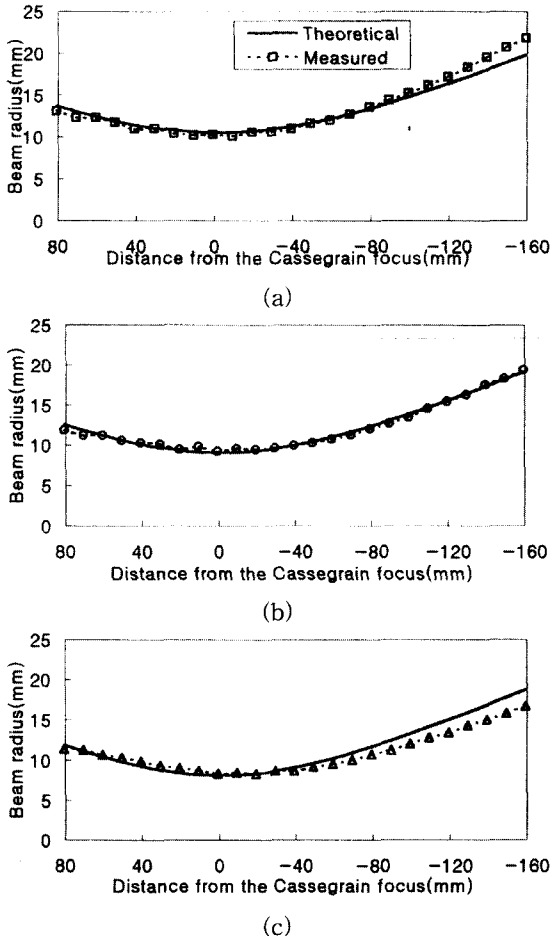


그림 9. 카세그레인 초점근처에서 빔의 진행방향에 따라서 측정된 빔 반경 (a)86GHz, (b)100GHz, (c)112GHz
 Fig. 9. Beam radii along the axis of propagation near the Cassegrain focus. (a)86GHz, (b)100GHz, (c)112GHz.

다음으로 이루어진 측정은 카세그레인 초점을 기준으로 전방과 후방으로 진행되는 가우시안 빔 반경의 변화를 측정하여 이론치와 비교하여 보았다. 100GHz 대역은 카세그레인 초점을 기준으로 빔 분할기의 방향으로 80mm, 그 반대 방향인 부경 쪽으로 160mm(그림에서는 -로 표시)까지, 10mm 간격으로 빔 반경을 측정하여 그림 9에 나타났다. 150GHz 대역도 같은 방법으로 측정하였으나 측정 범위는 측정의 제약으로 인하여 10mm 간격으로 30mm에서 부경 쪽으로 150mm까지만 측정하여 그 결과는 그림 10에 제시하였다. 86GHz, 100GHz, 112GHz와 125GHz, 150GHz, 165GHz에서 측정된 결과는 그림에서 네모, 동그라미, 그리고 세모의 심벌로 표시하였고, 각각에

대한 이론치는 실선으로 표시하였다. 그리고 두 대역에 대한 카세그레인 초점에서의 이론치와 측정치의 빔 반경은 표 4에 제시하였다.

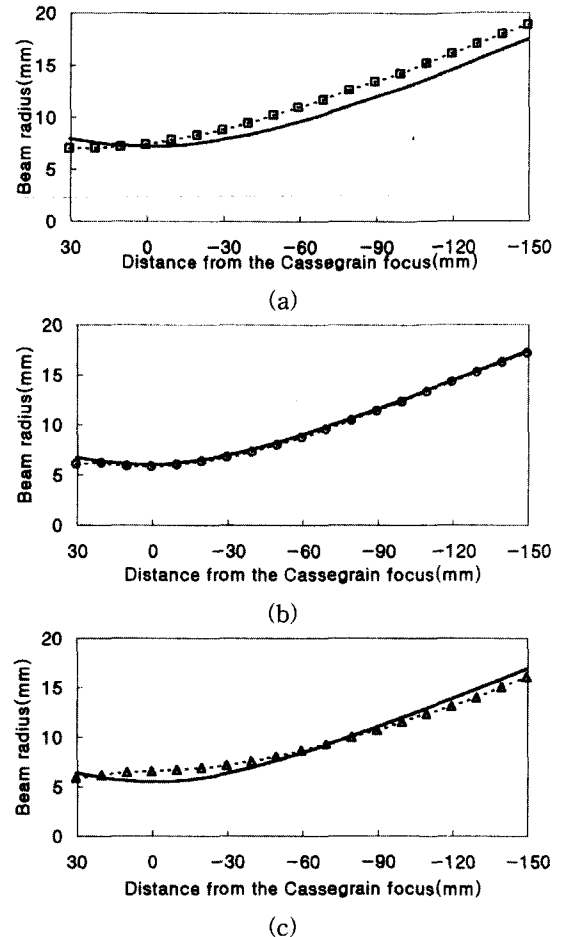


그림 10. 카세그레인 초점근처에서 빔의 진행방향에 따라서 측정된 빔 반경 (a)125GHz, (b)150GHz, (c)165GHz
 Fig. 10. Beam radii along the axis of propagation near the Cassegrain focus. (a)125GHz, (b)150GHz, (c)165GHz.

표 4. 카세그레인 초점에서의 빔 반경
 Table 4. Beam radii at a Cassegrain focus.

unit: mm			
Frequency band	Frequency	Theoretical value	Measured value
100GHz band	86GHz	10.42	10.13
	100GHz	8.96	9.11
	112GHz	8.00	8.21
150GHz band	125GHz	7.17	7.35
	150GHz	5.98	5.78
	165GHz	5.43	6.50

표에 제시된 바와 같이 두 대역에 대한 카세그레인 초점에서의 이론치와 측정치에 대한 차이가 최대 1mm 이하가 되는 매우 우수한 특성을 보여 광대역 주파수 범위를 갖는 준광학계의 설계에 대한 타당성이 입증되었다. 카세그레인 초점을 기준으로 진행되는 가우시안 빔 반경은 두 대역의 중심 주파수인 100GHz와 150GHz 대해서는 이론치와 측정치가 거의 일치하는 반면에, 86GHz와 112GHz 및 125GHz와 165GHz에서는 이론치로부터 약간 벗어나는 양상을 띤다. 이것은 준광학계의 초점소자로 사용된 유전체 렌즈나 타원면경이 각 대역의 중심 주파수의 빔 변수로부터 설계된다는 점에 기인하는 것으로 판단된다. 따라서 본 시스템의 준광학계 설계에 적용된 영상 빔 방법은 비교적 광대역 주파수에 적합한 방법으로 여겨지고 있으나, 측정 결과에 의하면 주파수의 의존성을 갖는 초점소자의 제작에서 비롯된 이러한 오차는 피하기 어렵다. 따라서 허용되는 오차 범위 내에서 수신기의 사용 주파수 범위의 선택이 이루어져야 하며, 주파수 의존성이 적은 광대역용 준광학계 초점소자에 대한 연구가 수행되어야 한다고 생각된다.

VI. 결 론

광대역 우주전파 수신기의 준광학계 설계에 이용되는 가우시안 광학의 기본 이론을 소개하고, 광학의 얇은 렌즈 식을 이용하여 가우시안 빔과 초점소자 사이의 관계를 정리하였다. 정리된 결과를 활용하여 광대역 수신기에 적합한 주파수의 의존성이 없는 준광학계 설계 이론을 제시하였다. 제시된 이론을 바탕으로 100/150GHz 대역용 초전도 소자를 이용한 이중채널 수신기의 준광학계를 설계, 제작하고 그 성능을 측정하여 이론치와 비교하였다.

두 대역의 주파수 중에서 86GHz, 100GHz, 112GHz와 125GHz, 150GHz, 165GHz에서 준광학계의 성능 측정을 하였다. 카세그레인 초점 부근에서 빔 패턴을 측정하고, 이 위치를 중심으로 전파가 진행하는 방향으로 각 지점에서의 빔 반경을 얻었다. 가우시안 빔이 가우시안 분포를 유지하며 진행된다는 이론적 특성은 측정을 통해서 확인하였다. 두 주파수 대역의 중심 주파수인 100GHz와 150GHz에서 측정된 빔 반경은 이론치와 거의 일치하는 우수한 특성을 보였다. 그러나 가장자리 주파수에서 측정된 결과는 이론치와

최대 2mm 정도 벗어나는 양상을 보였다. 이것은 준광학계를 구성하는 초점소자들이 중심주파수의 빔 변수를 이용하여 설계, 제작되었기 때문에 가장자리 주파수에 대한 초점소자의 주파수 의존성에 의하여 빔 특성이 변화되는 특성이 나타났다.

본 시스템의 준광학계 설계에 적용된 영상 빔 방법은 비교적 광대역 주파수에 적합한 방법으로 여겨지고 있으나, 측정 결과에 의하면 주파수의 의존성이 큰 각 초점소자의 제작에서 비롯된 이러한 오차는 피하기 어렵다. 따라서 허용되는 오차 범위 내에서 수신기의 사용 주파수 범위의 선택이 이루어져야 한다. 이러한 측정결과와 더불어, 제작된 100/150GHz 대역용 준광학계는 실제로 이중채널 수신기에 설치되어 두 대역의 우주전파를 해당 주파수 영역에서 성공적으로 관측함으로써 초점소자의 주파수 의존성에 의한 빔의 특성 변화가 수신기 시스템에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다. 50"(100GHz의 경우)의 공간 분해능을 갖는 본 안테나 시스템으로 관측해 본 결과, 두 대역 사이의 안테나 지향 편차는 3"가되어 동시관측이 가능한 우수한 성능을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] H. Kogelnik and T. Li, "Laser beam and resonators", *Proc. IEEE*, vol. 54, no. 10, pp. 1312-1329, 1965.
- [2] R. Padman, J. A. Murphy, and R. E. Hills, "Gaussian mode analysis of Cassegrain antenna efficiency", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-35, pp. 1093-1103, 1987.
- [3] N. J. McEwan and P. F. Goldsmith, "Gaussian beam techniques for illuminating reflector antennas", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 37, no. 3, pp. 297-304, 1989.
- [4] J. W. Lamb, "Quasioptical coupling of Gaussian beam systems to large Cassegrain antennas" *Int. J. of Infrared and Millimeter waves*, vol. 7, no. 10, pp. 1511-1536, 1986.
- [5] C. H. Lee, S. T. Han, and Y. S. Park, "A cryogenic two millimeter receiver

- system" *J. of Astron. Space Sci.*, vol. 11, no. 2, pp. 232-249, 1994.
- [6] S. T. Han, C. H. Lee, H. R. Kim, and D. C. Park, "A 100-GHz band heterodyne SIS receiver for the TRAO telescope" *Int. J. of Infrared and Millimeter waves*, vol. 17, no. 1, pp. 105-119, 1996.
- [7] P. F. Goldsmith, "Quasi-optical techniques at millimeter and sub-millimeter wavelengths", in *Infrared and Millimeter Waves*, vol. 6, p. 277, 1982.
- [8] T. S. Chu, "An imaging beam waveguide feed", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-31, no. 4, pp. 614-619, 1983.
- [9] P. F. Goldsmith, "Designing quasi-optical system", *MSDH*, pp. 183-192, 1987.
- [10] R. J. Wylde, "Millimetre-wave Gaussian beam-mode optics and corrugated feed horns", *IEE Proc.*, vol.131, no. 4, pp. 258-262, 1984.
- [11] B. Thomas, "Antenna design notes", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-26, no. 2 pp. 367-372, 1978.
- [12] J. Tuovinen, "Accuracy of a Gaussian beam", *IEEE Trans. Antenna Propagat.*, vol. 40, no. 4, pp. 391-398, 1992.
- [13] 박종애, 한석태, 김태성, 김광동, 김효령, 정현수, 조세형, 양종만, "편파 회전을 이용한 100/150GHz 대역용 단축파대 여파기의 제작 및 성능측정", *전자공학회지*, 제36권, D편, 제2호, pp. 20-30, 1999년 2월
- [14] 박종애, 한석태, 김광동, 김효령, 정현수, 김태성, 이창훈, 조세형, 양종만, "100/150GHz 대역용 이중채널 SIS 수신기의 준광학계 설계", *J. of Astron. Space Sci.*, vol. 14, no. 1, pp. 67-79, 1997
- [15] J. Tuovinen, T. M. Hirvonen, A. V. Raisanen, "Near-field analysis of a thick lens and horn combination: theory and measurements", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 40, no. 6, pp. 613-619, June, 1992.

 저 자 소 개

朴鍾愛(正會員) 第33卷 A編 第4號 參照
현재 이화여자대학교 박사과정

金焯寧(正會員) 第33卷 A編 第4號 參照
현재 대덕전파천문대 선임연구원

韓錫太(正會員) 第36卷 D編 第2號 參照
현재 대덕전파천문대 책임연구원

鄭玄洙(正會員) 第33卷 A編 第4號 參照
현재 대덕전파천문대 선임연구원

金泰成(正會員) 第33卷 A編 第4號 參照
현재 대덕전파천문대 기술원

趙世衡(正會員) 第36卷 D編 第2號 參照
현재 대덕전파천문대 부장

金光東(正會員) 第33卷 A編 第4號 參照
현재 대덕전파천문대 책임연구원

梁鍾萬(正會員) 第36卷 D編 第2號 參照
현재 이화여자대학교 물리학과 교수