

## 100GHz/150GHz 대역용 이중채널 SIS수신기의 준광학계 설계<sup>1</sup>

박종애<sup>2</sup>, 한석태<sup>3</sup>, 김광동<sup>3</sup>, 김효령<sup>3</sup>, 정현수<sup>3</sup>, 김태성<sup>3</sup>, 이창훈<sup>3</sup>, 조세형<sup>3</sup>, 양종만<sup>2</sup>

<sup>2</sup>이화여자대학교 물리학과, <sup>3</sup>천문대, 대덕전파천문대

## THE DESIGN OF QUASI-OPTICS FOR DUAL-CHANNEL SIS RECEIVER

J. A. Park<sup>2</sup>, S. T. Han<sup>3</sup>, G. D. Kim<sup>3</sup>, H. R. Kim<sup>3</sup>,  
H. S. Chung<sup>3</sup>, T. S. Kim<sup>3</sup>, C. H. Lee<sup>3</sup>, S. H. Cho<sup>3</sup> and J. Yang<sup>2</sup>

<sup>2</sup>Dept. of Physics, Ewha Womans University, <sup>3</sup>Korea Astronomy Observatory

e-mail: pja@hanul.issa.re.kr, sthan@hanul.issa.re.kr

(Received April 30, 1997; Accepted May 15, 1997)

### 요 약

100GHz와 150GHz 대역의 두 수신기를 한 개의 냉각기로 운용하여 두 대역을 동시에 관측하기 위한 이중채널 수신기의 준광학계를 설계하였다. 준광학계를 설계하기 위하여 가우시안 빔에 대한 일반적인 해석을 하였다. 이를 이용하여 대덕전파망원경인 카세그레인 안테나의 초점에 형성된 빔이 각 준광학 소자들을 통해서 믹서 전단에 있는 휘드혼에 최적 빔 결합되도록 준광학소자들 사이의 빔 파라미터를 결정하였다.

### ABSTRACT

We have designed the quasi optics of the dual channel receiver to observe the radio sources with 100GHz-band and 150GHz-band simultaneously. We introduced the general quasi optics and the relation between the Gaussian beam and thin lens approximation. We determined the parameters of the quasi optic components to match the beam waist at cassegrain focus with that of feed horn well.

### 1. 서 론

밀리미터파 대역의 전자파를 전송하는 전송선로로 주로 이용되고 있는 도파관은 그 크기가 주파수에 반비례하여 작아지며 전송선로에서 발생하는 전송손실도 증가하여 실제로 원거리를 전송하는

<sup>1</sup>본 연구는 천문대의 광학 및 전파망원경을 활용한 천체분광 관측연구의 일환으로, 일부는 교육부 기초과학연구소 학술연구조성비(BSRI-96-2427)와 한국과학재단 특정연구과제의 지원에 의해 수행되었음.

데 어려운 점이 발생된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 원거리까지 전송 하고자 하는 밀리미터파 및 서브밀리미터파 대역의 전자파 전송수단은 레이저 공진기 이론(Kogelnik & Li 1965)으로부터 비롯된 가우시안 준광학이론(Gaussian quasi-optics)이 매우 광범위하게 활용되고 있다(Tuovinen 1992). 밀리미터파 및 서브밀리미터파 대역의 전파천문학에 이용되고 있는 카세그레인(cassegrain) 안테나는 일반적으로 안테나의 직경에 비해 매우 긴 초점길이를 갖는다. 그러므로 안테나의 주경과 부경에 반사되어 안테나의 초점에 집속된 전자파 빔(beam)의 전송은 가우시안 준광학이론으로 해석된다(Padman 1987, McEwan 1989, Lamb 1986). 따라서 가우시안 준광학이론을 이용하여 안테나의 초점에 집속된 전자파의 빔을 수신기의 휘드혼(feed horn)에 최적 결합되도록 준광학 소자들의 특성을 결정하는 준광학계 설계는 수신기를 제작할 때 가장 우선적으로 수행되어야 한다. 수신기의 준광학계를 구성하는 부품들은 우선 빔을 집속시켜 주는 초점소자와 빔의 경로를 바꾸어주는 평면경이 있으며, 수신기가 헤테로다인(heterodyne) 방식이기 때문에 갖는 이미지 신호를 제거해주는 필터와 빔을 나누어주는 스플리터(splitter) 등이 포함된다.

일반적으로 카세그레인 안테나를 이용해서 우주전파를 관측하는 전파망원경의 수신기용 준광학계의 설계 방법에는 크게 두 가지가 있다. 첫째 안테나의 빔 파라미터와 이 빔 파라미터가 준광학계 시스템으로 전송되어 최종적으로 형성된 가우시안 빔 영상을 이용하여 수신기의 휘드혼과 준광학계 시스템을 설계하는 방법이다(Chu 1983, Padman 1987, Thomas 1978). 이 방법은 준광학계 특성이 주파수의 의존성이 없기 때문에 광대역 수신 시스템에 유리하지만, 많은 제약조건 때문에 적용성이 극히 제한되어 있다는 단점이 있다. 둘째 카세그레인 안테나의 초점에 형성된 빔 허리(beam waist)와 이 빔 허리가 준광학계 시스템으로 전송되어 최종적으로 형성된 가우시안 빔 허리를 이용한 수신기 휘드혼과 준광학계 시스템을 설계하는 방법이 가장 널리 사용되고 있다. 따라서 본 연구에서도 후자의 방법을 이용하여 100GHz/150GHz 대역 이중채널 SIS(Superconductor Insulator Superconductor) 수신기용 준광학계를 설계하였다.

본 논문의 제 2장에서는 이중채널 수신기의 준광학계 설계에 이용되는 준광학계 이론에 대하여 개략적으로 소개하고, 제 3장에서는 준광학이론을 이용한 수신기용 준광학계 설계와 준광학계 소자 설계에 관하여 기술하였다. 마지막 장에서는 결과 및 토의에 관하여 언급하였다.

## 2. 준광학계 이론

### 2.1 가우시안 빔의 전송

자유공간에서의 파동방정식을 전기장  $\Psi$ 에 대해서만 기술하면

$$\nabla^2 \Psi + k^2 \Psi = 0 \quad (1)$$

이 되고,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 이다. 전기장  $\Psi$ 의 시간에 대한 변화는 고려하지 않고  $z$ 축으로 천천히 변하면서 진행되는 전자파를 고려하면

$$\Psi = u(x, y, z) \exp[-ikz] \quad (2)$$

와 같이 된다. 식 (2)를 식 (1)에 대입하고 정리하면,

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - 2ik \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

로 주어진다. 여기서  $u$ 는  $z$ 에 대해서 천천히 변하기 때문에 2차 미분항이 무시되었다. 따라서 전기장에 대한 시간에 따른 변화를 고려하지 않고,  $z$ 축으로 천천히 변하면서 진행되는 전자파를 고려한 식 (3)의 스칼라 파동 방정식의 근사해는 에르미트 다항식(Hermite polynomial), 가우시안 형태의 세기 변화와 위상항의 곱으로 나타내며, 기본 모드만을 고려하면 다음과 같이 표현된다(Kogelnik & Li 1965, Goldsmith 1982).

$$\Psi(x, y, z) = A \frac{w_0}{w(z)} \exp \left[ - \left( \frac{r}{w(z)} \right)^2 \right] \exp \left[ -i \frac{\pi r^2}{\lambda R(z)} \right] \exp \left[ -i \tan^{-1} \left( \frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right) \right] \exp[-ikz] \quad (4)$$

여기서  $\lambda$ 는 신호의 파장,  $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ 이며, 가우시안 빔의 전송 특성은 그림 1에 나타내었다.  $w(z)$ 는 진행되는 방향의 축에 수직한 장의 세기의 변화를 의미하는 것으로, 가우시안 형태를 갖는 장의 세기로부터 1/e되는 지점의 빔 반경을 나타내는 변수가 되어 식 (5)와 같이 표현된다. 또 그 크기가 최소가 되는 빔 반경을  $w_0$ 로 나타내며 빔 허리라고 부른다.

$$w(z) = w_0 \left[ 1 + \left( \frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

빔 허리 부근에서의 빔의 파면(wave front)은 평면이 되지만, 빔 허리로부터 충분히 떨어진 거리에서의 파면은 구면파(spherical wave)가 된다. 이 구면파는 빔의 곡률 반경(radius of curvature)  $R(z)$ 로 나타내며 다음과 같다.

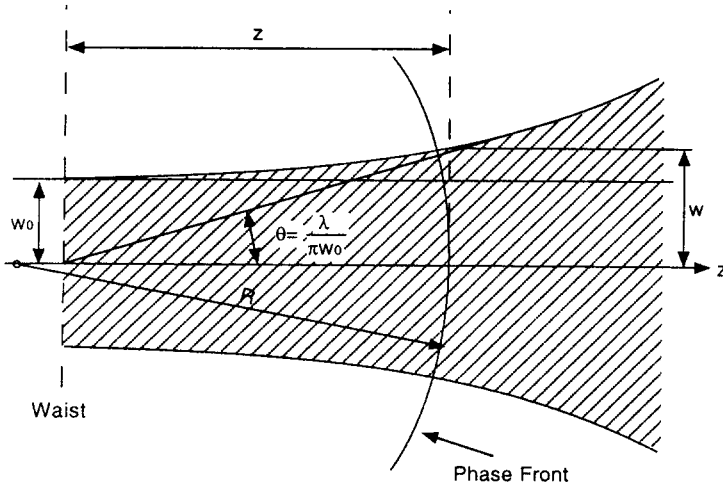


그림 1. 빔허리 근처에서의 가우시안 빔 (Keen 1985).

$$R(z) = z \left[ 1 + \left( \frac{\pi w_0^2}{\lambda z} \right)^2 \right] \quad (6)$$

그림 1에 제시한 바와같이 빔 허리로부터 전송된 가우시안 빔은 전송거리에 따라 빔이 점점 확산 되는데, 빔의 확산 각은  $\theta = \lambda/\pi w_0$ 로 주어진다.

이상과 같이 수신기의 준광학계 설계에 이용되는 가우시안 빔의 전송특성에 대하여 고찰 하였다. 가우시안 빔의 전송 특성을 나타내는 식 (5)와 식 (6)은 준광학계 설계에 있어서 가장 기본이 된다.

### 2.2 가우시안 빔과 초점소자

카세그레인 안테나의 초점에 형성된 가우시안 빔이 전송되는 동안 식 (5)와 같이 빔이 확산된다. 그러므로 여러 가지 초점소자를 이용하여 확산된 빔을 적절하게 변형시켜 수신기 휘드혼에 최적 결합되도록 초점소자 자체의 빔 특성과 변형된 가우시안 빔의 특성을 검토하는 것은 준광학계 설계에 있어서 매우 중요한 요소이다. 일반적인 기하광학에서 널리 이용되는 얇은 렌즈 근사(thin lens approximation) 이론을 이용하여, 가우시안 빔도 준광학 초점소자들에 의해서 다른 형태의 빔으로 변형시켜 전송시킬 수 있다(Goldsmith 1982).

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 전송되었다고 하자. 그러면 얇은 렌즈는 렌즈면에서 빔의 세기 분포에 영향을 미치지 않고, 한 쪽에서 들어오는 빔의 곡률 반경이  $R_1$ 인 구면파를 빔의 곡률 반경이  $R_2$ 인 구면파로 전달시키므로, 입사빔과 반사빔 사이의 관계는 가우시안 빔에 관한 식 (5), (6)과 얇은 렌즈 근사로 부터 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\left( \frac{w_{02}}{w_{01}} \right)^2 = \frac{1}{\left( \frac{d_1}{f} - 1 \right)^2 + \left( \frac{\pi w_{01}^2}{f \lambda} \right)^2} \quad (7)$$

$$\frac{d_2}{f} = 1 + \frac{\frac{d_1}{f} - 1}{\left( \frac{d_1}{f} - 1 \right)^2 + \left( \frac{\pi w_{01}^2}{f \lambda} \right)^2} \quad (8)$$

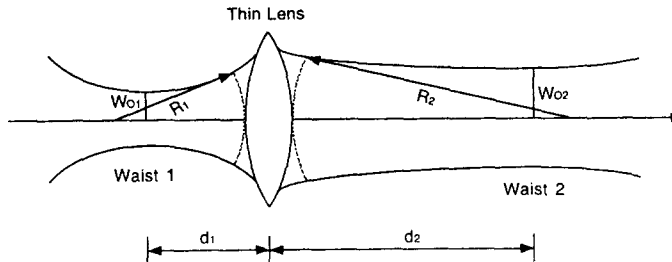


그림 2. 얇은 렌즈에 의한 빔허리.

렌즈에 의해 반사된 가우시안 빔 허리의 위치는 식 (8)의 분모의 2번째 항 때문에 일반적인 기하광학 해석과는 다르게 해석되는 경우가 있다. 즉 입사빔의 빔 허리( $w_{o1}$ )로부터 렌즈까지의 거리( $d_1$ )가 증가함에 따라 렌즈에서 반사빔의 빔 허리( $w_{o2}$ )까지 거리는 기하광학에서는 반비례적 관계가 있으나, 어떤 특정 영역에서의 가우시안 빔은 비례적으로 증가하게 되는 빔의 전송특성이 나타나게 된다(Goldsmith 1982). 따라서 준광학계를 설계할 때 기하광학 해석과 일치하도록 빔 파라미터 또는 초점길이를 적절히 조정하여야 한다. 매우 특수한 가우시안 빔의 전송특성으로서, 입사빔의 빔 허리( $w_{o1}$ )로부터 초점렌즈까지의 거리( $d_1$ )가 초점길이( $f$ )와 같을 때 반사빔의 빔 허리( $w_{o2}$ )는 초점길이 만큼 떨어진 곳에 위치하게 된다. 이때 초점길이는 특성 초점길이라고 정의되고 다음 식으로 주어진다.

$$f_o = \frac{\pi w_{o1} w_{o2}}{\lambda} \tag{9}$$

이와같은 방법을 이용하면 반사빔의 빔 허리 위치는 주파수에 관계없이 일정하게 된다. 따라서 광대역 특성이 요구되는 수신기의 준광학계 설계에 매우 유용하게 쓰인다.

### 2.3 카세그레인 초점에서의 빔 허리

카세그레인 안테나의 주경과 부경에 의하여 카세그레인 안테나 초점에 형성된 빔의 허리( $w_{cass}$ )는 빔 허리로부터 카세그레인 안테나의 주경이 멀리 떨어져 있기 때문에, 가우시안 빔의 원거리장 근사(far-field approximation)로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다(Goldsmith 1982).

$$w_{cass} = 0.216\lambda(f/D)\sqrt{T_E(\text{dB})} \tag{10}$$

여기서  $f/D$ 는 카세그레인 안테나의 특성을 나타내는 값으로서, 안테나의 주경이 14 m인 대덕전파망원경의 경우는 4.074이다.  $T_E(\text{dB})$ 는 에지 테이퍼(edge taper)로서 카세그레인 안테나의 부경 중심과 가장자리에서의 전력의 비로 각각 나타내며 다음과 같이 표현된다(Goldsmith 1987).

$$T_E(\text{dB}) = 8.686 \left( \frac{a}{w_s} \right)^2 \tag{11}$$

여기서  $a$ 는 카세그레인 안테나 부경의 반경,  $w_s$ 는 부경에서의 빔 반경이다. 안테나의 빔 효율(beam efficiency), 넘침 손실(spillover loss)과 구경 효율(aperture efficiency) 등을 고려해서 에지 테이퍼가 결정되는데 보통의 경우 10-15dB 범위 내로 결정한다(Goldsmith 1982).

지금까지 카세그레인 안테나 형태의 전파망원경을 이용한 우주전파 수신기용 준광학계 설계에 요구되는 준광학계 이론에 대하여 개략적으로 고찰하였다. 제 3장에서는 이 이론을 근거로, 우주전파 관측용 수신기의 준광학계를 설계하고자 한다.

### 3. 설 계

#### 3.1 이중채널 수신기의 준광학계 설계

카세그레인 안테나 초점에 형성된 가우시안 빔이 준광학계를 통해 전송되는 동안 전송손실 없이 믹서 앞단의 휘드혼에 최적 결합되도록 설계하는 것이 준광학계 설계의 목적이다. 이러한 준광학계를 설계하기 전에 몇 가지 고려해야 할 점들이 있다.

1) 우선 수신기 앞과 옆면에 100GHz와 150GHz대역용 단측파대 여파기(single-side band filter)가 설치되므로 수신기가 설치될 위치에서 안테나의 공간적 구조가 적절하여야 한다.

2) 또 타원면경과 유전체 렌즈의 빔 파라미터는 그들의 크기를 결정하므로 수신기의 크기와 공간적인 구조 등을 고려하여 결정되어야 한다.

3) 준광학계의 마지막에 형성된 가우시안 빔 허리는 휘드혼의 규격을 결정하므로 이 빔 허리가 휘드혼의 규격 및 특성에 적절한가를 검토하여야 한다.

4) 준광학계 부품을 설계할 때 이용되는 각 준광학계 부품의 빔 파라미터를 이용해서, 각 부품에서 발생하는 빔 손실을 검토하고 최소 손실이 되도록 설계한다.

카세그레인 안테나 초점에 형성된 가우시안 빔 허리를 믹서 앞단의 휘드혼에 빔 허리가 위치하도록 하는 준광학계에는 초점소자를 비롯해서 여러 가지 광학소자들이 있다. 그러나 실제로 빔의 특성에 영향을 미치는 것은 초점소자이므로 우선 초점소자와 가우시안 빔 사이의 관계로부터 준광학계 설계가 시작된다. 제 2장에서 기술된 가우시안 준광학계 이론을 근거로 간단한 준광학계 설계용 알고리즘을 개발하여 준광학계를 설계하였다.

그림 3에 제시한 바와 같이 카세그레인 안테나 초점에 형성된 빔 허리  $w_{cass}$ 는 식 (10)으로부터 계산된다. 여기서 이용된 안테나의 에지 테이퍼는 안테나의 효율과 손실 등을 고려하여 10-15dB로 결정하지만, 100GHz와 150GHz 대역의 중심주파수인 100GHz와 150GHz에서 12.5dB로 결정하였다.

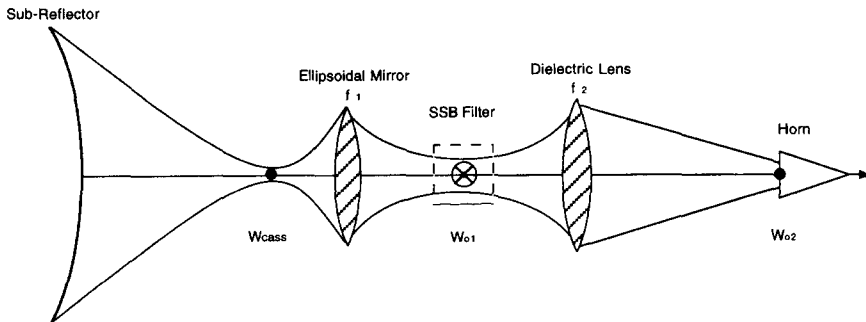


그림 3. 두 개의 초점소자를 갖는 준광학계.

표 1. 카세그레인 초점의 빔 허리에 의한 준광학계 빔 파라미터. 단위 : mm

Frequency band	Frequency (GHz)	$w_{cass}$	$w_{o1}$ (its position)	$w_{o2}$ (its position)	$\delta_z(w_{o2})$
100GHz band	85	10.973	15.005 (1074)	8.052 (1235)	15
	100	9.327	13.258 (1101)	7.813 (1318)	
	115	8.111	11.835 (1120)	7.561 (1310)	
150GHz band	125	7.462	14.254 (1196)	5.359 (1439)	11
	150	6.218	12.322 (1233)	5.214 (1434)	
	175	5.330	10.813 (1258)	5.057 (1428)	

앞에서 언급한 준광학계 설계시 유의 사항을 고려하여 100GHz와 150GHz 수신기용 준광학계의 초점소자는 한 개의 타원면경과 유전체 렌즈를 사용하여 준광학계를 설계하였다. 유전체 렌즈의 초점길이는 식 (9)로 주어지는 특성 초점길이를 이용하여 휘드혼 내부에 형성되는 빔 허리의 위치 변화가 주파수 의존성이 없도록 하였지만, 타원면경의 초점길이는 특성 초점길이를 사용하지 않았다. 특성 초점길이를 사용하면 타원면경과 유전체 렌즈와의 거리가 너무 좁아서 단축파대 여파기 설치가 불가능하게 된다. 앞에서 언급한 유의사항을 고려한 최적 준광학계를 설계하기 위하여 타원면경과 유전체 렌즈의 초점길이( $f_1, f_2$ )와 그들이 설치될 위치를 변경시키면서 반복 계산 및 검토를 수행하였다.

최종 설계된 이중채널 SIS 수신기의 준광학계의 전체적인 빔 전송특성을 나타내는 빔 파라미터는 표 1에 제시하였다. 100GHz대역과 150GHz대역의 주파수에 대한 안테나 초점에서의 빔 허리( $w_{cass}$ ), 타원면경에 의하여 형성된 빔 허리( $w_{o1}$ )와 유전체 렌즈에 의하여 형성된 최종 빔 허리( $w_{o2}$ )의 크기를 나타냈으며, 괄호안은 빔 허리가 형성된 위치를 나타낸다. 타원면경에 의하여 형성된 빔 허리( $w_{o1}$ )는 단축파대 여파기 내에서 생기는 손실을 결정하므로 단축파대 여파기를 설계할 때 손실이 최소가 되도록 결정한다. 이 검토는 다음 절에서 언급된다.

유전체 렌즈에 의하여 형성된 빔 허리( $w_{o2}$ )의 위치가 100GHz 대역에서는 약 15mm, 150GHz 대역에서는 약 11mm 정도 변화되는 것을 알 수 있다. 이와 같은 주파수 의존성은 앞에서 언급한 바와 같이 유전체 렌즈의 초점길이는 특성 초점길이를 이용하였지만, 타원면경의 초점길이는 단축파대 여파기의 설치를 고려하여 특성 초점길이를 사용하지 않아서 발생되었다. 이 주파수 의존성에 의한 빔 허리 위치 변화가 안테나의 에지 테이퍼와 빔 전송손실에 어떤 영향을 미치는가를 검토하기 위하여, 휘드혼에 의하여 결정된 빔 허리로부터 전송된 빔이 최종적으로 카세그레인 안테나 초점에 어떻게 형성되는지 검토하였다.

우선 100GHz 대역의 중심 주파수는 100GHz이므로 이 주파수에서 렌즈에 의하여 형성된 빔 허리는 표 1로부터 약 7.81mm이다. 휘드혼에 형성된 빔은 100GHz 대역의 주파수에서는 주파수에 무관하게 빔 허리가 형성된다(Wyld 1984). 따라서 혼에 의하여 형성된 빔 허리로부터 안테나 초점에 이르는 빔 경로를 주파수에 따라 추적하면, 안테나 초점에 형성된 빔 허리와 식 (10)을 이용하여 주파

표 2. 휘드혼의 빔 허리에 의한 준광학계 빔 파라미터. 단위 : mm

Frequency band	Frequency (GHz)	w <sub>case</sub>	T <sub>E</sub> (dB)	w <sub>02</sub> (its position)	δ <sub>x</sub> *
100GHz band	85	10.649	11.77	10.556 (1304)	14
	100	9.328	12.50	9.328 (1318)	0
	115	8.381	13.35	8.327 (1327)	9
150GHz band	125	7.266	11.85	7.198 (1425)	9
	150	6.223	12.52	6.233 (1434)	0
	175	5.500	13.31	5.462 (1441)	7

δ<sub>x</sub>\*: the distance from the position of w<sub>case</sub> to the position of the beam waist from backward beam trace.

수에 따른 에지 테이퍼 변화 및 그 위치를 알 수 있다. 같은 방법으로 150GHz 대역에서도 검토하였으며, 계산 결과는 표 2에 나타났다. 표 2에 제시한 바와 같이 주파수에 따른 에지 테이퍼의 변화는 100GHz 대역에서는 약 1.6dB, 150GHz 대역에서도 약 1.5dB정도가 되었다. 두 대역에서 변화가 약 2dB 이하이므로 안테나 효율에는 크게 영향을 미치지 않는다(Goldsmith 1982).

한편 주파수 변화에 따른 안테나 초점에서의 빔 허리(w<sub>case</sub>) 위치변화 때문에 발생하는 수신기의 손실은 다음 식으로 주어진다(Goldsmith 1982).

$$G_{\text{Loss}} = \left[ 1 + \left( \frac{\lambda}{\pi w_{\text{case}}^2} \right)^2 \delta_x^2 \right]^{-1} \quad (12)$$

여기서 δ<sub>x</sub>는 주파수에 따른 안테나 초점에서의 빔 허리 변화량이다. 표 2에 제시한 100GHz 및 150GHz 대역에서 빔 허리 변화에 의한 손실은 식 (12)로부터 약 0.08dB가 되어 매우 적은 손실을 보였다. 이상과 같이 설계된 이중채널 수신기용 준광학계의 효율과 전송손실에 대하여 이론적인 검토를 수행한 결과, 매우 우수한 준광학계 성능을 보였다.

최종적으로 설계된 이중채널 수신기의 준광학계 계통도와 부품 구성 및 배열도는 그림 4에 나타났다. 카세그레인 안테나 초점의 빔 허리로부터 전송된 빔은 빔 스플리터에 의하여 수직편광 성분은 150GHz 수신기 준광학계 빔 경로로 전송되며, 수평편광 성분은 100GHz 수신기 준광학계의 빔 경로로 전송된다. 빔의 확산을 방지하고 단측파대 여파기의 특성 및 크기를 고려하여 타원면경의 빔 파라미터를 결정하였다. 최종적으로 테프론 유전체 렌즈에 의하여 빔이 휘드혼에 최적 결합되도록 준광학계를 설계하였다. 그리고 준광학계 부품 및 수신기 시스템을 제작하여 준광학계의 성능을 측정할 예정이다.

### 3.2 준광학 소자(Quasi optical components)의 설계와 손실

#### 3.2.1 타원면경(ellipsoidal mirror)의 손실

앞 절에서 언급한 수신기의 전체 준광학계 설계에서 타원면경의 빔 파라미터가 결정되며, 결정된 타원면경의 제원은 표 3에 제시하였다. 빔이 입사·반사될 때 수신기가 설치될 공간적 구조와 타원면



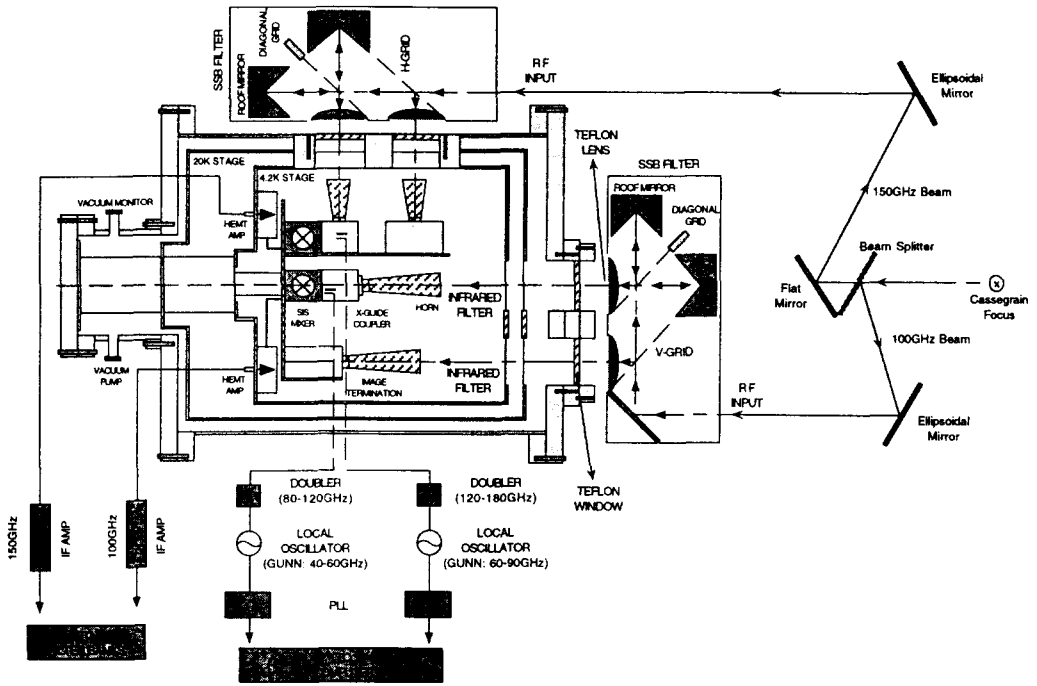


그림 4. 이중채널 SIS 수신기의 개략도.

경에서 발생하는 전송 빔의 손실이 최소가 되도록 타원면경의 초점길이가 결정되었다. 타원면경의 입사각과 반사각은 수신기의 설치와 준광학계 부품 배치 등을 고려하여 30°로 하였고, 타원면경에서의 빔 반경과 곡률 반경은 표 3에 제시하였다. 빔 파라미터에 의한 타원면경의 설계 방법은 문헌에 자세히 언급되어져 있으므로(한석태 등 1992, Chu 1983), 여기서는 빔이 타원면경에 의하여 전송될 때 발생하는 손실에 관하여 언급하고자 한다. 입사의 각을 갖고 타원면경에 입사된 빔이 반사될 때 발생하는 전체 손실은 다음과 같은 식으로 주어진다(Murphy 1987).

$$P_{Loss} = \frac{1}{8} \left( \frac{w_m}{f} \right)^2 \tan^2 i + \frac{1}{4} \left( \frac{w_m}{f} \right)^2 \tan^2 i \quad (13)$$

여기서  $w_m$ 은 타원면경에서의 빔 반경을 나타내고,  $i$ 는 입사각, 그리고  $f$ 는 초점길이이다. 첫 번째 항은 입사빔과 반사빔 사이의 진폭 변화로 인한 손실이고, 두 번째 항은 전자장이 타원면경에 입사.반사될 때 왜곡되면서 생기는 교차편파(cross-polarization) 성분으로 인한 손실이다. 타원면경에서 발생하는 손실은 입사각이 작을수록 적어지지만 수신기의 설치 공간 및 준광학계 구성을 고려하여 30°로 결정하였다. 이 경우 타원면경에서 발생하는 손실을 계산하여 표 3에 제시하였다. 100GHz 대역에 대해서는 최소 0.016dB, 150GHz 대역에 대해서는 0.012dB이므로 이 손실에 의한 수신기 잡음온도 상승은 1K 이하가 되어서 수신기 성능에 크게 영향을 주지 않을 것으로 생각된다.

표 3. 타원면경의 빔파라미터 제원.

단위 : mm

Frequency band	Focal length(f)	Incident angle(i)	Input radius curvature(RI)	Output radius curvature(RO)	Beam radius(w <sub>m</sub> )	P <sub>Loss</sub> (dB)
100GHz band	283.0	30	478.1	-693.6	48.0	0.016
150GHz band	289.3	30	430.8	-880.8	43.6	0.012

### 3.2.2 유전체 렌즈

빔 파라미터에 의한 유전체 렌즈의 설계 방법도 문헌에 자세히 언급되어져 있으므로(한석태 등 1992), 여기서는 빔이 렌즈에 의하여 전송될 때 발생하는 손실에 관하여 언급하고자 한다.

준광학계 설계에서 결정된 유전체 렌즈의 규격과 빔 파라미터는 표 4에 제시하였다. 유전체 렌즈는 제작하기 쉬운 평면-볼록렌즈(plano-convex)를 택하였다. 타원면경과 달리 유전체 렌즈는 자유공간과 렌즈의 유전율( $\epsilon_r$ )이 다르기 때문에 특성 임피던스가 서로 달라서, 임피던스 부정합(mismatching)에 의해 렌즈 표면에서 빔의 일부가 반사하게 된다. 이 반사에 의한 손실은 다음 식으로 주어진다(Cohn & Jasik 1961).

$$\text{Reflection Loss[dB]} \approx 8.686 \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad (14)$$

여기서  $n$ 은 반사지수(index of reflection)로서,  $\sqrt{\epsilon_r}$ 가 된다.

그리고 또 다른 손실은 전파 빔이 유전체 렌즈를 통과할 때 렌즈 자체에서 흡수되는 손실로서 다음 식으로 주어진다.

$$\text{Dissipation Loss[dB/cm]} \approx \frac{27.3 n \tan \delta}{\lambda} \quad (15)$$

여기서  $\tan \delta$ 는 물질의 특성에 따른 값으로 테프론(teflon)의 경우 0.0004(Pozar 1990)가 된다. 위에서 언급한 두 가지 손실은 100GHz에서는 약 0.35dB, 150GHz에서는 약 0.37dB가 된다. 렌즈 자체에서 흡수되는 손실은 렌즈의 재질에 의해서 결정되므로 이 손실은 피할 수 없으나, 반사에 의한 손실은 다음과 같은 방법으로 개선시킬 수 있다(Cohn & Jasik 1961). 그림 5(a)에 제시한 바와 같이 렌즈면에 또 다른 유전체로 코팅하는 방법이다. 이 때 코팅할 물질의 유전율( $\epsilon_{re}$ )은

$$\epsilon_{re} = \sin^2 \theta_i + \cos^2 \theta_i \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i} \quad (16)$$

로서, 렌즈면에 대한 수직성분과 입사빔이 이루는 각( $\theta_i$ )의 함수가 된다. 그리고 두께(d)는

$$d = \frac{\lambda_g}{4} \quad (17)$$

이고,  $\lambda_g$ 는 코팅물질내에서의 파장으로  $\lambda_g = \frac{\lambda_0}{4\sqrt{\epsilon_{re} - \sin^2 \theta_i}}$ 가 된다.

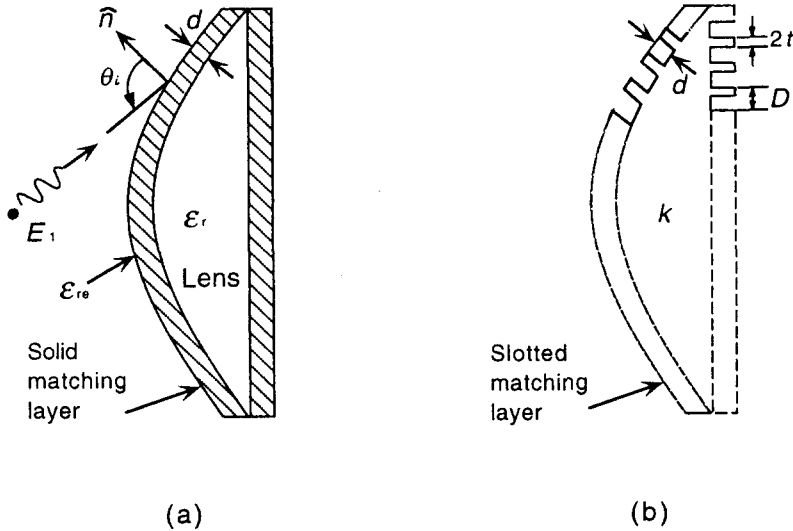


그림 5. 렌즈의 정합을 위한 1/4 파장 변환기(Collin & Zucker 1969). (a) 유전체 코팅 정합 방법 (b) 환상형 홈 정합 방법.

다른 방법은 그림 5(b)와 같이 렌즈면을 환상형으로 홈(groove)을 파내는 방법이다. 홈의 깊이는 유전체를 코팅하는 두께와 동일하며, 폭(2t)과 간격(D)사이의 관계는 다음과 같다(Cohn & Jasik 1961).

$$\frac{2t}{D} = \frac{\epsilon_r}{\epsilon_r - 1} \left[ 1 - \frac{1}{\sin^2\theta_i + \cos\theta_i \sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta_i}} \right] \quad (18)$$

일반적으로 간격은  $\lambda_0/2$ 보다 훨씬 작은 값으로 선택하므로 여기서는  $\lambda_0/20$ 로 결정하였다. 따라서 간격(D)이 결정되었으므로 위 식으로부터 폭이 결정된다. 이때 폭과 간격은 렌즈면에 대한 수직성분과 입사빔이 이루는 각( $\theta_i$ )의 함수가 되지만, 실제적으로 렌즈면에 입사한 빔의 입사각은 매우 작은 값으로 근사시킨다(Cohn & Jasik 1961).

유전체를 코팅하는 방법은 임피던스 매칭에 요구되는 특정 유전체를 제작하기가 어렵기 때문에 환상형의 홈을 파내는 방법이 널리 이용되고 있다. 본 연구에서도 이 방법을 택하여 재질이 테프론인 유전체로 렌즈를 설계하고, 반사손실을 개선시키기 위하여 설계된 환상형의 규격은 표 4에 제시하였다.

### 3.2.3 여파기의 손실

밀리미터파 및 서브 밀리미터파 대역의 우주전파 관측용 수신기는 헤테로다인 방식을 택하고 있으므로 영상신호(image signal)를 제거하기 위한 단측파대 여파기가 필요하게 된다. 이 여파기는 준광

표 4. 유전체 렌즈의 빔 파라미터와 제원.

단위 : mm

Frequency band	Focal length	Diameter	Radius curvature	Thickness	Groove thickness	pitch	width
100GHz band	108.6	80	48.8	20.9	0.62	0.15	0.09
150GHz band	101.0	70	45.4	16.5	0.42	0.10	0.06

으므로 영상신호(image signal)를 제거하기 위한 단축파대 여파기가 필요하게 된다. 이 여파기는 준광학계의 빔 특성에 영향을 미치는 소자는 아니지만 MPI(Martin-Puplett Interferometer)형 여파기(한석태 등 1996)이므로, 빔의 경로 차와 빔 허리에 의한 전송특성은 다음 식으로 주어진다(Erickson 1985).

$$T = \frac{1}{4} \left[ 1 + \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{\lambda \Delta_{IF}}{2\pi w_0^2} \right)^2}} \right]^2 \quad (19)$$

여기서  $\Delta_{IF}$ 는 여파기에서의 두 빔의 경로 차로써  $\lambda_{IF}/4$ 로 정의되어, 대덕전파망원경 시스템의 중간 주파수는 1.391GHz이므로 광로차는 약 53.88mm로 결정된다.  $W_0$ 는 타원면경에 의하여 생성된 빔 허리로서 여파기 내에 존재한다. 일반적으로 식 (19)로 주어지는 여파기의 전송특성이 99% 이상이 되도록 빔 허리와 경로차를 결정한다(Erickson 1985). 위의 조건을 고려해 볼 때, 본 논문의 설계에서는 100GHz 대역에서 0.046dB, 그리고 150GHz 대역에서 0.027dB의 손실을 갖는다. 이 손실에 의한 수신기 잡음온도의 상승은 100GHz 대역에서 약 3K, 그리고 150GHz 대역에서는 약 2K 정도로 매우 작은 양이므로 수신기 성능에 크게 영향을 미치지 않는다.

#### 4. 결과 및 토의

우주전파 수신기의 준광학계 설계에 이용되는 가우시안 광학의 기본 이론을 소개하였다. 이 기본 이론을 바탕으로 이중채널 100GHz/150GHz SIS 수신기 시스템을 위한 준광학계 설계를 완성하고, 설계된 준광학계의 성능을 이론적으로 분석하였다. 준광학계 부품에서 발생하는 손실은 수신기 잡음온도를 상승시켜 수신기 성능을 저하시키므로, 가능한 한 손실이 최소화되도록 설계하였다. 준광학계 시스템에서 발생된 손실에 의하여 부가되는 수신기 잡음온도는 약 10K 정도가 되어서 매우 우수한 이론적 준광학계 특성을 보였다.

현재 대덕전파천문대에는 85-115GHz의 주파수 대역을 갖는 SIS 수신기와 125-175GHz의 주파수 대역을 갖는 쇼트키(Schottky) 수신기를 보유하고 있다. 앞으로 제작될 이중채널 수신기는 이러한 두 대역의 수신 체계를 한 냉각 시스템에서 운영함으로써 다음과 같은 장점을 갖는다. 우선 하나의 냉각 시스템으로 동시에 두 대역의 수신기를 관측에 활용함으로써, 수신기의 교체에 따른 시간을 줄일 수 있으며 두 대역에 걸친 다중천이선(multi-transition)을 포함해서 동시관측이 가능하다. 또한 150GHz

란하였지만, 3mm 대역의 포인팅 모형을 이용함으로써 이러한 것을 해결할 수 있다. 또한 100GHz와 150GHz 수신기에 단측파대 여파기를 제작·설치함으로써 단측파대 관측이 가능하게 되어, 보다 신뢰성 있는 관측 연구를 수행할 수 있을 것이다.

### 참 고 문 헌

- 한석태, 김효령, 이창훈, 박종애, 정현수, 김광동, 김태성, 박동철 1996, 전자공학회논문지, 33, 98  
 한석태, 이창훈, 서정빈, 조세형, 임인성, 박동철, 이승무, 손태호 1992, 특정연구 연차보고서(92-5200-401), pp.15-20,  
 Chu, T. S. 1983, IEEE Trans. Antennas Propagat., AP-31, 614  
 Cohn, S. B. & Jasik, H. 1961, Antenna Engineering Handbook (McGraw-Hill: New York), chap.14-1  
 Collin, R. E. & Zucker, F. J. 1969, Antenna Theory (McGraw-Hill: New York), p.646  
 Erickson, N. R. 1985, IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., MTT-33, 1179  
 Goldsmith, P. F. 1982, Infrared and Millimeter waves vol.6 (Academic Press: New York), p.277  
 Goldsmith, P. F. 1987, MSDH, 183  
 Keen, N. 1985, private communication  
 Kogelnik, H. & Li, T. 1965, Proc. IEEE, 54, 1312  
 Lamb, J. W. 1986, Int. J. of Infrared and Millimeter waves, 7, 1511  
 McEwan, N. J. 1989, IEEE Trans. Antennas Propagat., AP-37, 297  
 Murphy, J. A. 1987, Int. J. of Infrared and Millimeter waves, 8, 1165  
 Padman, R. 1987, IEEE Trans. Antennas Propagat., AP-35, 1093  
 Pozar, D. M. 1990, Microwave Engineering (Addison-Wesley: New York), p.715  
 Thomas, B. 1978, IEEE Trans. Antennas Propagat., AP-26, 367  
 Tuovinen, J. 1992, IEEE Trans. Antennas Propagat., AP-40, 391  
 Wylde, R. J. 1984, Proc. IEE, 131, 258