

# 우주전파관측용 음향광학 전파분광기의 제작

## Manufacture of an Acousto-Optical Spectrometer for Radio Astronomical Observations

임인성\*\*\* · 최재현\*\* · 오승엽\*\*

In Sung Yim\*\*\* · Jae Hyun Choi\*\* · Seung Yeub Oh\*\*

### 요 약

우주전파신호 분석을 위한 음향광학 전파분광기를 제작하였다. 이 시스템은 우주로부터 수신된 미약한 전파신호를 분석하는 신호처리 장치로 레이저 공진기, 광학계, 광편향소자와 CCD로 구성된다. 이 시스템은 전파 신호를 분석하는 기존의 필터뱅크, 자기상관 분광기와는 달리 레이저와 광학계를 사용하여 빔을 유도하고 전파신호를 광편향소자에 의해 초음파로 변환하여 레이저빔을 회절시키는 새로운 방식의 전파 분광기이다. 광원으로는 He-Ne 레이저를 사용하였으며, 1 GHz에서 2 GHz까지의 대역폭을 갖는 광대역 GaP 광편향소자를 사용하였다. 또한 광신호 검출을 위해 2,048 채널의 CCD를 제작하였다. 본 연구에서는 음향광학효과에 대한 이론적 배경을 설명하고 레이저 공진기를 이용한 광학계의 설계, 광학마운트의 제작, CCD Driver, 인터페이스 제작과 이를 이용한 전파 신호의 측정에 대해 논의하였다. 전파신호의 측정결과 0차광이 1차광을 간섭시켜 2,048채널 중 1,000채널의 대역폭을 갖는 분광기 성능을 갖게 되었다.

### Abstract

The acousto-optical spectrometer as a new type backend of the receiver system for radio astronomical observations is manufactured for radio signal analysis. We studied on the effect of Acousto-Optic and Acousto-Optic devices and designed the optics system. We manufactured the optical mount and the CCD detector for deflected beam and interface card. This acousto-optical spectrometer consisted of a laser, optics, acousto-optic deflector, CCD detector and Interface card. This system use He-Ne laser as a light source and use optics to get parallel beam and to focus the deflected beam. Acousto-optic deflector converts IF signal to ultrasonic wave and deflect the laser beam according to the Bragg deflection. The ultra wide band acousto-optic deflector has 1 GHz bandwidth and a total of 2,048 channel Charge Coupled Device for signal detection. In this study, we discuss the theoretical description on the effect of Acousto-optics, the design of the optics, manufacture of optical mount, CCD detector, interface card and we presented the results of experiment. As a result of measurement, we have 1,000 channels bandwidth from CCD channels.

\* 한국표준과학연구원 부설 천문대 (Korea Astronomy Observatory)

\*\* 충남대학교 공과대학 전자공학과 (Dept. of Electronics Eng., Chungnam Nat'l Univ.)

· 논문번호 : 96-3-038

· 접수일자 : 1996년 8월 19일

## I. 서 론

밀리미터파 전파천문학은 현대천문학에서 가장 활발히 연구되고 있는 분야 중의 하나이다. 고감도, 저잡음 수신기 제작기술이 발달되고 수신 주파수가 확장됨에 따라 우주를 보는 새로운 창들이 계속 열리고 있다. 또한 밀리미터파 관측기술의 발달과 함께 수신 신호를 분석하고 처리하는 backend의 연구가 활발히 진행되고 있다. 기존의 필터뱅크형 전파분광기, 자기상관 전파분광기와 함께 음향광학효과를 이용한 전파분광기의 개발이 바로 그것이다.

음향광학 효과는 1922년 Brillouin이 음파에 의한 빛의 회절효과 즉, 매질을 통과하는 광파는 음파에 의해 회절된다는 이론을 제안한 후에 Raman & Nath와 Debye & Sears에 의해 연구되었으며 1960년대 초에 높은 간섭성을 가진 레이저의 개발과 초고주파 공학이 발전되면서 높은 주파수를 가진 음파와 빛의 상호작용에 대한 연구가 진행되었다<sup>[1]</sup>. 1962년 Lambert에 의해 우주전파 신호분석에 음향광학효과를 이용한 전파분광기에 관한 연구가 제기된 후 회절효과를 이용한 광편향소자의 개발과 함께 전파 신호를 처리하는 음향광학 전파분광기(Acousto-Optical Spectrometer)에 관한 연구가 진행되고 있다.

우주전파의 분석에 있어서 주요한 요인으로는 감도, 주파수 분해능 그리고 대역폭이다. 우주전파신호는 특성상 그 신호의 세기가 미약하여 신호를 분석하기 위해서는 초고감도의 분광기 개발이 요구되고 관측되는 스펙트럼의 모양을 상세히 측정할 수 있는 주파수 분해능과 대역내의 모든 주파수 성분을 포함하는 다중채널 방식이 필요하다<sup>[2]</sup>. 전파분광기는 선스펙트럼 전파를 관측하기 위한 것으로 수신 전파를 주파수에 따른 세기 즉, 전파세기 스펙트럼을 측정하는 장치이다. 음향광학 전파분광기는 필터뱅크형 분광기나 자기상관형 전파분광기와는 달리, 레이저 공진기를 이용하여 외부의 전기 신호에 의해 광의 성질을 변화시켜 신호를 분석하는 새

로운 방식의 전파분광기이다. 최근  $\text{TeO}_2$ ,  $\text{LiNbO}_3$ , GaP와 같은 광편향소자가 개발됨에 따라 이를 이용한 분광 시스템의 연구가 진행되고 있다<sup>[3,4,5]</sup>. 이 시스템은 레이저 공진기, 광학계, 광편향소자, C-CD로 구성된다. 음향광학 전파 분광기는 필터뱅크형 전파분광기나 자기상관 전파분광기에 비해 대역폭을 넓게 할 수 있어 광대역에 적합하며 안정성이 높고 비교적 복잡하지 않다는 장점이 있다<sup>[6]</sup>. 본 연구에서는 음향광학 효과에 대한 이론적 고찰, 광학계의 설계, 광편향소자, 광학마운트, CCD 검출기, 인터페이스 카드의 제작 그리고 실험결과에 대해 논의하였다.

## II. 광편향 소자<sup>[7,8]</sup>

광편향 소자는 초음파가 진행하는 투명한 매질로 구성된 신소재로 광선과의 상호작용에 의해서 압전 변환기에 의해 초음파가 발생된다. 이 압전 변환기는 증착으로 만들어지는 세라믹이거나 얇은 판으로 된 단결정물질로 구성된다. 광편향소자와 변조기내에서 레이저 출력인 입사광의 양은 초음파와의 상호작용에 의해 굴절계수가 주기적으로 변화하고 한 방향 또는 그 이상의 방향으로 편향된다. 광편향 기술은 압전 분야와 광탄성 분야에 대한 새로운 물질의 개발에서 비롯되었다. 현재 높은 음향전기 결합계수와 광편향 지수를 갖는 광학물질의 개발에 연구가 진행되고 있다.

광편향소자는 초음파와 물질의 상호작용에 의해 굴절계수를 변화시켜 광의 회절을 야기시키는 장치로 소형이며 동작이 간편하다는 장점을 갖는다. 광편향기와 변조기는 광조절 필터, 펄스 발생소자, 펄스 레이저 그리고 기억장치 등에 사용된다. Raman과 Nath 또는 브레그 회절 둘 중의 하나를 사용하면, 투명 매질 내에서  $\lambda^*$ 의 주파수를 갖는 초음파를 변화시킴으로써 레이저 빔의 편이  $\lambda^*/v$ 가 제어될 수 있다. 일정한 세기를 갖는 편향된 빔을 얻기 위해서 진행 초음파를 사용하는 것이 필요하다. 정지파는 물질의 길이에 의존하는 어떤 잘 결정된

주파수에 대하여 초음파의 전파 방향으로 발생될 수 있다. 브레그 회절은 모든 입사에너지를 한 방향과  $Q \gg 1$ 인 대부분의 시간에서 편향된 파를 발생시킬 수 있다. 광편향소자들의 이론과 실용에 대해 알아보자.

광학적인 빔과 음향학적인 빔의 상대적 발산은  $a = \frac{\delta\theta_0}{\delta\theta_a}$  이다.

여기서  $\delta\theta_0$ 는 광학 빔의 발산이고,  $\delta\theta_a$ 는 음향 빔의 발산이다.

발산비가 음향광학 상호작용의 기하학적 모양을 특성짓는다고 할 때  $a \ll 1$ 이면 소자는 편향기이고  $a \approx 1$ 이면 소자는 광변조기이며  $a \gg 1$ 이면 소자는 가변 광학 필터로 동작한다.

음향파의 구동주파수가 바뀌면 회절빔의 방향이 바뀐다. 주파수 범위  $\Delta f$  에서 일차 회절빔과 회절되지 않은 빔이 이루는 작은 매질 밖에서

$$\Delta\theta_a = \frac{\lambda_0 \Delta f}{V} \quad (1)$$

이 된다.  $\lambda_0$ 는 광의 파장이고,  $V$ 는 음향속도(acoustic velocity)이다.

편향기에서 가장 중요한 동작 매개변수는 분해능과 속도이다. 분해능 또는 분해점수의 최대 갯수는  $\frac{\text{편향각}}{\text{회절된 빔의 각 퍼짐}}$  이다.

$$\text{즉 } N = \frac{\Delta\theta}{\delta\theta_0} \quad (2)$$

$\Delta\theta$ 는 편향각이고  $\delta\theta_0$ 는 회절된 빔의 각 퍼짐을 나타낸다.

$$\delta\theta_0 = \xi \frac{\lambda_0}{D} \quad (3)$$

$D$ 가 입사빔의 폭이고,  $\xi$ 가 입사 빔의 크기 분포

에 영향을 주는 인자일 때 식 (1), (2), (3)에 의해

$$N = \tau \Delta f \quad (4)$$

$\tau = \frac{D}{V \cos \theta_0}$  는 광학적인 개구면을 가로지르는 음향파-전이 시간 즉, 편향기의 속도이며  $N = \tau \Delta f$  에서 분해능은 시간×대역폭 이다.

주어진 대역폭과 분해능에 대해 가장 높은 회절 효율을 얻는 것이 광 편향기의 설계 목적이다. 광편향소자에는 압전소자(transducer)가 격자면에 붙어있고 꼭대기 전극은 상호작용 길이  $L$ 과 음향 빔의 높이  $H$ 를 제한한다. 음향파가 변환기로 부터 상호작용 매질로 들어가서 격자를 위상 이동시킨다. 광학적인 빔은 음향파 면에 대해 적당한 브레그 각을 이루며 입사빔은 일반적으로 가우시안 프로파일 이 된다. 충분히 긴 상호작용 길이  $L$ 에서 음파는 입사 빔의 일부분을 일차 회절시킨다. 회절된 빔의 각 스펙트럼은 음향파 전력 스펙트럼에 비례한다. 회절된 빔의 세기는 광학적인 빔과 음향파 회절 프로파일의 중복 적분에 비례하고 브레그 셀의 최고 회절 효율은 모멘트 정합 조건에서  $\eta_0 = \frac{\pi^2}{2\lambda_0} M_2 \left(\frac{L}{H}\right) P_a$ 가 된다.

상호작용 길이  $L$ 을 길게 하고 음향빔의 높이  $H$ 를 작게 함으로써 회절 효율을 증가시킬 수 있음을 알 수 있다. 음향 빔폭, 즉 상호작용길이  $L$ 은 음향파 전력 스펙트럼의 각 퍼짐을 제한하고 요구되는 주파수 대역폭에 의해 제한된다. 음향 빔의 높이  $H$ 는 횡단 음향파 회절을 결정한다. 브레그 셀 설계시 최적의 음향 빔의 높이  $H$ 는 음향광학 회절이 음향파 근역장 내에서 일어나도록 선정된다. 음향 빔의 높이를 식 5와 같이 나타낼 수 있다.

$$H_0 = \sqrt{BD} = V \sqrt{\frac{\tau}{f}} B \quad (5)$$

$D$ 는 총 광학적 개구면,  $B$ 는 음향파 완만 표면의

곡률이고 회절 효율( $\eta_0$ )을 식 6과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_0 = \frac{\pi^2 P_a}{2\lambda_0^3 f} \frac{1}{\tau^{\frac{1}{2}}} \left( \frac{M_3}{\sqrt{B}} \right) l \quad (6)$$

등방성 회절에서  $l \approx \frac{1.8}{\Delta F}$  ( $l$ : 정규화된 상호작용길이)이다. 즉 부분적인 대역폭( $\Delta F$ )이 정규화된 음향과 빔폭( $l = \frac{L}{L_0}$ )을 결정한다. 식 (6)에서 보면  $l$ 을 증가시키고 큰 유효 Merit 지수  $M_3^* = \frac{M_3}{\sqrt{B}}$ 를 갖는 모드와 적당한 음향광학 물질을 선택함으로써 회절 효율을 증가시킬 수 있음을 알 수 있다.

### 2-1 광편향 소자의 대역폭과 분해점수<sup>[9,10,11]</sup>

브레그입사에서 음향 빔을 지난 후에 나타나는 모든 광선은 같은 위상이고, 그들은 서로 간섭을 일으킨다. 광선이 한 위치로부터 멀어지면 편향된 광의 세기는 그것이 0이 될 때까지 줄어든다. 주파수  $f_0^*$ 에 대하여 브레그각  $\theta_B$ 에서 정확하게 위치해 있다고 가정하자.  $f_0^*$ 가 광파와 음파의 방향으로는 변화를 가져오지 않고  $f_0^* + \Delta f$ 로 변화된다면 브레그각으로부터의 편이량  $\delta\theta_B$ 는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta\theta_B = \frac{\lambda}{2n} \frac{\Delta f}{v} \quad (7)$$

동일한 평면음파 상에서 두 점  $A$ 와  $A'$ 에서의 편향된 두 개의 빔과 상호작용 길이의 반인  $L/2$ 에 의해 분리된 빔 사이에서 발생된 길이에 있어서의 차이  $\Omega$ 는 다음과 같다.

$$\Omega = \frac{L}{2} (\cos(\theta_B - \delta\theta_B) - \cos(\theta_B + \delta\theta_B)) \quad (8)$$

$\theta_B$ 는 브레그 각이고, 식 8은 또한 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Omega = L \sin \theta_B \delta\theta_B \quad (9)$$

$\delta\theta_B = \lambda^*/L$ 에 대하여  $A, A'$  두 점으로부터 나타나는 두 빔은 서로 상쇄적인 간섭 상태에 있음을 관찰할 수 있다. 그러므로 음향 빔의 왼쪽편 내에 있는 점에 의해 편향된 광은 왼쪽편에 있는 점으로부터  $L/2$ 만큼 떨어진 오른쪽에 위치한 점에 대응하여 상쇄된다. 처음으로 0의 최소값을 갖는 것은  $\delta\theta_B$ 가  $\lambda^*/L$ 이 되는 각에서 나타난다. 그러므로 허용되는 각의 편이는  $\delta\theta_B$ 를  $\pm\lambda^*/2L$ 로 취함으로써 얻을 수 있다. 주파수  $\Delta f_B$ 에서의 한계 허용치는 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\Delta f_B = 2v^2 n / f_0^* \lambda L \quad (10)$$

기본적인 편향 셀은 상호작용 매질 내에서 진동하는 압전 변환기로 구성된다. 각각의 변환기에서 어떤 상대적인 음파 대역  $\Delta f_A / f_0$ 는 동일 주파수상에서 일치한다. 여기서  $f_0$ 는 중심주파수이다.  $\Delta f_A / f_0$ 는 단지 압전 변환기의 전기기계적인 커플링 계수  $k$ 와 두 매질의 특성 임피던스의 비  $\mu$ 에 일정하게 의존한다. 편향셀의 대역폭  $\Delta f$ 는 모든 이들 대역의 결과적인 대역폭이어서 소자의 제작시에  $\Delta f$ 를 최적화 하여야 한다. 광선의 액세스 시간  $\tau$ 는 편향시에 다음과 같은 관계식을 만족한다.

$$\tau = D/v \quad (11)$$

$D$ 는 초음파의 진행 방향에서 광선의 차원이고,  $\tau$ 는 매질을 통과하는 음파 빔이 걸리는 시간이다. 동일 주파수 상에서  $\Delta f$ 를 통해 검색된 전체 각 폭은 다음과 같다.

$$\Delta\theta = \left( \frac{\lambda}{v} \right) \Delta f \quad (12)$$

여기서  $\Delta\theta$ 가 광파 빔의 발산  $\lambda/D$ 로 나누어지는 경우, 이는 분해점수나 또는 기본 셀의 용량을 나타내고, 다음과 같이 분해점수를 나타낼 수 있다.

$$N = \tau \Delta f \quad (13)$$

## 2-2 스펙트럼 분석기로서의 광편향 소자<sup>[12,13]</sup>

브레그 조건에서  $\theta = \sin^{-1} \frac{\lambda}{2\Lambda} = \sin^{-1} \frac{f\lambda}{2v_s}$   $\cong \frac{f\lambda}{2v_s}$  이 된다( $\Lambda$  : 음향 파장). 이 식에서 보면 브레그 각  $\theta$ 는 음파가 가지는 주파수와 비례함을 알 수 있다. 따라서 이러한 성질을 이용하여 전기적인 신호를 음파로 바꾸어 광편향소자에 적용시킴으로써 원하는 전기적인 신호의 스펙트럼을 분석할 수 있다.

그림 1은 스펙트럼 분석기로서의 광편향소자를 나타낸다. 그림에서 전기적인 입력 신호는 압전기를 통하여 초음파로 바뀌게 되고 이때 이 초음파는 입력신호의 주파수의 세기에 따른 스펙트럼 분포를 갖는다. 이 초음파의 푸리에 변환은 AOD(acousto-optic deflector) 또는 브레그 셀이라고 하는 광편향소자를 통하여 브레그 조건에 의해 회절되고 광학계를 통해 렌즈의 초점 평면에 빛의 분포를 나타나게 된다. 이때 빛의 분포에 들어있는 입력신호

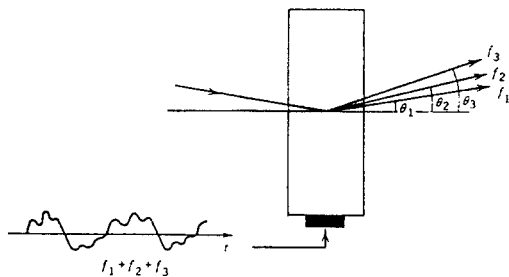


그림 1. 스펙트럼 분석기로서의 광편향소자

Fig. 1. Acousto-optic deflector as a spectrum analyzer.

의 순간전력 스펙트럼은 CCD를 통하여 전하분포로 바뀌어진다.

초기의 광편향소자는 레이저 빔 스캐닝에 응용하기 위한 목적으로 높은 분해점수를 실현하기 위해 개발되었다. 고 분해능 셀의 설계는  $T_eO_2$ 에서 [110] 모드를 이용한 Warner에 의해 설명되었다<sup>[7]</sup>. 구동 전력에 알맞는 쌍굴절 회절의 위상 정합을 이용하여 설계하였다. 최근에는 낮은 음속을 가지는 새로운 음향광학 물질이 개발되었다.  $Hg_2Cl_2$ 와  $Hg_2Br_2$ 에서 느린 음향파 속도는 [110] 방향에서 각각 0.347 mm/ $\mu$ sec와 0.282 mm/ $\mu$ sec 이다.

광대역 셀은 GaP와  $LiNbO_3$  셀로, GaP는 매우 큰 Merit 지수  $M_3$ 와 상대적으로 낮은 음향 감쇠를 가지고 있다. L[111]과 S[100] 모드가 있다. 이 두 모드는 둘 다 낮은 음향 곡률을 가지고 있어서 비 등방성 빔 제한에 기인하여 효율이 증가된다. 광대역 GaP 소자는 또 음향빔 조정에 의해 효율을 높일 수 있으며 변환기를 쉽게 제작하기 위해 평판 위상 배열 구성이 이용된다. 이 위상 배열 GaP 소자들은 최고의 효율과 대역폭을 가지고 있다. 낮은 감쇠 물질을 이용하여 큰 대역폭을 갖는 브레그 셀이 개발되었다. 이는  $LiNbO_3$  소자로 대역폭이 2 GHz, 최고 회절 효율 12%/watt 이고 분해점수는 600이다. 본 연구에서 사용한 브레그 셀은 GaP 광편향소자로 중심주파수가 1.5 GHz 이고 대역폭이 1 GHz인 광대역 특성을 갖는 셀을 사용하였다.

## 2-3 음향광학 전파분광기의 동작원리

음향광학 전파분광기는 기존의 필터뱅크형 분광기나 자기상관형 전파분광기와는 달리, 레이저 공진기를 이용하여 외부의 전기 신호에 의해 광의 성질을 변화시켜 신호를 분석하는 방식의 전파분광기이다. 이 시스템은 레이저 공진기, 광학계, 광편향소자, CCD로 구성된다. 그림 2에 전파분광기 블럭 다이어그램을 나타낸다. 광편향 소자의 입력에 파장  $\lambda$ 의 레이저 광을 입사시키고, 광편향 소자의 다른 입력부인 압전소자(transducer)에 수신전파인

중간주파수  $f$ 를 입력하면 광편향 소자의 결정중에는 속도  $v$ 의 초음파가 발생한다. 이러한 상태의 결정은 레이저광에 대해서 회절격자의 역할을 하며, 레이저광은 초음파의 각 파면에서 편향된다. 편향된 광의 세기는 전파세기에 비례한다. 또한 편향각  $\theta$ 는 입력된 주파수에 비례하기 때문에  $\theta = (\lambda \cdot f / v)$  레이저광이 편향되는 방향에 선형 이미지 CCD로 검출하면 입력된 전파의 중간주파수  $f$ 의 분광이 가능하게 된다. 레이저의 광출력은 5 mW로 비교적 작으므로 광출력을 가능한 유효하게 할 수 있도록 광학계를 설계하여야 한다. 일반적으로 레이저의 광출력은 타원형으로 장축과 단축에서의 초점의 위치가 수  $\mu\text{m}$ 의 비점격차가 존재하게 된다. 이 비점격차를 제거하기 위해 광학소자를 이용하여 평행광으로 보정한다. 이를 위해 광학소자의 표면에서 반사광을 적게 하고 광축등의 조정을 용이하게 하기 위해 가능한 적은 수의 광학계로 구성해야 한다. 광편향소자 표면에서 레이저광의 반사를 최소로 하기 위하여 타원형 렌즈의 표면을 코팅하는 것이 좋으며 포커싱 렌즈는 비점 수차가 적은 렌즈를 사용한다. 광편향소자를 통과한 레이저빔은 초음파로 변환된 IF전기신호와의 상호작용에 의해 편향되며 이 편향된 빔은 CCD 어레이에 의해 검출된다. 시스템의 제작은 주파수 대역폭, 채널, 분해능을 고려하여 설계목표치를 설정하여 제작한다. 결국 시스템의 성능은 이들 설계목표치가 된다.

### III. 실험 및 고찰

#### 3-1 광학계 설계 및 제작

레이저빔을 AOD로 유도하기 위한 빔 유도장치를 설계하고 제작하였다. 광원으로는 파장이 632.8 nm이고 최대 출력이 5 mW인 Melles Griot사 제품의 He-Ne 레이저를 사용하였다. 출력을 안정하게 하기 위해서는 구동전원이 안정적이어야 한다. 레이저의 발진 파장은 정선의 온도에 따라 변하기 때문에 구동전원은 매우 안정되어야 한다. 미약한

신호를 장시간 동안 적분하여 그 세기를 측정할 때, 출력의 불안정성은 큰 측정 오차의 요인이 될 수 있다. 따라서 레이저의 동작시에, 전류나 온도의 변화에 대해서도 안정된 모드의 설정이 필요하며 케이스 온도가 30℃ 이하로 유지되어야 한다. 이는 주파수 분해능을 높이고 모드 변환을 방지하기 위한 것이다. 발진 모드의 변화는 전류, 온도의 변화에 대해 히스테리시스를 가지고 있다. 만일 레이저의 구동중에 전류나 온도가 변화하면, 설정한 조건이 안정한 범위를 넘게 되고 분광기의 각 채널에 대응하는 주파수가 벗어나게 될 위험이 있다. 본 연구에 사용된 레이저는 Melles Griot 05-LHR-151로 발진파장 632.8 nm, 발진 전력 5 mW, 발진전류 6.5 mA 이다.

레이저의 광출력은 5 mW로 비교적 작으므로 광출력을 가능한 유효하게 할 수 있도록 광학계를 설계하여야 한다. 광학소자의 표면에서의 반사광을 적게 하고 광축등의 조정을 쉽게 하기 위해 가능한 적은 수의 광학소자로 광학계를 구성하였다. 사용된 광학계의 주요 부품은 표 1과 같다. 또한 그림 2는 전파분광기 블록다이어그램을 나타낸다. 출력된 레이저 빔은 expander를 통하여 빔의 크기 3배로 확대할 수 있도록 하였다. 빔 expander는 빔의 입사각을 변화함으로써 빔의 크기를 2배에서 6배까지 확장할 수 있는 unmounted anamorphic 프리즘을 사용하였다. 빔 expander를 통과한 빔은 실린드릭 렌즈를 통과한 후 광편향 소자에 입력된다. 광편향소자 표면에서 레이저광의 반사를 최소로 하기 위하여 타원형 렌즈의 표면을 코팅하는 것이 좋으며 포커싱 렌즈는 비점 수차가 적은 렌즈를 사용하였다. 광편향소자를 통과한 레이저빔은 초음파로 변환된 IF전기신호와의 상호작용에 의해 회절되며 이 회절된 빔은 CCD 어레이에 의해 검출된다.

설계된 광학계에 따른 광학 마운트를 제작하였다. 광학마운트는 광학 레일위에 X, Y, Z 축을 따라 이동할 수 있도록 하고 각 포스트들은 트랜스레이터, 로테이터로 조정할 수 있도록 하였다. 또한 각 광학부품을 위한 홀더 등은 광학계를 구성하는

표 1. 광학계 주요부품의 규격

Table 1. Specification of optical parts.

부 품 명	모 델 명	규 격
Beam expander	Melles Griot 06GPU001	Anamorphic Prism A=12.0 mm, B=8.5 mm, C=12.0 mm
Cylindrical lens	01LCP125	Precision plano-cylindrical glass lens f=12.7 mm
Focusing lens	01LCP285	Plano-convex glass lens f=250 mm
	01LDX055	Symmetric Convex glass lens f=30 mm
	01LDX201	Symmetric convex glass lens f=150 mm
Flat mirror	01MFG007	Square flat mirror 25×25 mm

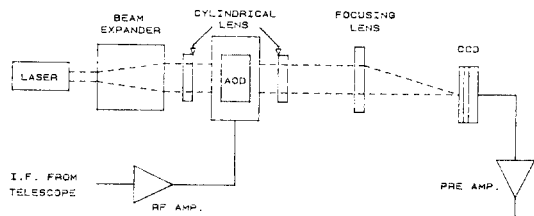
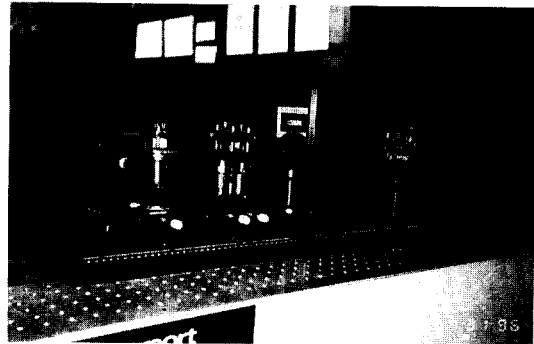


그림 2. 설계된 전파분광기 블록다이아그램

Fig. 2. Block diagram of designed Acousto-optical spectrometer.



각 부품에 맞게 제작되었다.

제작된 광학계 마운트의 재질은 알루미늄이며 검정색으로 피막처리하여 빛의 반사를 없애도록 하였다. 광학계 마운트의 규격은 750×200×300 mm 이다. 그림 3은 제작된 광학계 마운트를 나타낸다.

### 3-2 GaP 광편향소자

광편향소자는 분광기의 주파수 분해능과 대역폭을 결정하는 중요한 소자이다. 따라서 관측하려는 분자선의 분광에 필요한 대역폭에 따라 광편향소자를 결정하게 된다. 일반적으로 은하중심 등의 넓은 대역을 관측하기 위해서는 GaP, LiNbO<sub>3</sub>를 사용하며 고분해능 관측을 위해서는 TeO<sub>2</sub>를 사용한다. 음

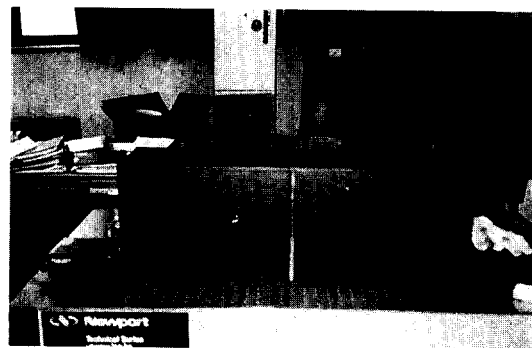


그림 3. 제작된 광학계 마운트

Fig. 3. Manufactured optical mount.

향광학 분광기의 대역폭과 주파수 분해능은 광편향소자의 주파수 대역폭과 분해능수에 따라 결정된다. 따라서 분광기의 설계시 관측 대상과 목적에 따

라 이를 결정하여 제작하게 된다. 실제로 광편향소자를 사용하여 음향광학 분광기를 제작할 때에는 광편향소자의 입력 전력을 낮게 하여 광편향소자의 온도 상승을 막고, 초음파의 전파 속도를 일정하게 하여야 한다. 또 선형성을 유지하기 위해 최대회절 효율의 10% 이내에서 사용하여야 하며 초음파의 감쇠를 피하기 위하여 낮은 주파수의 광편향소자를 사용하는 것이 바람직하다. 초음파의 감쇠는 주파수의 제곱에 비례하며 고주파일때 크게 된다. 즉, 광편향소자에 입력되는 신호가 저주파 일수록 광편향소자의 분해능을 높히게 된다. 본 연구에서는 주파수 범위가 1 GHz에서 2 GHz이고 대역폭이 1,000 MHz인 광대역 광편향소자를 사용하였다. 이는 광대역용의 광편향소자로 대역폭이 1,000 MHz에 걸쳐 있음으로 비교적 분자선이 넓은 대상의 전파에 적합하며, 전파망원경 수신기의 IF 주파수인 1.4 GHz를 별도의 주파수 변환없이 광편향소자의 입력으로 사용할 수 있는 이점이 있다. 이 광편향소자는 Brimrose Corporation of America사의 Gallium Phosphide(GaP) 소재인 GPD-150-100으로 주파수 대역폭은 1 GHz에서 2 GHz로 광대역 소자

이다. Spot 수는 1,000개이며 1 MHz의 분해능을 갖는 광편향 소자이다. 중심주파수는 1.5 GHz, 회절효율은 0.8 W에서 17%, 브레그 각은 5.7도이다. GaP 광편향소자의 특성은 표 2와 같다.

### 3-3 CCD 구동회로의 제작

광편향소자를 통과한 빔의 유도를 최적화하고 회절된 1차광을 CCD로 검출하여 구동회로를 제작하였다. CCD는 일본 OKI Semiconductor사의 2,048 채널 OPA2048CA를 사용하였다. OPA2048CA의 외형은 40×10 mm의 22 pin 세라믹 헤더로 되어 있다. OPA2048CA의 내부구성은 포토다이오드, 포토게이트, 포토 트랜스퍼 게이트, 애널로그 슈프트 레지스터, 출력 게이트, 프리 앰프, 보상프리앰프로 구성된다. 포토다이오드 부분이 광전변환부, 포토게이트 부분이 전하축적부, 포토트랜스퍼 게이트, 애널로그 슈프트 레지스터, 출력게이트 및 프리 앰프 부분이 전하를 읽어내는 부분이다. 보상 프리앰프는 프리앰프에서 생기는 노이즈와 같은 노이즈를 발생시켜, 외부에서 차동증폭시키는 것으로 노

표 2. GaP 광편향소자의 특성

Table 2. GaP deflector specifications.

번호	항목	단위	GaP GPD-150-100
1	Laser Wavelength	nm	633
2	Active Aperture	mm	0.76 × 6.0
3	Frequency Range	MHz	1,000~2,000
4	Bandwidth	MHz	1,000
5	Optical Transmission	%	80
6	Access Time	usec	1.0
7	Resolution	spots	1,000
8	Deflection Angle	deg	5.7
9	Acoustic Velocity	m/sec	6.31E+3
10	Maximum Electric Input Power	Watts	1
11	Input Impedance	Ohms	50
12	Optical Polarization	-	Linear



이즈를 제거할 수 있도록 하는 회로이다. 이 CCD의 특징은 각 화소의 축적전하를 동시에 CCD로 전송하는 점이다. 화소에서 CCD로 전하 전송을 끝낸 때부터 다음 전송때까지 전하축적 시간이 되므로 각 화소 모두 동일시간 상을 보고 있다. 클럭펄스  $\phi_0$ 를 입력하고 OPA2048CA를 동작시키는 회로를 제작하였다.

### 3-4 인터페이스 카드의 제작

CCD 구동회로에서 수신된 전파를 측정하기 위해 PC로 동작할 수 있도록 I/O 인터페이스 카드를 제작하였다. 음향광학분광기의 신호를 개인용 컴퓨터로 성능을 측정하고, 수신신호 분석을 위해 인터페이스 카드를 제작하였다.

I/O 인터페이스의 포트 어드레스는 DIP 스위치 SW2를 이용하여 변경이 가능하도록 하였다. 예를 들면 I/O 포트 어드레스를 '0x0348'로 설정할 경우 어드레스는 이진수로  $(11\ 0100\ 1000)_2$ 이 되므로 SW2를 아래 그림과 같이 비트를 설정한다. 현재 I/O 인터페이스가 PC에 연결될 때는 I/O 포트 어드레스를 '0x0300'로 설정되어 있다. 제작된 I/O 인터페이스와 장비간 통신을 위해 37핀 커넥터를 사용하였다. 또한 전파신호 수신 프로그램을 개발하였다. 이는 CCD에서 수신한 전파 강도 스펙트럼을 측정하는 소프트웨어로 C언어를 이용하여 개발하였으며 메뉴방식을 취하도록 하였다.

### 3-5 시스템의 제작 및 실험

음향광학분광기 실험을 위한 전체 시스템의 구성은 그림 4와 같다. 본 실험에서는 가변 신호발생기를 사용하여 1 GHz에서 2 GHz까지 주파수를 가변하였다. 레이저에서 발생한 레이저 빔은 광학계를 거쳐 AOD의 입력이 되며 신호발생기에서 발생한 신호 역시 AOD의 입력신호가 된다. 이 전파신호는 초음파로 변환되고 주파수와 신호세기에 따라 레이저 빔을 회절시킨다. 회절된 광신호는 CCD Driver

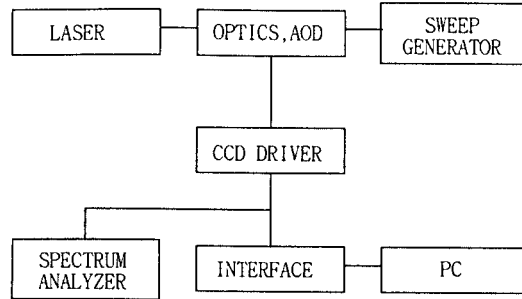


그림 4. 전체 시스템 구성도

Fig. 4. Block diagram of AOS system.

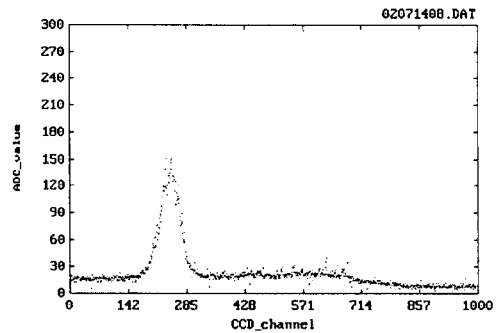


그림 5a. 음향광학분광기의 CCD 출력

Fig. 5a. CCD output of AOS.

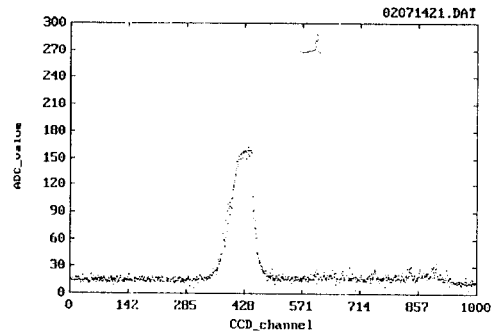


그림 5b. 음향광학분광기의 CCD 출력

Fig. 5b. CCD output of AOS.

ver에서 검출되도록 하였다. 검출된 신호는 인터페

이스를 통하여 PC로 분석할 수 있도록 하였으며 스펙트럼 분석기로 그 출력을 볼 수 있도록 하였다. 주파수 대역폭은 광편향소자의 선택으로 정해지게 되므로 대역폭은 1 GHz에서 2 GHz이고, 분해능은 1 MHz였다. 최소 입력레벨은 -50 dBm였다.

CCD를 통해 검출된 전파신호는 그림 5a, 5b와 같다. 신호발생기를 이용하여 1 GHz에서 2 GHz까지 주파수를 스위치켜 광편향소자의 전기신호로 입력하였다. 레이저는 He-Ne를 사용하여 광편향소자의 광학표면에 입력시키면 신호발생기에서의 전기신호가 레이저를 회절시키게 된다. 회절된 광신호를 광학계를 이용해 집광하여 CCD 표면에 입력시켰다. 그림 5 a, b는 이와 같은 실험으로 빔 유도부인 광학계를 통과한 회절빔이 CCD를 통과한 다음 CCD에서 검출된 신호이다. 이는 AOD에서 초음파로 변환된 전파신호가 레이저빔을 회절시켜 음향광학효과를 이용한 전파신호의 스펙트럼을 나타낸다. 이 그림은 CCD출력 검출 PC용 프로그램을 통하여 측정된 그림이다.

그림 5 a, b는 신호발생기에서 발생된 신호를 채널대 세기를 나타낸 것이다. 가로축은 CCD의 채널이고 세로축은 입력신호의 세기를 나타낸다. 입력신호의 전력은 -10 dBm이고 대역폭은 1,000 MHz 이었다. 그림에서 2,048채널 중 1,000채널만을 출력한 것은 0차광이 1차광을 간섭시켜 데이터에 영향을 주기 때문에 1,000채널만을 출력하였다. 이는 광편향 소자에서 편향된 1차광을 광학계에 정확히 편향시켜 CCD에 입력시켜야 하나, 사용된 광학부품이 코팅처리가 되지 않아 반사를 일으키게 되었다. 이로 인해 회절되지 않은 0차광이 회절광을 간섭시켜 2,048채널의 일부를 포화(saturation)시키게 된 결과이다. 입력신호를 -10 dBm으로 했을 때, 측정된 신호의 성능을 감도, 분해능, 대역폭 등을 검토하여 상대비교한 결과 별차이가 없었으나, 제작된 음향광학 전파분광기는 기존의 256채널 필터뱅크형 분광기에 비해 4배의 채널을 확장하였다는데 의의가 있다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 대역폭이 1 GHz의 광대역 광편향소자를 사용한 음향광학분광기를 설계하였다. He-Ne 레이저를 광원으로 이용하였으며 레이저빔을 유도하는 광학계를 설계하였다. AOD를 통하여 초음파에 의해 회절된 1차광을 CCD로 검출하기 위하여 CCD 구동회로를 제작하였다. 광편향소자를 통해 회절된 신호의 스펙트럼을 측정하였다. 그 결과 전파신호의 측정은 성공적으로 이루어졌으나 0차광이 편향광을 간섭시켜 1,000채널만을 출력할 수 있었다. 이는 광학계 구성품의 불안정으로 인한 결과로, 렌즈면을 코팅하여 광학계를 다시 구성하여야 할 것이다.

이 음향광학 전파분광기 시스템은 기존의 필터뱅크형 분광기나 자기상관분광기가 채널 필터 어레이와 자기상관함수로 신호를 검출하는 방식에 비해 레이저와 AOD소자를 사용하는 새로운 방법의 전파신호 처리 장치이다. 본 연구에서는 광대역 신호분광을 위한 광학계를 설계하고, 광학마운트, CCD 구동회로 그리고 인터페이스 카드를 제작하였고 스펙트럼 분석기를 통해 그 출력을 측정하였다. 이 시스템은 우주전파 신호를 분석하는 수신기 backend로서 기존의 전파분광기에 비해 높은 안정성과 채널확장에 유리하다. 특히 고집적, 고분해능, 다채널의 CCD가 개발됨에 따라 우주전파의 신호처리에 다양하게 응용될 수 있다. 이러한 음향광학 분광기의 제작은 수신기 backend의 다양화를 통한 우주전파 신호의 정확한 측정, 그리고 우주를 보는 새로운 창을 여는데 기여할 것이다. 앞으로 광학계 부품을 보완하여 2,048채널을 확보하는 일은 추후의 연구과제이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] R. Adler, "Interaction between Light and Sound", *IEEE Spectrum*, pp. 42-54, May, 1967.

- [2] 海部先男, “音響光學效果による宇宙電波分光”, 應用物理, 第52卷, 第12號, pp. 1027-1031, 1983.
- [3] Michael Bass et al., *Handbook of Optics* Vol. II, McGraw Hill, New York, pp. 1237-1254, 1995.
- [4] T. Takano et. al., “A 1.5-m Millimeter-Wave Telescope with Acousto-Optical Spectrometers at Nagoya University”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, pp. 323-335, 1983.
- [5] J. Wang and J. Shen, “The Frequency Resolution of Acousto-Optical Spectrometer”, *Chinese Journal of Acoustics*, vol. 10, no. 1, pp. 47-52, 1991.
- [6] C. R. Masson, “A Stable Acousto-Optical Spectrometer for Millimeter Radio Astronomy”, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 114, pp. 270-274, 1982.
- [7] B. A. Saleh and M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, John Wiley & Sons, New York, pp. 799-831, 1991.
- [8] A. Korpel, “Acousto-Optics – A Review of Fundamentals”, *Proceeding of the IEEE*, vol. 69, no.1, pp. 48-53, Jan., 1981.
- [9] E. I. Gordon, “A Review of Acousto-optical Deflection and Modulation Device”, *Proceeding of the IEEE*, vol. 54, no. 10, pp. 1391-1401, Oct., 1966.
- [10] N. Uchida and N. Niizeki, “Acoustooptic Deflection Materials and Techniques”, *Proceeding of the IEEE*, vol. 61, no. 8, pp. 1073-1092, 1973.
- [11] D. K. Milne and T. W Cole, “A Broad-band Radio Astronomy Spectrometer”, *Proceedings of the IREE Australia*, pp. 43-47, Mar., 1973.
- [12] C. R. Masson, “The design of stable Acousto-Optical Spectrometers for Radio Astronomy”, *Proceedings of SPIE*, vol. 232, 1980.
- [13] J. Sapriel, *Acousto-Optics*, John Willy & Sons, England, pp. 54-83, 1979.

임 인 성



1979년 2월 : 충남대학교 공과대학 (공학사)

1986년 2월 : 충남대학교 대학원(공학석사)

1996년 2월 : 충남대학교 대학원 전자공학과 박사과정 수료

1986년 12월~현재 : 한국표준과학연구원 부설 천문대 선임 연구원

오 승 업



1971년 2월 : 연세대학교 전기공학과(학사)

1973년 2월 : 연세대학교 전기공학과(석사)

1982년 8월 : 연세대학교 대학원(공학박사)

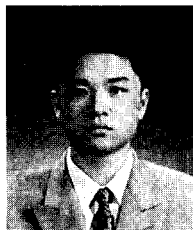
1980년 8월~1981년 8월 : 일본 동북대학 전기통신연구소 객원 연구원

1985년 5월~1986년 5월 : 미국 펜실바니아 주립대학 전기과 객원 연구원

1975년 10월~현재 : 충남대학교 전자공학과 교수

[주 관심분야] 초고주파 회로, 안테나 공학 및 위성통신 등

최 재 현



1995년 2월 : 충남대학교 전자공학과  
(공학사)

1997년 2월 : 충남대학교 전자공학과  
(공학석사)

1997년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 전자  
공학과(박사과정)