

# 우주전파 관측을 위한 광대역 음향광학 전파분광기 설계

## Design of a Wide-band Acousto-Optical Spectrometer for Radio Astronomical Observations

임인성\* · 민경일\*\* · 오승엽\*\*\*

In-Sung Yim\* · Kyoung-Il Min\*\* · Seung-Hyeub Oh\*\*\*

### 요 약

우주전파의 신호를 관측하기 위한 1 GHz 대역의 음향광학 전파분광기를 설계·제작하였다. 이 전파분광기는 다중채널 방식의 신호의 세기가 미약한 우주 전파신호를 분석하기 위한 초고감도의 전파 분광기로, 관측되는 스펙트럼의 모양을 상세히 측정할 수 있는 전파분광기이다. 주파수 분해능과 광대역 주파수 성분을 포함하는 이 음향광학 전파분광기의 광원(optical source)으로는 He-Ne 레이저를 사용하였고, 1 GHz에서 2 GHz까지의 대역폭을 갖는 광대역 GaP 광편향 소자를 사용하였으며, 광신호 검출을 위해 2,048 채널의 CCD를 사용하였다. 전파망원경을 통해 우주전파신호인 CRL 2688, IRC 10216 그리고 NGC 5005 은하 중심의 12CO(J=1~0) 분자선(molecular line)을 관측한 결과, 광대역의 특성을 가지며 주파수 분해능이 양호함을 확인하였다.

### Abstract

The acousto-optical spectrometer is designed by using 1 GHz bandwidth acousto-optic deflector for radio signal analysis. This system is a high resolution wide band spectrometer which uses 1 GHz bandwidth and a total of 2,048 channel charge coupled device. When we measured the spectrums of signals deflected by acousto-optical spectrometer, we confirmed the stability of the total system by repetitive observations of the same frequency, and each part of the system worked well. We installed this system onto 60 cm radio telescope, and observed 12CO(J=1~0) emission lines around CRL 2688, IRC 10216 and NGC 5005 Galaxy center. We could observe effectively very narrow band width radio spectrum as well as wide band radio spectrum. We also confirmed high sensitivity and resolution in observation of 12CO(J-10) emission line of NGC 5005 Galaxy center which is a weak signal.

### 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 열

리고 있다. 또한 밀리미터파 관측기술의 발달과 함께 수신 신호를 분석하고 처리하는 수신 후단(back-end)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

음향광학(acousto-optic) 효과는 1922년 Brillouin<sup>[1]</sup>이 음파에 의한 빛의 회절 효과 즉, 매질을 통과하는 광파는 음파에 의해 회절된다는 이론을 제안한

\* 한국천문연구원(Korea Astronomy Observatory)

\*\* 영동대학교 정보전자공학부(Dept. of Information & Comm. Eng., Youngdong Univ.)

\*\*\* 충남대학교 전자공학과(Dept. of Electronics Eng., Chungnam National Univ.)

· 논문번호 : 20010725-099

· 수정완료일자 : 2001년 9월 25일

후에 연구가 진행되었으며 1960년대 초에 높은 간섭성을 가진 레이저의 개발과 초고주파 공학이 발전되면서 높은 주파수를 가진 음파와 빛의 상호작용에 대한 연구가 진행되었다.<sup>[2]~[4]</sup> 1962년 Lambert<sup>[5]</sup>에 의해 우주전파 신호분석에 음향광학효과를 이용한 전파분광기에 관한 연구가 제기된 후, 회절효과를 이용한 광편향 소자(acousto-optic deflector)의 개발과 함께 전파 신호를 처리하는 음향광학 전파분광기에 관한 연구가 진행되고 있다<sup>[6],[7]</sup>.

우주전파의 분석에 있어서 주요한 요인으로는 감도, 주파수 분해능 그리고 대역폭이다. 우주전파 신호는 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>[8],[9]</sup> 전파분광기는 선 스펙트럼(line spectrum) 전파를 관측하기 위한 것으로 수신 전파를 주파수에 따른 세기 즉, 전파세기 스펙트럼을 측정하는 장치이다. 음향광학 전파분광기는 다중채널 검출기를 사용함으로써 신호의 분해능을 좋게 할 수 있고, 안정성이 높으며 기존의 분광기와 비교해서 복잡하지 않다는 장점이 있다.<sup>[10]~[13]</sup> 일반적으로 전파망원경을 보유한 관측소에서는 우주 전파를 분석하기 위해 여러 가지 방식의 전파분광기를 자체적으로 설계, 제작하고 있으며 새로운 방식의 전파분광기를 개발하고 있다.

본 논문에서는 레이저와 광학 시스템을 사용하여 빔을 유도하고, 전파신호를 광편향 소자에 의해 초음파로 변환하여 레이저빔을 회절시키는 새로운 방식의 전파 분광기를 설계, 제작하였다. 광원으로는 He-Ne 레이저를 사용하였으며, 1 GHz에서 2 GHz까지의 대역폭을 갖는 광대역 GaP 광편향 소자를 사용하였다. 또한 광신호 검출을 위해 2,048 채널의 CCD를 사용하였다.

## II. 음파에 의한 빛의 회절

### 2-1 광파와 음파의 상호작용

광학물질의 굴절률은 음파에 의해 변화된다. 음파는 광파를 변화시킨다. 이를 음향광학 효과라고

한다<sup>[5]</sup>. 음파는 매체의 속도특성을 가지고 이동하는, 파형을 갖는 동적 스트레인(dynamic strain)이다<sup>[2],[14]</sup>. 이 성질을 이용하여 음파로 광을 제어할 수 있다.

광학물질에 음파가 가해지면 음파가 갖는 주파수에 비례하여 광학 물질의 밀도가 달라지게 된다. 이와 같이 광학 물질의 밀도가 달라짐에 따라 광의 굴절이 달라지므로 이에 따른 브레그 현상을 이용하면 음파가 가지는 정보 또는 스펙트럼을 분석할 수 있다. 광자에 대하여 투명한 매질 내에서 파장이  $\lambda$  인 평면 광파와 또 다른 파장이  $\lambda^*$ 인 평면 초음파의 상호 작용으로, 압전변환기(transducer) 통하여 발생된 초음파에 의해 매질 내에서 주기적인 굴절률의 변화가 일어난다.<sup>[15],[16]</sup> 그림 1은 음파에 따른 굴절률의 변화를 나타낸다. 주기가  $\Lambda$ 인 패턴에서 음파의 속도에 따른 이동과 음파의 파장을 나타낸다. 매체가 밀한 영역(compression region)에서 밀도가 증가하고 굴절률이 커진다. 반면에 매체가 소한 영역(rarefaction region)에서는 밀도와 굴절률이 작아진다. 음파는 평형 위치에 대한 분자의 진동을 갖기 때문에, 광학적 편광을 변화시키고 굴절률을 변화시킨다. 음향광학 이론은 음파에 의해 야기된 굴절률의 변화와 시간에 따라 변화하는 비균일 매질을 통한 광파의 전파를 다루게 된다.

광파의 주파수가 음파의 주파수보다 매우 크기 때문에, 음파에 의해 변화된 매체에서 굴절률의 변화는 일반적으로 광학적 주기와 비교해 매우 느리다. 따라서 매체내에서 광파와 음파에 대한 2개의 다른 시간 척도(scale)가 존재한다. 결국, 광파의 전파 문제가 상대적으로 느린 음향 주기 동안의 각 순간에, 마치 고체의 비균일 매질에서와 같이 각각 해

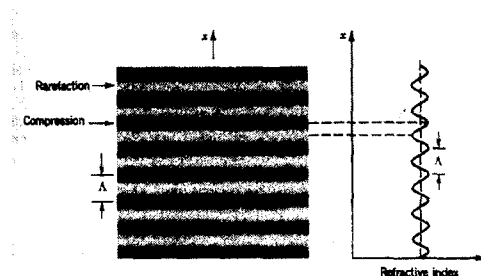


그림 1. 음파에 따른 굴절률의 변화  
Fig. 1. Variation of the refractive index accompanying a sound wave.

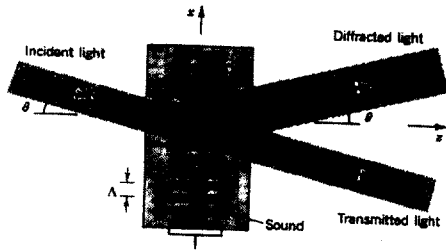


그림 2. 브레그 회절  
Fig. 2. Bragg diffraction.

결된다. 음향광학은 음파에 의해 제어되는 비균일 매질의 광파가 된다.

그림 2는 광파와 음파의 가장 단순한 상호작용 형태를 나타내는 브레그 회절을 나타낸다. 음파의 파장  $\lambda$ 에 의해 분리된 평행 반사면은 입사각  $\theta$ 가 브레그 조건을 만족하는 경우 광파를 반사한다. 이를 브레그 회절이라 한다. 즉, 입사각  $\theta$ 가 식 (1)을 만족하면 브레그 회절을 일으킨다.

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{2A} \quad (1)$$

식 (1)을 브레그 각 또는 브레그 조건이라 한다. 여기서  $\lambda$ 는 매질에서 광의 파장이다. 광파와 음파의 상호작용 효과를 브레그 회절, 브레그 반사, 브레그 산란이라고 알려져 있다. 이 효과를 갖는 장치를 브레그 반사기(Bragg reflector), 브레그 편향기(Bragg deflector), 브레그 셀(Bragg Cell)이라 한다. 그림에서 입사각  $\theta$ 가 브레그 조건을 만족할 때 음향 평면 파는 광파의 편향기로 동작한다.

## 2-2 브레그 회절<sup>[2]</sup>

속도  $v_s$ , 주파수  $f$ , 파장  $\lambda = v_s/f$ 인 매질에서  $x$  방향으로 진행하는 음향평면파를 생각하면, 위치  $x$ , 시간  $t$ 에서의 상대 변위는 다음 식 (2)와 같이 표현된다.

$$s(x, t) = S_0 \cos(\Omega t - qx) \quad (2)$$

여기서  $S_0$ 는 진폭,  $\Omega = 2\pi f$ 는 각 주파수이고  $q = 2\pi/\lambda$ 는 파수이다. 음파 강도 ( $W/m^2$ )는 다음 식 (3)과 같다.

$$I_s = \frac{1}{2} \rho v^3 S_0^2 \quad (3)$$

여기서  $\rho$ 는 매체의 질량밀도이다. 이 매체는 광학적으로 투명하고, 음파가 없을 때 굴절률을  $n$ 이라 가정하면, 상대 변위는 굴절률의 비례 편이를 발생하며, 식 (4)로 표현한다.

$$\Delta n(x, t) = -\frac{1}{2} p n^3 s(x, t) \quad (4)$$

여기서  $p$ 는 광탄성 상수이다. -부호는 +음파의 경우 굴절률이 감소됨을 나타낸다. 음파를 어떤 매질에 가했을 때 매질이 갖게 되는 굴절률은, 하나의 파의 형태로 시간에 따라 변화하는 비균일 굴절률을 갖는다. 위치  $x$ , 시간  $t$ 에서의 굴절률은 식 (5)와 같다.

$$n(x, t) = n - \Delta n_0 \cos(\Omega t - qx) \quad (5)$$

여기서

$$\Delta n_0 = \frac{1}{2} p n^3 S_0 \quad (6)$$

식 (3)을 식 (6)에 대입하면 굴절률의 미소변화는 식 (7)과 같고, 이는 음파 강도의 제곱근에 비례함을 알 수 있다.

$$\Delta n_0 = \left(\frac{1}{2} u I_s\right)^{1/2} \quad (7)$$

여기서  $u = \frac{p^2 n^6}{\rho v_s^3}$ 는 음향광학 효과의 강도를 나타내는 지수이다.

주파수  $\nu$ , 각속도  $\omega = 2\pi\nu$ , 자유공간에서의 파장  $\lambda_0 = c_0/\nu$ , 파수  $k = n\omega/c_0$ 에 해당하는 매체에서, 파장  $\lambda = \lambda_0/n$ 로 매체를 통과하는 광학평면파를 생각한다. 그림 2와 같이  $x$ - $z$ 평면에 파 벡터  $k$ 와  $z$ 축을 따라 각도  $\theta$ 를 생각한다. 음향주파수  $f$ 가 광학주파수  $\nu$ 에 비해 매우 적을 때, 사인 함수로 굴절률을 표시하면 다음 식 (8)과 같다.

$$n(x) = n - \Delta n_0 \cos(qx - \psi) \quad (8)$$

여기서  $\psi$ 는 고정된 위상이다.

식 (8)에서  $\psi = \Omega t$ 를 취하면 작은 변화를 볼 수 있으며 비균일 매체로부터 반사된 광파를 결정한다.

### Ⅲ. 광편향 소자

광편향 소자(AOD: acousto-optic deflector)는 초음파가 진행하는 투명한 매질로 구성되는 광 변조기 또는 광 편향기이다<sup>[2]</sup>. 음파는 진행파이거나 정지파일 수 있고, 평면파이거나 광선과 상호 작용하는 영역에 초점으로 모아질 수도 있다. 이 초음파는 압전 변환기에 의해 발생된다. 이 압전 변환기는 증착으로 만들어지는 세라믹이거나 얇은 판으로 된 단 결정 물질로 구성된다<sup>[17]</sup>. 광 편향기와 변조기내에서 레이저 출력인 입사광의 양은 초음파와의 상호작용에 의해 굴절계수의 주기적인 변화가 발생하고 한 방향 또는 그 이상의 방향으로 편향된다. 브레그 회절을 이용하면, 투명 매질 내에서  $f^*$ 의 주파수를 갖는 초음파를 변화시킴으로써 레이저 빔의 편이  $\lambda f^*/v$ 가 제어될 수 있다. 브레그 회절은 모든 입사에너지를 한 방향과 시간에 따라 편향된 파를 발생시킬 수 있다.

#### 3-1 스펙트럼 분석기로서의 광편향 소자

브레그 조건에서  $\theta = \sin^{-1} \frac{\lambda}{2A} = \sin^{-1} \frac{A}{2v_s} \approx \frac{A}{2v_s}$  이 빔을 앞에서 보았다. 이식에서 보면 브레그 각  $\theta$ 는 음파가 가지는 주파수와 비례함을 알 수 있다. 따라서 이러한 성질을 이용하여 전기적인 신호를 음파로 바꾸어 광편향 소자에 적용시킴으로써 원하는 전기적인 신호의 스펙트럼을 분석할 수 있다.<sup>[2], [4], [13]</sup> 이를 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서 전기적인 입력 신호는 압전기를 통하여 초음파로 바뀌게 되고 이때 이 초음파는 입력신호와 같은 스펙트럼

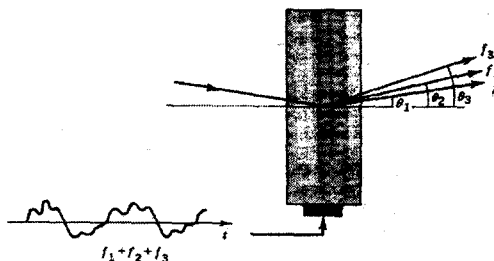


그림 3. 스펙트럼 분석기로서의 광편향소자  
Fig. 3. Acousto-optic deflector as a spectrum analyzer.

의 분포를 갖는다. 이 초음파의 푸리에 변환은 광편향 소자 또는 브레그 셀을 통하여, 브레그 조건에 의해 렌즈의 초점 평면에 빔의 분포를 나타나게 된다. 그림에서와 같이 음파로 변환된 여러가지 주파수 성분들은 광학 빔을 다른 방향으로 회절시킨다. 이 음향광학 셀은 스펙트럼 분석기로 동작하게 된다. 이때 빔의 분포에 들어있는 입력신호의 순간전력 스펙트럼은 음파성분의 세기에 비례하고 주파수에 따른 회절각도에 따라 반사하게 된다. 그림에서  $f_1, f_2, f_3$ 의 주파수 성분을 갖는 음파의 회절을 볼 수 있다. 이와 같이 광편향 소자는 스펙트럼 분석기로 동작하게 된다.

#### 3-2 음향광학 전파분광기의 동작원리

음향광학 전파분광기 시스템은 레이저 공진기, 광학 시스템, 광편향 소자(AOD) 그리고 CCD로 구성된다. 그림 4는 음향광학 전파분광기 블록 다이어그램을 나타낸다. 광편향 소자의 입력에 파장  $\lambda$ 의 레이저 광을 입사시키고, 광편향 소자의 다른 입력부인 압전소자에 수신전파인 중간주파수  $f$ 를 입력하면 광편향 소자의 결정(crystal)은 레이저 광에 대하여 회절격자의 역할을 하며, 레이저 광은 초음파의 각 파면에서 편향된다. 편향된 광의 세기는 전파 세기에 비례한다. 또한 편향각  $\theta$ 는 입력된 주파수에 비례하기 때문에  $\theta = (\lambda \cdot f / v)$  레이저 광이 편향되는 방향에 선형 영상 CCD 로 검출하면 입력된 전파의 중간주파수  $f$ 의 분광이 가능하게 된다.

광편향 소자를 통과한 레이저 빔은 초음파로 변환된 IF 전기신호와 상호작용에 의해 편향되며,

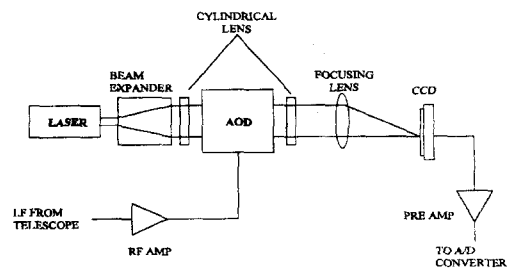


그림 4. 음향광학 전파분광기의 블록 다이어그램  
Fig. 4. Block diagram of an acousto-optical spectrometer.

이 편향된 빔은 CCD 어레이에 의해 검출된다. 시스템은 주파수 대역폭, 채널, 분해능을 고려하여 설계 목표치를 정하여 제작한다. 결국 시스템의 성능은 이들 설계 목표치가 된다.

#### IV. 실험 및 고찰

##### 4-1 광학 시스템의 설계 및 제작

레이저빔을 광편향 소자로 유도하기 위한 빔유도 장치를 설계하고 제작하였다. 광원으로는 파장이 632.8 nm 이고 최대 출력이 5 mW인 He-Ne 레이저를 사용하였다. 출력을 안정하게 하기 위해서는 구동전원의 안정성이 중요하다. 레이저의 발진 파장은 정선의 온도에 따라 변하기 때문에 구동전원은 매우 안정되어야 한다. 미약한 신호를 장시간 동안 적분하여 그 세기를 측정할 때, 출력의 불안정성은 큰 측정오차의 요인이 될 수 있다. 따라서 레이저의 동작 시에, 전류나 온도의 변화에 대해서도 안정된 모드의 설정이 필요하다.

광파를 광편향 소자로 유도하고 회절된 빔을 조정하기 위한 광학 시스템을 설계하였다. He-Ne 레이저의 광 출력은 5 mW로 비교적 작으므로 광 출력을 가능한 유효하게 할 수 있도록 설계하였다. 광학소자의 표면에서 반사광을 적게 하고, 광축등의 조정을 쉽게 하기 위해 가능한 적은 수의 광학소자로 광학 시스템을 구성하였다. 레이저와 광학부품들은 Melles Griot 사의 제품을 사용하였다. 그림 5에서와 같이 출력된 레이저 빔은 빔 확대기를 통하여 빔의 크기 3배로 확대할 수 있도록 하였다. 빔 확대기는 빔의 입사각을 확대함으로써 레이저 빔의 크기를 2배에서 6배까지 확장할 수 있는 프리즘을 사용하였다. 그림 5에서와 같이 2개의 빔 확대기의 간격과 각도를 조절하여 빔의 크기를 조절하였다. 본 실험에서는 수직 축을 기준으로  $a_1$ 의 각도를 32.5°,  $a_2$ 의 각도를 2.5°로 설계하여 레이저 빔의 크기를 3배로 확대하였다. 빔 확대기를 통과한 빔은 타원형 렌즈를 통과한 후 광편향 소자에 입력된다. 타원형 렌즈는 초점거리가 12.7 mm이며 빔을 평행광으로 유지하기 위한 목적으로 사용된다. 광편향 소자의 좌우에 타원형 렌즈를 두어 입사광과 반사광

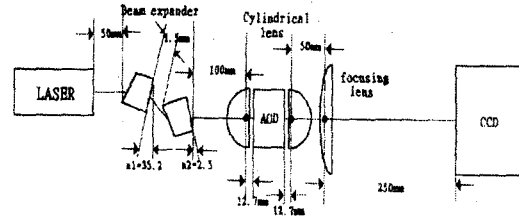


그림 5. 설계된 광학 시스템의 블럭 다이어그램  
Fig. 5. Block diagram of a designed optics system.

을 평행광으로 보정하였다. 광편향 소자 표면에서 레이저광의 반사를 최소로 하기 위하여 타원형 렌즈의 표면을 코팅하여 반사를 최소화하고 감쇄를 줄이도록 설계하였다. 타원형 렌즈를 통과한 빔은 초점 렌즈를 통하여 CCD 표면상에 모이게 하였다. 초점 렌즈는 초점거리가 250 mm이며, 비점 수차가 적은 렌즈를 사용하여 빔의 찌그러짐을 방지하였다. 광편향 소자를 통과한 레이저빔은 초음파로 변환된 전기신호와의 상호작용에 의해 회절되며, 이 회절된 빔은 CCD 어레이에 의해 검출되도록 설계하였다. 이 설계에 따라 광학 시스템의 실험을 통해 설계의 정확성을 확인하였다. 이 실험은 광학 벤치상에서 진동이 없고 빛이 차단된 안정된 실험 환경을 유지하였다. 광학 부품의 위치, 각도, 초점거리등에 따라 빔의 크기와 모양이 달라짐으로 반복 실험을 통해 안정성을 유지하도록 설계하였다. 그림 5는 설계된 광학 시스템의 블럭 다이어그램을 나타낸다.

##### 4-2 광학 마운트의 설계 및 제작

설계된 광학 시스템에 따른 광학 마운트를 제작하였다. 광학 마운트는 위 절에서 설계된 광학 소자들을 고정하고, 위치를 이동하기 위한 기계적 부품으로 구성된다. 광학 마운트는 광학 레일위에 x, y축을 따라 이동, 회전이 가능하도록 translator, rotator로 조정할 수 있도록 하였다. 또한 각 광학부품을 위한 고정하기 위한 홀더(holder)등은 광학 시스템을 구성하는 각 부품에 맞게 제작되었다. 광학 시스템 마운트의 재질은 알루미늄이며 양면을 검정색으로 피막 처리하여 외부로부터 빛의 간섭을 없애도록 하였다. 위 절에서 설계, 제작된 광학 시스템이

이 광학 마운트의 내부에 위치하여 안정된 광학 시스템을 유지하도록 하였다. 이 마운트의 규격은 750 × 200 × 300 mm이다.

### 4-3 GaP 광편향 소자

음향광학 전파분광기의 대역폭과 주파수 분해능은 광편향 소자의 주파수 대역폭과 분해점수(spots number)에 따라 결정된다. 따라서 분광기의 설계시 관측 대상과 목적에 따라 이를 결정하여 제작하게 된다. 실제로 광편향 소자를 사용하여 음향광학 전파분광기를 제작할 때에는 광편향 소자의 입력 전력을 낮게하여 광편향 소자의 온도 상승을 막고, 초음파의 전파 속도를 일정하게 하여야 한다. 또 선형성을 유지하기 위해 최대 회절 효율의 10% 이내에서 사용하여야 하며 초음파의 감소를 피하기 위하여 낮은 주파수의 광편향 소자를 사용하는 것이 바람직하다. 초음파의 감소는 주파수의 제공에 비례하며 고주파일 때 크게 된다. 즉, 광편향 소자에 입력되는 신호가 저주파일수록 광편향 소자의 분해능을 높게 된다. 본 연구에서는 주파수 범위가 1 GHz에서 2 GHz이고 대역폭이 1 GHz인 광대역 광편향 소자를 사용하였다. 이는 광 대역용의 광편향 소자로 대역폭이 1 GHz에 걸쳐 있으므로 비교적 분자선이 넓은 대상의 전파에 적합하며, 우리가 보유한 전

표 1. 광편향소자 GPD-150-100의 규격  
Table 1. Specification of the acousto-optic deflector GPD-150-100.

구분	특성	구분	특성
광파장	633(nm)	회절각도 (deg)	5.7°
주파수범위	1,000~2,000 (MHz)	최대회절효율	10%
중심주파수 (MHz)	1,550(MHz)	최대입력전력 (W)	1
대역폭 (MHz)	1,000(MHz)	Access time (μsec)	1.0
분해점수	1,000(spots)	입력임피던스 (ohm)	50
분해능	1,000(kHz)	제작회사	Brimrose Co., USA

파망원경 수신기의 IF 주파수인 1.4 GHz를 별도의 주파수 변환없이 광편향 소자의 입력으로 사용할 수 있는 잇점이 있다. 이 광편향 소자는 Brimrose Corporation of America사의 Gallium Phosphide (GaP) 소재인 GPD-150-100으로 주파수 대역폭은 1 GHz에서 2 GHz로 광 대역 소자이다. 분해점수는 1,000개이며 1 MHz의 분해능을 갖는 광편향 소자이다. 중심주파수는 1.5 GHz, 회절효율은 0.8 W에서 17%, Bragg 각은 5.7도이다.

### 4.4 CCD 구동회로의 제작 및 실험

광편향 소자를 통과한 빔의 유도를 최적화하고 회절된 1차광을 CCD로 검출하여 구동회로를 제작하였다. CCD는 일본 OKI Semiconductor사의 2,048 채널인 OPA2048CA를 사용하였다. OPA2048CA CCD는 2,048개의 다이오드로 구성되었으며, 고집적도를 갖는 소자로 높은 분해능을 얻을 수 있다. 광편향 소자를 통과한 빔의 유도를 최적화하고 회절된 1차광을 CCD로 검출하는 구동회로를 제작하여 CCD 구동회로가 양호하게 동작함을 확인하였다. 본 실험에서는 신호발생기(sweep generator)를 사용하여 1 GHz에서 2 GHz까지 주파수를 입력하였다. 레이저에서 발생한 레이저 빔은 광학 시스템을 거쳐 광편향 소자의 입력이 되며 신호발생기에서 발생된 신호 역시 광편향 소자의 입력신호가 된다. 이 전파신호는 초음파로 변환되고 주파수와 신호세기에 따라 레이저 빔을 회절 시킨다. 회절된 광신호는 CCD 구동회로에서 검출되도록 하였다. 검출된 신호는 스펙트럼 분석기로 그 출력을 볼 수 있도록 하였고, 또한 인터페이스를 통하여 PC로 분석할 수 있도록 하였다.

## V. 관측결과 및 토의

제작된 음향광학 전파분광기를 60 cm 전파망원경에 설치하여 우주전파를 관측하였다. 60 cm 전파망원경은 수신 주파수 대역이 85 GHz에서 116 GHz로 밀리미터파 우주전파를 수신하며 중간주파수는 1.4 GHz이다. CRL 2688 은하 중심의 12CO(J=1-0) 분자선(molecular line)과 IRC 10216 은하 중심의 12

CO(J=1-0) 분자선 관측 결과를 그림 6과 그림 7에 나타내었다.

12CO(J=1-0) 방출선의 중심주파수는 115.271204 GHz이고, 수신기를 통과한 중간주파수는 1.4 GHz이다. 그림의 가로축은 국부 표준 기준 좌표계의 속도( $V_{LSR}$ : Velocity of local standard of rest)를 나타내고, 세로축은 전파의 세기를 나타낸다. 국부 표준 기준 좌표계는 태양계 근처의 기준점에 대한 상대 속도를 나타낸다. 세로축은 안테나에 수신된 전파의 세기를 온도 단위로 표현한 것으로 안테나 온도를 나타낸다. 그림 6과 그림 7에서 CRL 2688 은하 중심의 12CO(J=1-0) 관측 전파 분자선과 IRC 10216 은하 중심의 12CO(J=1-0) 관측 전파 분자선을 보면 방출 분자선이 매우 좁다는 것을 알 수 있다. 그림 6에서 CRL 2688 은하 중심의 12CO(J=1-0) 분자선을 관측한 결과를 보면, 이 분자선은 시스템 온도로 표현한 세로축의 전파의 세기가 0.8 정도로 그 세기가 약한 전파임을 알 수 있다. 그림에서와 같이 설계된 음향광학 전파분광기가 전파의 세기가 약한 전파를 양호하게 잘 관측할 수 있음을 알 수 있다. 또한 베이스 라인에 걸쳐 있는 다른 주파수 성분들도 상세하게 관측할 수 있었다. 이는 높은 주파수 감도를 나타내고 광대역의 주파수를 처리할 수 있음을 보여준다.

그림 7은 IRC10216 은하 중심의 12CO(J=1-0) 분자선을 관측한 결과이다. 이는 전파의 세기가 그림 6에 비해 큰 분자선이다. 시스템 온도로 표현한 세로축의 전파의 세기가 3.8 정도이고 분자선이 좁

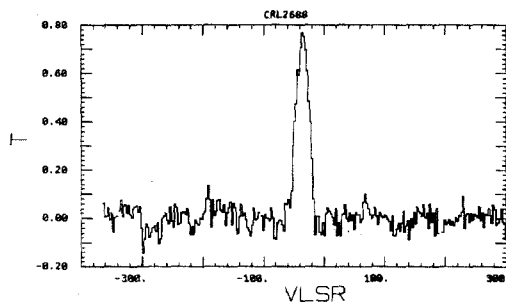


그림 6. CRL 은하 중심의 12CO(J=1-0) 방출선  
Fig. 6. 12CO(J=1-0) emission line of CRL 2688 Galaxy center.

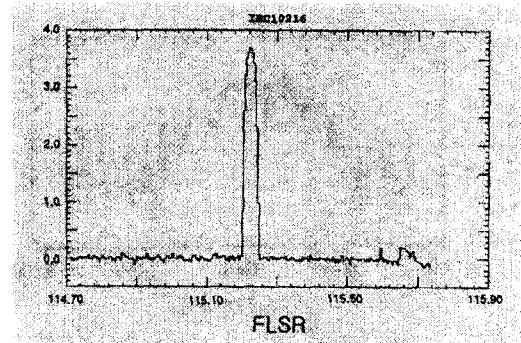


그림 7. IRC 10216 은하 중심의 12CO(J=1-0) 방출선  
Fig. 7. 12CO(J=1-0) emission line of IRC 10216 Galaxy center.

은 것을 알 수 있다. 그림에서와 같이 전파를 양호하게 잘 관측할 수 있음을 알 수 있다. 그림의 가로축은 국부 표준 기준 좌표계의 주파수( $F_{LSR}$ : Frequency of local standard of rest)를 나타내고, 세로축은 전파의 세기를 나타낸다. 국부 표준 기준 좌표계는 태양계 근처의 기준점에 대한 상대 주파수를 나타낸다.

그림 8은 NGC 5005 은하 중심의 12CO(J=1-0) 방출선을 관측한 결과이다. 가로축은 국부 표준 정지 좌표계의 속도  $V_{LSR}$ 를 나타낸다.  $V_{LSR}$ 은 태양계 근처의 기준점에 대한 상대속도를 나타낸다. 즉  $V_{LSR}$ 은 공학적으로는 주파수 측과 같다. 그러나 주파수 측으로 표현하면 도플러 효과 때문에 중심주파수에서 이동된 오차를 갖게 됨으로 천문학적으로는  $V_{LSR}$ 로 상대속도를 표현한다. 이는, 수학적으로 표현하면  $\frac{\Delta\nu}{c} = \frac{\Delta f}{f}$  이므로, 주파수 영역을 속도 영역으로 변환하여 관측할 수 있다. 즉,  $\Delta\nu = \frac{c \Delta f}{f}$  를 구하면 시간당 속도를 나타낼 수 있다. 또한 세로축은 전파를 세기를 온도 단위로 표현한 것이다.

그림 8은 그림 6과 7에 비해 분자선의 대역폭이 넓음을 알 수 있다. 분자선을 넓게 확대하여 신호를 처리할 수 있는 능력은, 분해능을 좋게 하는 결과를 가져와 우주 전파스펙트럼을 자세히 볼 수 있다. 이는 분자선에 감추어진 전파의 스펙트럼을 관측하는데 도움을 준다. 그림 8에서 전파의 세기가 시스템 온도로 약 0.15인 매우 미약한 전파신호이며 대역

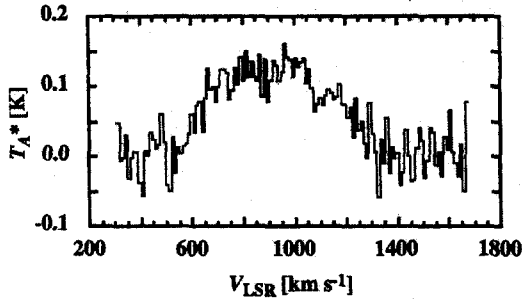


그림 8. NGC 5005 은하 중심의 12CO(J=1-0) 방출선  
 Fig. 8. 12CO(J=1-0) emission line of NGC 5005 Galaxy center.

폭이 넓은 분자선임을 알 수 있다. 이 미약한 전파 신호 스펙트럼을 관측할 수 있는 감도를 갖고 있음을 확인할 수 있다.

이와 같이 설계, 제작한 음향광학 전파분광기를 이용하여 관측한 결과, 분자선이 좁거나 큰 전파, 그리고 전파의 세기가 약한 분자선의 우주전파 신호도 잘 측정할 수 있었다. 이는 높은 감도와 주파수 분해능을 가진 전파분광기로 잘 동작하였음을 나타낸다. 또한 1 GHz의 대역폭의 광대역 주파수 스펙트럼을 나타내어 베이스 라인에 걸친 다른 주파수의 스펙트럼도 관측할 수 있었다. 다만 기존의 필터뱅크, 자기상관 전파분광기를 이용해 관측한 결과와 직접 비교할 수 없었다는 제한점이 있다. 이는 전파 망원경 구경의 크기, 시스템 온도에 따른 결과이다. 전파분광기간 직접비교를 위해서는 단일 망원경에 각각의 전파분광기를 설치하여 전파신호를 관측하여만 가능하다. 관측 전파 분자선의 전파분광기간의 직접 비교는 앞으로의 연구과제이다.

## VI. 결 론

본 연구에서는 대역폭이 1 GHz의 광대역 광편향 소자를 사용한 음향광학 전파분광기를 설계하였다. He-Ne 레이저를 광원으로 이용하였으며 레이저빔을 유도하는 광학 시스템을 설계하였다. 광편향 소자를 통하여 초음파에 의해 회절된 1차광을 CCD로 검출하기 위한 CCD 구동회로와 인터페이스 카드를

제작하였다. PC를 통해 신호를 분석하기 위한 프로그램을 개발하였다.

이 시스템은 대역이 1GHz인 광편향 소자와 2,048 채널의 CCD를 사용하여 광대역, 고 분해능의 전파 분광기로, 광편향 소자를 통해 회절된 신호의 스펙트럼을 측정한 결과 양호하게 동작하였으며, 동일 주파수의 반복적인 관측을 통해 전체 시스템의 안정성을 확인하였다. 또한 전파망원경에 설치하여 관측한 결과, 우주전파 신호를 분석하는 수신 후단으로서 광대역 관측은 물론 분자선이 넓은 전파에도 효과적임을 확인하였다. 이 전파분광기를 전파망원경에 설치하여 CRL 2688 은하 중심의 12CO(J=1-0) 분자선과 IRC 10216 은하 중심의 12CO(J=1-0) 분자선 그리고 NGC 5005 은하 중심의 12CO(J=1-0) 분자선을 관측한 결과 대역폭이 넓은 전파 스펙트럼은 물론 분자선이 매우 좁은 영역의 전파 스펙트럼도 양호하게 관측하였다. 이 시스템은 현재 우리가 필터뱅크형 전파분광기와 자기상관분광기의 256 MHz 대역폭을 1 GHz까지 분광 능력을 확대하고, 1,024 채널을 2,048 채널까지 확장하였다는데 큰 의의가 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] I. Brillouin, "Diffusion of light and X Rays by a homogeneous Transparent Body", *Ann. Physics*, 9th Series, vol. 17, pp.88-122, 1922.
- [2] B. A. Saleh and M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, John Wiley & Sons, New York, 1991.
- [3] R. Adler, "Interaction between Light and Sound", *IEEE Spectrum*, pp. 42-54, May 1967.
- [4] J. Sapriel, *Acousto-Optics*, John Wiley & Sons, England, 1979.
- [5] L.B. Lambert, "Wide band instantaneous spectrum analyzers employing delay line light Modulators", *IRE Int. Conv. Re* 6, 69, 1962.
- [6] D. K. Milne and T. W. Cole, "A Broad-band Radio Astronomy Spectrometer", *Proceedings of the IREE Australia*, pp. 43-47, March 1979.
- [7] N. Kaifu, N. Ukita, Y. Chikada, and T. Miyashi, "A High resolution acousto-optical radio



spectrometer for millimeter-wave astronomy", *Publ., Astronomy Society of Japan*, vol. 29, pp. 429-435, 1977.

[8] A. Dowd, "Hybrid spectrometer user manual", *NRAO internal report*, no. 293, 1992.

[9] S. Weinreb, "Analog-Filter Digital-Correlator Hybrid Spectrometer", *IEEE Trans. on Instrum. Meas.*, vol. IM-34, no. 4, pp. 670-675, December 1985.

[10] 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.

[11] J. Wang and J. Shen, "The Frequency Resolution of Acousto-Optical Spectrometer", *Chinese Journal of Acoustics*, vol. 10, no. 1, pp. 47-52, 1991.

[12] C. R. Masson, "A Stable Acousto-Optical Spectrometer for Millimeter Radio Astronomy", *Astronomy and Astrophysics*, vol. 114, pp. 270

-274, 1982.

[13] C. R. Masson, "The design of stable Acousto-Optical Spectrometers for Radio Astronomy", *Proceedings of SPIE*, vol. 231, pp. 291-298, 1980.

[14] A. Korpel, "Acousto-Optics - A Review of Fundamentals", *Proceeding of the IEEE*, vol. 69, no. 1, pp. 48-53, January 1981.

[15] R. Schieder, V. Toll, and G. Winnewisser, *The Cologne Acousto-Optical Spectrometers, Experimental Astronomy*, Kluwer Academic Publ., 1989.

[16] N. Uchida and N. Niizeki, "Acoustooptic Deflection Materials and Techniques," *Proceeding of the IEEE*, vol. 61, no. 8, pp.1073-1092, 1973.

[17] E. I. Gordon, "A Review of Acoustooptical Deflection and Modulation Device", *Proceeding of the IEEE*, vol. 54, no. 10, pp.1391-1401, October 1966.

임 인 성



1979년 2월: 충남대학교 공과대학 (공학사)  
 1986년 2월: 충남대학교 대학원 (공학석사)  
 2000년 2월: 충남대학교 대학원 전자공학과(공학박사)  
 1989년 2월~1991년 1월: 미국 매

사추세추 주립대학 객원연구원  
 1986년 12월~현재: 한국천문연구원 책임연구원  
 [주 관심분야] 전파신호처리 및 분광시스템

민 경 일



1977년 2월: 울산대학교 전자공학과(공학사)  
 1984년 8월: 충남대학교 대학원 전자공학과(공학석사)  
 1995년 2월: 충남대학교 대학원 전자공학과(공학박사)  
 1996년 3월~현재: 영동대학교 정

보·전자공학부 부교수  
 [주 관심분야] 안테나 및 초고주파 회로

오 승 엽



1971년 2월: 연세대학교 전기공학과(공학사)  
 1973년 2월: 연세대학교 전기공학과(공학석사)  
 1982년 8월: 연세대학교 대학원(공학박사)

1980년 8월~1981년 8월: 일본 동북대학 전기통신연구소 객원 연구원  
 1975년 10월~현재: 충남대학교 전자공학과 교수  
 [주 관심분야] 초고주파 회로, 안테나 공학 및 위성통신 등