

서울전파천문대(SRAO) 6M 망원경의 ON-THE-FLY 관측 시스템 구축
DEVELOPMENT OF ON-THE-FLY(OTF) OBSERVATION METHOD FOR SEOUL RADIO
ASTRONOMY OBSERVATORY(SRAO) 6-METER TELESCOPE

강현우¹, 변도영², 박용선¹

¹서울대학교 지구환경과학부

²한국천문연구원

HYUN WOO KANG¹, DO-YOUNG BYUN², AND YONG-SUN PARK¹

¹Astronomy Program, SEES, Seoul National University, Seoul 151-747, Korea

E-mail: orionkhw@astro.snu.ac.kr

²Korea Astronomy Observatory, Whaamdong, Yooseong-ku, Daejeon, 305-348, Korea

(Received: November 15, 2005; Accepted: November 30, 2005)

ABSTRACT

On-The-Fly (OTF) observation method is developed for the efficient use of 6 M radio telescope at Seoul Radio Astronomy Observatory (SRAO). This technique, in which data and information of antenna position are recorded synchronously while driving a telescope regularly and rapidly across a field, provides more efficient use of telescope time and better calibration of the acquired data than the traditional point-to-point observation method does. For the realization of the method, we (1) added RT-Linux modules to the existing operating system, (2) replaced digital voltmeter with voltage-to-frequency converter, and (3) modified many SRAO observation programs. By observing Moon and G78.2+2.7 using this method and comparing them with previous observations, we verify the successful operation and efficiency of the OTF observation mode.

Key words: OTF – radio observation

1. 서론

서울전파천문대(Seoul Radio Astronomy Observatory; 이하 SRAO) 6M 망원경은 국내에서 두 번째로 밀리미터 대역에서 연구관측을 수행하기 위해 만들어졌다. 경면 정밀도는 80-270GHz 대역까지 관측이 가능하도록 조정되었으며 현재 85-115GHz 대역 수신기가 설치되어 관측에 사용되고 있다(Koo et al. 2003; Lee et al. 2004). 기존의 SRAO의 관측 시스템은 전파지도 작성을 위한 방법으로 격자점 관측 방식만을 지원하였다(Byun et al., 2003; Byun 2004). 이 방식은 일정 크기의 영역을 관측하기 위해 먼저 격자를 짜고 망원경이 각각의 격자점을 향하도록 한 후에 측정되는 신호를 누적하는 과정을 반복하는 방법이다. 그런데 전파망원경은 보통 관성이 크므로 어느 관측지점을 관측한 후 다음 지점을 정확히 지향하기까지 어느 정도의 대기시간이 필요하다. 이 대기시간은 특히 적분시간이 짧은 경우 노출시간 자체에 비해 상대적으로 많아져서 관측 효율이 떨어지게 된다.

On-The-Fly (이하 OTF) 방법은 이러한 문제점을 해결하기 위해 제시된 방법으로, 관측할 전체 영역을 일정한 속도로 훑어가며 연속적으로 자료를 취득하기 때문에 망원경의 위치 이동에 소요되는 대기시간을 없애준다(Mangum, J. 1999; Muders, D. 1999; Ungerechts, H. 1999; 강현우 2004). 또한 OTF 방식은 관측하고자 하는 영역을 짧은 시간 간격으로 여러 번 반복하여 데이터를 얻어내는 방식이므로 관측자에게 관측 영역에 대한 대략적인 정보를 관측 초기 단계에 주어서 효과적인 관측 계획을 세울 수 있도록 해준다. 또한 짧은 시간 간격으로 관측하면서 비교원을 자주 볼 수 있으므로 눈금조정(calibration)에도 정확성을 기할 수 있다는 장점도 알려졌다(Chung et al. 2005). OTF 방식은 기존 관측 방식에 비해 자료의 용량이 커지고 자료 처리 과정이 복잡하다는 단점이 있지만 최근 컴퓨터 하드디스크의 용량의 증가와 컴퓨터 처리 속도의 증가 등으로 큰 제한 조건은 되지 않는다. 실제로 OTF 방식은 CSO, FCRAO, NRAO

등 많은 전과전문대에서 활발하게 사용하고 있다.

2절에서 기존 관측 방식과 OTF 관측 방식에 대해 짧게 서술하였다. OTF 방식은 망원경이 연속적으로 이동하는 중에 자료를 획득해야 하기 때문에 망원경의 이동과 자료 획득과정이 지연 시간 없이 동기화되도록 하는 것이 가장 중요하다. 3절에서는 주로 OTF 구현을 위해 SRAO 망원경 제어와 자료획득을 동기화 시키는 방법에 대해 기술하였다. 그리고 4절에서는 SRAO 망원경을 이용해 달과 초신성 잔해를 관측하여 개발된 OTF 관측 모드를 테스트하고, 관측결과를 전통적인 방식으로 한 것과 비교하여 OTF 방식의 우수성을 보였다.

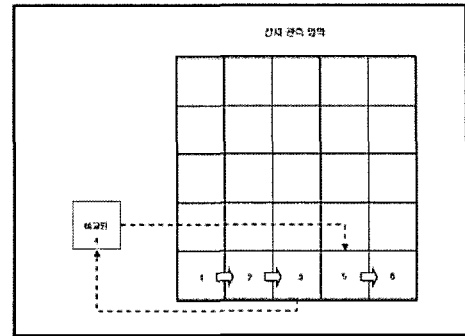


그림 1. 기존 관측 방식 관측 순서

2. 기존 관측 방식과 OTF 관측 방식의 비교

기존 관측 방식은 point-to-point 방식을 이야기하며 보통 천체를 관측할 때 기본적으로 행하는 방법이다. 곧 관측할 천체원과 비교원을 번갈아 관측하여 천체신호를 획득하는 과정이다. 실제 관측 과정은 그림 1과 같은데, 망원경은 관측할 영역으로 이동한 후 데이터를 획득하고서 다음 영역으로 이동하여 또 데이터를 얻는 과정을 반복하게 된다.

OTF 관측 방식은 기존 관측 방식처럼 한 점씩 이동한 후에 데이터를 취득하는 방식이 아니다. 그림 2와 같이 관측할 영역을 한번에 일정한 속도로 이동하면서 동시에 짧은 시간 간격으로 데이터를 계속 취득해나가면서 관측하게 된다. 이 경우 기존 관측 방식에서 생길 수 있는 망원경의 이동 간 생기는 불필요한 시간 낭비를 줄일 수 있다. 하지만 한번에 관측하는 한 점당 관측시간이 짧기 때문에 이러한 과정을 여러 번 반복하여 실제 관측 영역에 대한 전체적인 결과를 서서히 알 수 있게 된다.

기존 관측 방식은 좁은 영역이나 오랜 적분시간을 요하는 관측에 효과적인 방식이다. 그리고 얻어진 자료가 점 당 한 개씩 생성되므로 처리하기가 비교적 쉽다. 이에 반해 OTF 관측 방식은 한 점 당 여러 데이터가 생기므로 데이터양이 상당히 많아진다. 하지만 넓은 영역을 관측하는 경우에 망원경을 보다 더 효율적으로 쓸 수 있다. 기존 관측 방식에서 생기는 망원경의 이동 간에 생기는 지연시간이 줄어들고, 거칠기는 하지만 넓은 영역에 대한 초기 관측 자료로부터 관측하고자 하는 대상의 윤곽을 볼 수 있으므로 관측자로 하여금 관측 계획을 세우는데 도움을 줄 수 있다.

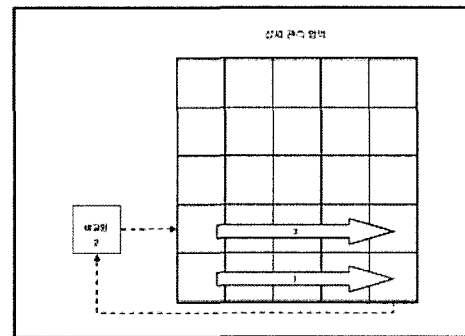


그림 2. OTF 관측 방식 관측 순서

3. SRAO OTF 관측 시스템 개발

SRAO OTF 관측 시스템은 네 대의 독립적인 PC로 구성이 되며 운영체제로 리눅스를 사용하고 있다. 제어 프로그램은 C/C++ 언어로 개발되었으며 관측자료 분석은 GILDAS 패키지를 사용한다. 각 컴퓨터의 명칭과 역할은 아래 표 1과 같다. 각 컴퓨터에서 동작하는 프로그램들은 주로 TCP/IP 이더넷 통신을 통해서 명령과 상태 정보를 주고받도록 하였다. 그리고 이더넷 통신 방식보다 더 신속히 확인되어야 할 상태신호(안테나의 위치 추적 상태와 중간 주파수의 잠금 상태(Phase Lock), 분광기의 적분 상태)들은 별도의 선을 구성하여 전달되도록 하였다(Byun 2004).

그림 3과 같이 기존 관측 방식은 전체 프로그램의 모듈화된 특성을 살리기 위해서 천체 좌표 계산에 해당하는 부분을 운영자용 컴퓨터에서 전담하였다. 분광기 제어 컴퓨터와 망원경 제어 컴퓨터는 운영자용 컴퓨터에 의해 받은 명령을 실행만 하면 되는 시스템이어서 정확한 시간 정보를 가지고 있을 필요가 없다. 다만 관측할 천체의

표 1. 각 관측 시스템의 명칭과 역할

명 칭	역 할
운영자용 컴퓨터	전체 시스템을 관리하는 관측 제어 프로그램 지원, 좌표 계산
분광기 제어 컴퓨터	자기 상관 분광기와 기저대역 변환기 제어, 관측 자료 획득 및 저장
망원경 제어 컴퓨터	운동제어 카드를 이용한 망원경 제어(위치제어 프로그램)
관측자용 컴퓨터	관측자용 GUI 제공, 자료 분석 프로그램 지원

위치와 속도의 정보를 운영자용 컴퓨터가 계산하여 이더넷 통신을 통해 망원경 제어 컴퓨터에게 전달하게 되는데 전송과정의 지연시간이 망원경 지향 오차에 포함되게 된다. 이러한 기존 시스템으로 OTF 관측을 하고자 할 때는 크게 두 가지 어려움이 생긴다. 우선 이더넷 통신을 통해 망원경을 제어할 경우 일정치 않은 전송과정의 시간지연으로 인해 망원경의 지향오차가 생기게 된다. 예를 들어 OTF 모드로 관측할 때 시스템간의 이더넷 통신과정에서 0.1초 정도의 지연이 생긴다면 V의 속도로 움직여야 하는 망원경이 $V \cdot 0.1\text{sec}$ 의 지향오차를 낳게 된다. 100GHz 근처에서 SRAO 망원경의 빔크기가 약 2호분이므로 만약 2호분/sec의 속도로 움직인다면 지향오차가 0.2호분 정도가 되게 된다. 더군다나 지연시간이 일정치 않으므로 그 이상의 지향오차가 생길 수가 있다. 그리고 기존 시스템의 두 번째 문제점은 운영자용 컴퓨터가 분광기 제어 컴퓨터를 관리하는데 생긴다. 망원경 제어 컴퓨터는 망원경을 움직이는 운동제어카드로부터 실제 망원경의 위치 값을 돌려받아서 운영자용 컴퓨터에게 전달하게 된다. 이를 토대로 운영자용 컴퓨터는 망원경이 제대로 지향하고 있다고 판단이 되면 다시 분광기 제어 컴퓨터에게 데이터를 일정 시간동안 취득할 것을 명령하게 되는데 이 명령 또한 이더넷 통신을 통해 제어하게 되므로 오차가 생긴다. 앞의 예를 다시 고려해보면 운영자용 컴퓨터가 분광기 제어 컴퓨터에게 명령을 하는데 걸리는 지연시간이 0.1초일 때 특정 지점을 관측하는데 망원경 제어 컴퓨터와 운영자용 컴퓨터간의 지연시간과 합하여 총 0.2초의 지연이 생긴 것이므로 앞서 나온 오차의 두 배가 된다.

이러한 문제점을 없애기 위해 기존 시스템을 그림 4와 같이 변경하였다. 새로운 관측 시스템은 운영자용 컴퓨터의 역할이 망원경 제어 컴퓨터와 분광기 제어 컴퓨터에게 어느 정도 넘겨진 방식이다. 우선 운영자용 컴퓨터가 위치 정보를 망원경 제어 컴퓨터에게 전달하는 방

식으로부터 생기는 오차를 줄이기 위해 관측 위치 계산을 망원경 제어 컴퓨터가 직접 계산하도록 하였다. 동시에 분광기 제어 컴퓨터에게도 OTF 관측 정보를 넘겨주어 운영자용 컴퓨터로부터 제어 명령을 받지 않고 망원경 제어 컴퓨터로부터 오는 비트 신호를 읽어서 분광기를 제어하도록 하였다. 새로운 시스템에 대한 설명은 아래에 기술하였다.

3.1. 망원경 제어 컴퓨터

망원경 제어 컴퓨터는 운영자용 컴퓨터로부터 관측 방식과 관측할 천체의 위치 정보를 받게 된다. 기존 관측 방식에서는 운영자용 컴퓨터로부터 받은 위치 정보를 토대로 그 위치에서의 천체의 움직임을 계산한다. 그리고는 위치와 속도의 정보를 망원경의 모터를 제어하는 운동제어카드에게 전달한다. 운동제어카드 동작부는 명령받은 위치와 속도를 통해 망원경을 동작시키며 0.003deg (10.8호초) 이하의 정확도로 작동이 되면 곧바로 상태신호를 통해 운영자용 컴퓨터에게 결과를 보고한다.

OTF 방식의 경우는 우선 운영자용 컴퓨터가 OTF 방식으로 관측할 천체에 관한 정보를 망원경 제어 컴퓨터에게 보내준다. 망원경 제어 컴퓨터는 운영자용 컴퓨터로부터 정지명령이 오지 않는 한 직접 천체의 움직임을 계산하여 망원경의 위치 속도를 제어할 수 있는 위치추적 프로그램을 실행시킨다.

위치추적 프로그램은 OTF 속도에 따른 현재 천체가 있어야 할 위치와 속도를 별도의 루틴을 통해 계산해내어 운동제어카드에게 계산 결과를 알려준다. 그리고 지금이 OTF 관측 중인지, OTF 관측 중이지만 부분관측영역이 끝나서 다음 영역으로 옮겨가는 과정인지 혹은 OTF 관측이 끝났는지 등을 판단하여 운동제어카드에게 알려주게 된다.

기존 관측 방법

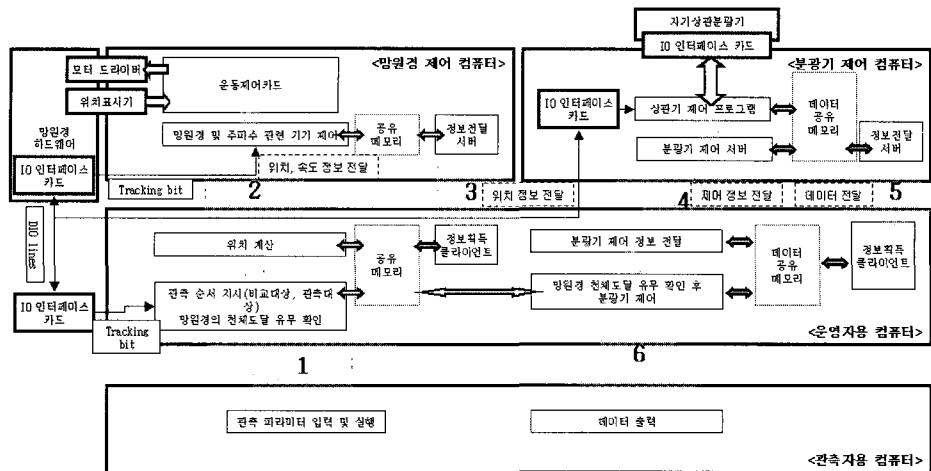


그림 3. 기존 관측 방법

OTF 관측 방법

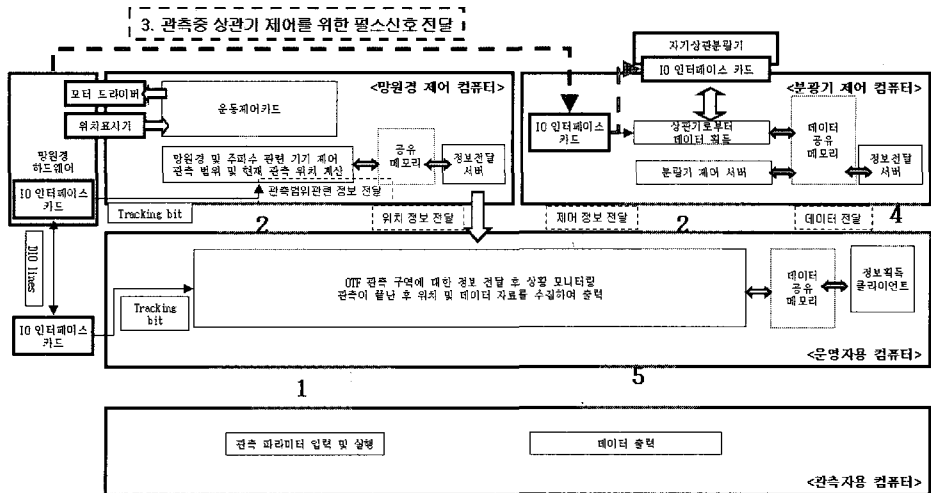


그림 4. OTF 관측 방법

운동제어카드는 별도의 하드웨어에 맞는 프로그램언어(Galil Inc. manual ref v1.0f, v1.2e)로 짜여진 명령순서에 따라 실행이 된다. 운동제어카드는 위치추적 프로그램으로부터 받은 위치와 속도 정보를 토대로 현재의 시간에 따른 천체가 있어야할 위치를 다시 확인하여 위치가 제대로 구현되도록 한다. 또한 OTF 관측과 관련된 자료획득 제어 신호와 OTF 상태 확인 신호를 만들어서 다른 컴퓨터들에게 보낸다. 자료획득 제어 신호는 분광기 제어 컴퓨터의 RT-Linux 모듈에 연결되어 자기 상관형 분광기와 VFC (Voltage to Frequency Converter)를 제어하여 자료가 실시간으로 얻어지도록 한다. OTF 상태 확인 신호는 OTF 관측 중인지를 분광기 제어 컴퓨터에게 알려준다.

3.2. 분광기 제어 컴퓨터

기존 방식에서는 운영자용 컴퓨터가 보내준 시간 정보만을 가지고 그 시간동안 데이터를 취득하지만 하고 결과를 알려주었다. 그러나 OTF 방식에서는 데이터 취득이 망원경의 이동과 동기화되어 수행되어야 하므로 망원경 제어 컴퓨터로부터 바로 데이터 취득의 시작과 끝에 대한 명령을 받는다. 이러한 환경을 구현하기 위해 RT-Linux 모듈을 사용하였다. 이를 통해 망원경 제어 컴퓨터와 분광기 제어 컴퓨터의 시간동기화를 시켰고, 자기 상관형 분광기 또한 OTF 방식에서의 연속적인 데이터 처리가 가능하도록 제어하였다.

그리고 이전에는 DVM (Digital Volt Meter)을 통해 측정되던 전력값을 VFC의 값을 읽어서 대체하였다. DVM의 경우는 RS-232C통신으로 명령과 데이터가 전달되는데 이를 제어하는 데에 시간지연이 생겨서 시각동기화가 불가능하다. VFC는 입력 전압에 비례하는 값의 주파수를 갖는 펄스를 출력시키고 후반부의 카운터가 적분 시간 동안 입력된 펄스의 개수를 누적하는 장치이다. 이 누적 값을 같은 시간동안 일정한 기준 펄스신호를 누적한 다른 카운터의 값으로 나누면 이 값은 입력 전압에

비례하면서 단위 시간당 입력 펄스의 개수가 된다. 이 회로의 적분시간에 대한 제어를 1비트의 신호로 할 수 있어서 손쉽고 정밀한 제어가 가능하다. VFC는 OP741로 구성된 증폭부, Analog Device사의 AD7742로 만든 VFC부와 NI사의 at-mio-16e-10 multi-function card를 이용한 카운터부로 이루어져있다.

3.2.1. RT-Linux

OTF 방식의 경우 1초미만의 주기로 오는 신호에 대해 곧바로 프로그램이 반응을 하려면 그 프로그램이 얼마나 빠른 주기로 신호의 획득유무를 판단하고 있는지가 관건이 된다. 그런데 OS 입장에서는 여러 프로그램들이 동작을 해야 하기 때문에 어느 한 프로그램이 입력된 인터럽트 신호에 대해 동시적으로 반응한다는 것은 매우 힘들다. OTF 방식 구현을 위해 망원경 제어 컴퓨터로부터 오는 신호를 프린터 포트를 통해 인터럽트 신호(Rubini et al., 2001)로 받아들여서 분광기 제어 컴퓨터가 인식하도록 하였는데, 보통의 OS에서 프린터 포트의 입력을 통한 신호 반응은 수십 msec 정도의 분산도를 갖는 시간 지연이 생기게 된다.

참고자료(http://www.fisica.unlp.edu.ar/rt/TESTING_RT-LINUX)에 따르면 Pentium 120MHz 시스템에서 프린터 포트를 하나의 입력단으로 보고 인터럽트 신호를 전달하였을 경우 그에 대한 반응을 보이기까지 지연되는 시간을 기록해본 결과, RT-Linux가 아닌 시스템은 시스템에 걸리는 부하에 따라 수 msec 정도였고, RT-Linux의 시스템에서는 μ sec 내였다. 분광기 제어 컴퓨터가 500msec의 신호에 대해 자료 처리가 이루어져야 함을 고려해 보면 OS가 반드시 μ sec 단위의 오차를 보이는 RT-Linux로 구현되어야 함을 알 수 있다.

현재 분광기 제어 컴퓨터에서 입력되는 자료획득 신호에 대한 자료 처리 반응 시간을 확인한 결과 20 μ sec 정도의 지연을 갖고 그 분산도는 지연 시간에 비해 작은 값을 가졌다. 이는 운동제어카드로부터 오는 신호에 대해

표 2. parallel port 인터럽트신호 지연시간 측정 자료(<http://www.fisica.unlp.edu.ar/rt/>)

시스템 부하 종류	NON RT-linux	RT-linux
	평균지연시간(μ sec)	평균지연시간(μ sec)
없는 경우	21.62 \pm 1.55	2.36 \pm 0.55
하드 사용중	440.61 \pm 420.82	3.20 \pm 0.65
네트워크 사용중	114.33 \pm 91.59	4.38 \pm 1.71
계산중	4790.10 \pm 2684.80	2.56 \pm 0.43

시각동기화가 잘 되었다고 볼 수 있다. 이를 바탕으로 RT-Linux의 프린터 포트 입출력 모듈을 통해 자기 상관형 분광기와 VFC를 제어함으로써 망원경 제어 컴퓨터와 분광기 제어 컴퓨터의 시간동기화가 이루어지도록 하였다.

3.3. OTF 관측 과정

OTF 관측에서는 관측 구간에서 망원경이 일정한 속도로 움직이게 하는 것이 관건이다. 그런데 실제 망원경은 어느 정도의 가속을 한 후에야 일정 속도를 유지할 수 있으므로 관측자는 이러한 점을 고려하여 실제 관측 영역과 가속구간인 rampup 거리를 염두에 두고 정보를 입력한다. 또한 표 3과 같은 OTF 관측에 필요한 정보를 입력하고 운영자용 컴퓨터에게 OTF를 시작한다는 명령을 준다. 망원경 제어 컴퓨터는 관측 순서에 따라 VANE, REF 관측이 끝나면 OTF 관측을 시작한다. 그동안 운영자용 컴퓨터는 분광기 제어 컴퓨터에게도 같은 OTF 방식에 관한 정보를 전달한다. 망원경 제어 컴퓨터는 분광기 제어 컴퓨터에게 OTF 동작중인지를 알려주는 상태신호와 자료획득 제어 신호를 보낸다. 자료획득 제어 신호는 분광기 제어 컴퓨터의 인터페이스 카드를 통해 내부 프로그램이 확인할 수 있도록 하였고, 또한 RT-Linux 모듈로 입력되어 자기 상관형 분광기와 VFC를 제어한다. VFC와 자기 상관형 분광기는 자료획득 제어 신호에 의해서 데이터를 규칙적으로 얻는다. 분광기 제어 컴퓨터는 이렇게 데이터가 얻어지는 동안 자기 상관형 분광기와 VFC로부터 데이터를 읽어서 저장한다. 관측자가 정한 한번의 관측 시기가 끝나면 분광기 제어 컴퓨터는

MOF (Make Otf File)이라는 별도의 데이터 파일 생성 프로그램을 작동시킨다. MOF 프로그램은 전체적인 관측이 끝난 경우, 망원경 제어 컴퓨터가 가지고 있는 위치 정보와 분광기 제어 컴퓨터가 가지고 있는 데이터 정보를 일치시켜서 데이터 파일을 만들어 운영자용 컴퓨터에게 보내준다.

4. OTF 관측 결과

실제 관측을 통해서 SRAO 망원경이 OTF 관측 모드가 잘 구현되는지를 아래와 같은 실험을 통해 검증하였다.

- 망원경의 지향 정밀도 : 망원경이 명령한 값에 대해 실제 어느 정도 따라가고 있는지를 확인하였다. 우선 망원경 제어 컴퓨터와 운동제어카드간의 통신주기의 타당성을 살펴보고 지향 정밀도가 얼마나 정확함을 계산하였다.
- 자기 상관형 분광기와 VFC의 동기화 실험 : 자기 상관형 분광기와 VFC가 별도의 데이터 수집 장치이기 때문에 자기 상관형 분광기가 얻는 데이터와 VFC가 얻는 값이 같은 데이터인지를 확인하였다.
- OTF 관측 결과

OTF가 제대로 구현되는지를 보기위해 연속전파관측과 스펙트럼 관측을 수행하였다. 연속전파 관측은 달을 대상으로 하였고 스펙트럼 관측은 초신성 잔해 G78.2+2.7의 북쪽 영역의 일부를 기존 방식과 OTF 방식으로 관측하여 비교하였다.

표 3. OTF 명령어

명령어	내용	단위
SCANDIST	한번에 관측될 천체의 길이	호초
RAMPUP	관측 영역이전의 가속 구간	호초
SCANRATE	OTF 관측 속도	호초/s
DROW	line 간의 간격	호초
ROW0	시작할 줄의 번호	
ROW1	마지막 줄의 번호	
NROWS	한번의 ON동안 관측할 line 수	
XOFF	관측 시작 지점의 중심으로부터의 X 간격	호초
YOFF	관측 시작 지점의 중심으로부터의 Y 간격	호초

4.1. 망원경 제어 컴퓨터와 운동제어카드간의 통신 주기 및 지향 정밀도

실제 망원경의 제어에 있어서 아무리 한 컴퓨터 내에서 이루어진다고 하더라도 관측 위치를 계산한 프로그램이 망원경의 움직임을 제어하는 프로그램에게 관측영역의 한 점 한 점을 지향하도록 명령을 한다면 결국 point-to-point 방식과 차이가 없게 된다. 그래서 정확한 OTF 동작을 위해 망원경이 어느 특정한 점을 지향하게 하는 것 보다 얼마나 일정한 속도로 그 특정 지점을 지나는데 초점을 맞추고 작동시켜야 한다.

현재 망원경 제어 컴퓨터에서 운동제어카드에게 명령을 하는 주기는 약 1.5초 정도 된다. 망원경 제어 컴퓨터는 명령을 준 시간, 위치, 속도 정보를 운동제어 카드에게 주고, 운동제어 카드는 명령을 받는 시간의 사이는 등속운동으로 가정하여 망원경을 제어한다. 천체의 움직임은 85도 이상에서 1.8 호초/s 이상으로 급격히 변화하였고 그 이하에서는 급격히 줄어들어 1.1 호초/s 이하의 변화율을 보임을 알았다. 이는 현재 망원경 제어 컴퓨터와 운동제어카드사이의 전송 시간을 볼 때 4 호초 미만의 위치 변화를 보이며 100GHz에서 SRAO 망원경의 빔 크기가 112 ± 2 호초 (Koo et al. 2003)인 경우, 3.2%이내의 오차를 주게 된다. 이를 고려하여 통신 주기를 더 줄일 것인가에 대한 생각이 필요한데 현재 1.5초 이내의 통신 주기를 주었을 때 오히려 두 프로세서 간의 통신 오류가 잦아짐을 확인하였다. 그리고 85도 이상에서는 천체의 움직임이 매우 크게 변하므로 오히려 85도 이상의 관측을 피하는 것이 더 낫다는 결론을 내릴 수 있었다.

망원경 제어 컴퓨터는 현재 망원경이 지향하여야 할 위치(고도, 방위각), 속도와 현재 관측 방식에 대한 정보를 약 1.5초 간격으로 운동제어카드모듈을 통하여 운동제어카드에게 전달한다. 그리고 운동제어카드는 현재의 위치 값을 2nd FIFO를 통하여 망원경 제어 컴퓨터에게 전달하게 되어있다. 이를 검증하는 실험으로 120 호초/s의 속도로 움직이게 하여 OTF 방식으로 달을 관측하였다. 그림 5는 OTF 관측을 하는 동안 명령 값에 대한 실제 값과의 차이를 보인 그림이다. OTF 관측 진행 방향으로 명령 값과 실제 값 간의 차이가 있지만 여러 방향으로 OTF 관측을 해 본 결과 그림 5에서 보이듯이 오차가 0.002deg (7.2 호초)미만으로 나타났다.

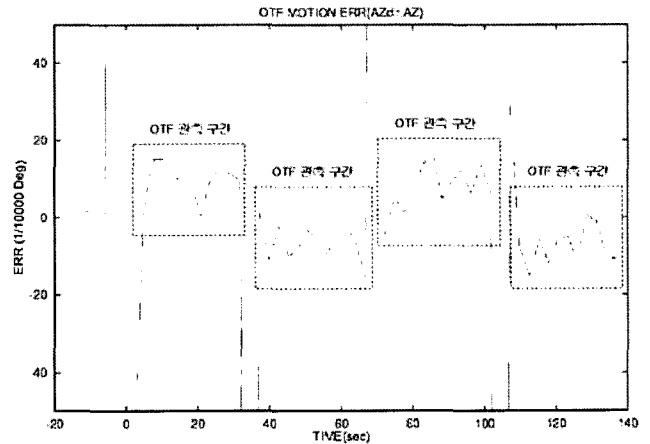


그림 5. 망원경이 방위각 방향으로 OTF 모드로 동작할 때 방위각의 지향오차

4.2. 자기 상관형 분광기와 VFC의 동기화 실험

자기 상관형 분광기(Choi et al. 2003)는 자체적으로 들어오는 신호의 전압 값을 측정할 수 있도록 되어 있지만 측정회로가 입력 값에 대해 선형적으로 반응하지 못해서 그 값을 신뢰할 수 없다고 한다. 그래서 DVM이나 VFC와 같은 별도 장비로 입력 신호의 전압 값을 측정하여 주파수 계산에 이용한다. 그런데 VFC와 자기 상관 분광기는 별도의 장비이며 이번에 VFC가 자체 제작된 것이므로 두 기기가 같은 데이터를 동시에 처리하는가를 살펴 볼 필요가 있다. 이 실험을 위해 달을 대상으로 연속 전파 관측을 수행하여 자기 상관형 분광기와 VFC의 측정값이 달의 양 끝 부분에 대해서 같이 변화하는 것을 보았다. 그림 6은 달을 관측하였을 때 자기 상관 분광기와 VFC로 읽은 전압 값을 나타낸 것인데 VFC는 별도의 회로들로 만든 것이어서 값이 자기 상관 분광기의 값보다 오차가 큰 편이다. 그런데 자기 상관 분광기와 VFC는 입력 값에 대해 선형적으로 구해지는 측정치의 크기가 틀리므로 그림 6만으로는 동기화를 확인하기 어려워서 그림 7과 같이 전압 값의 변화를 보았다. 달의 언저리에서 전압 값이 크게 변화하는 점이 생기게 되는데 그림 7에서는 변화 정도의 차이는 있지만 최대로 전압 값이 변하는 지점이 똑같은 것을 알 수 있어서 두 기기가 같은 데이터를 처리하고 있다고 할 수 있다.

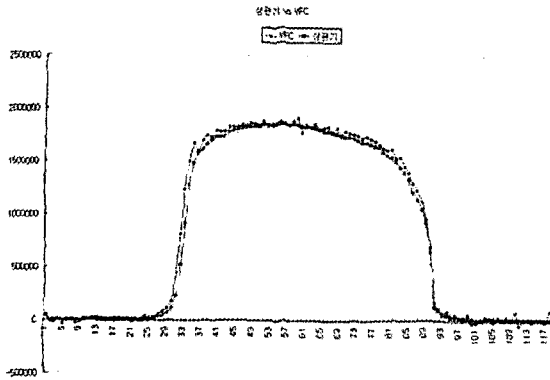


그림 6. 자기 상관형 분광기와 VFC의 전력 측정값

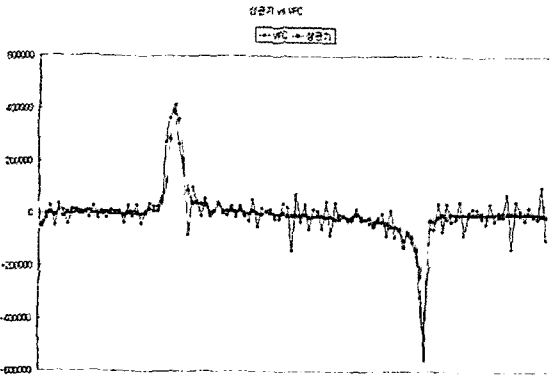


그림 7. 자기 상관형 분광기와 VFC의 전력 측정값의 변화

4.3. OTF 실험 관측

개발된 OTF 관측 모드가 제대로 작동하는지를 검증하기 위해 먼저 월령 19.6인 달의 연속전파를 관측하였다. 그림 8은 달을 1°×1° 크기로 관측한 결과이다. 표 4와 같이 1°×1°의 3600개의 점에 해당하는 영역을 점 당 1초씩 관측한 경우 OTF 관측 방식이 관측 효율이 더 좋다는 결론을 얻었다. 기존 방식의 경우는 망원경의 관측 위치 간의 이동으로 인한 지연 시간과 컴퓨터간의 정보 전달로 인한 지연으로 점 당 평균 2.5초 정도 시간의 손실을 보는 반면 OTF 관측 방식은 망원경이 비교원을 관측하기 위해 움직이는데 걸리는 시간과 다음 관측 영역으로 이동하는 데에 걸리는 시간 외에 크게 지연되는 시간이 없으므로 관측 효율이 더 좋아진 것을 볼 수 있다.

그림 9와 그림 10은 스펙트럼 관측 OTF 모드의 테스트를 위해 초신성 잔해 G78.2+2.7의 북쪽영역 중 20°

×20°을 기존 관측 방식과 OTF 관측 방식으로 관측한 후에 속도가 -10Km/s에서 10Km/s인 영역의 안테나 온도를 합쳐서 나타낸 그림이다. 그림 9는 빔크기당 15초로 관측하여 총 2시간 정도 소요되었고, 그림 10은 30호초/s의 관측 속도를 가지고 60호초의 줄간격과 한 줄당 15호초의 데이터 간격으로 샘플링을 수행하여 총 관측시간 24분이 걸려서 완성된 모습이다. 이때 OTF의 경우 자료를 빔크기 보다 작은 간격으로 얻기 때문에 최종적으로 빔콘블루션 후에 일어나는 지도의 한 지점당 적분 시간은 8 초이다. 그리고 그림 11과 그림 12는 기존 관측 방식과 OTF 관측 방식으로 관측하였을 경우의 스펙트럼이다. OTF 관측 스펙트럼의 경우 빔콘블루션하기 이전의 스펙트럼으로 적분시간은 ?이다. RMS 잡음비는 그림 11의 경우 0.357K이며, 그림 12는 1.901K이다. 이 잡음비는 각각의 적분 시간을 고려했을 때 예상되는 값과 잘 일치한다. OTF 데이터는 기존 관측 방식의 데이터와 달리 그림 12와 같은 스펙트럼들이 빔크기 절반보다 더 촘촘하게 얻어지는데 일반적으로 최종적인 자료는 빔콘블루션을 하여 빔크기의 절반 간격의 격자점에서 값을 갖도록 만든다. 이때 원래 자료의 샘플링 지점이 불규칙하다면 콘블루션 과정 중 인공적인 형상을 만들어 낼 수 있다(SMTO staff 2002). 하지만 SRAO의 OTF 방식은 각 줄 샘플링 시작점이 정렬이 되도록 설계되었으며 샘플링 시기가 각 줄의 시작점을 기준으로 동기화 되어서 인접 줄 간의 샘플링 위치가 작은 오차 범위 안에서 일치한다. 즉 샘플링 된 위치가 스캔 방향으로 촘촘한 규칙적인 분포를 갖게 되는데 이런 규칙적인 격자 구조의 경우 콘블루션에 의해 인공적인 형상이 만들어 지는 효과는 거의 무시할 수 있다. GILDAS 패키지 중 CLASS에는 GRID라는 명령을 통해 데이터를 처리하도록 하였다. 결과적으로 OTF 관측 결과는 관측 시간의 차이 때문에 잡음이 많아 보이지만 분자운의 모습을 잘 재현하는 것을 알 수 있었다.

5. 결론 및 토의

국내에서는 처음으로 SRAO에서 OTF 관측 방식을 구현하였다. OTF 관측 방식의 중요 부분인 시각동기화는 RT-Linux 기반의 프로그램을 만들어서 구현하였다. 달과 초신성 잔해에 대해 연속전파와 스펙트럼 모드로 OTF 관측을 수행하여 기존의 관측 방식으로 얻은 것과 같은 전파지도를 얻을 수 있었다. 이를 통해 OTF 모드로 성공적으로 망원경을 제어할 수 있음을 확인하였고, 또한 관측 시간의 손실을 획기적으로 줄일 수 있게 되었다.

표 4. 달을 1°×1° 크기로 기존의 방법과 OTF 모드로 관측한 결과의 비교

점 당 1초 관측	기존 방식	OTF
이론적 총적분 시간	67분 52초	64분 12초
실관측 시간	220분 24초	76분 14초
지연 시간	152분 32초	12분 2초
점 당 평균 지연 시간	약 2.5초	약 0.2초
관측 효율	31%	84%

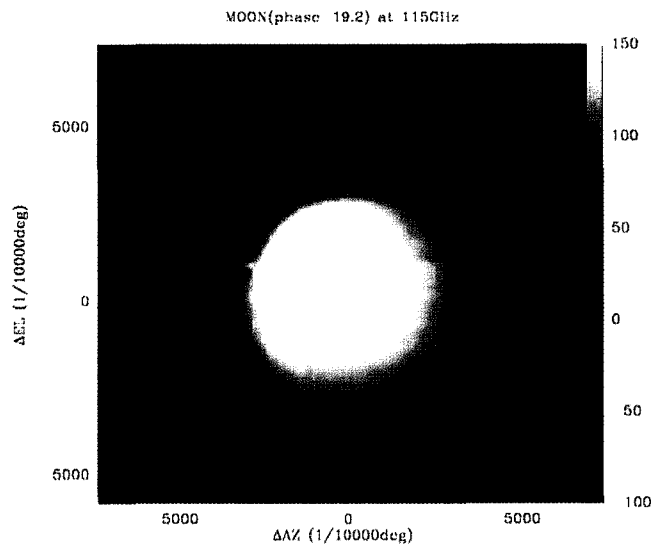


그림 8. 달(월령 19.2일)의 OTF 관측 결과

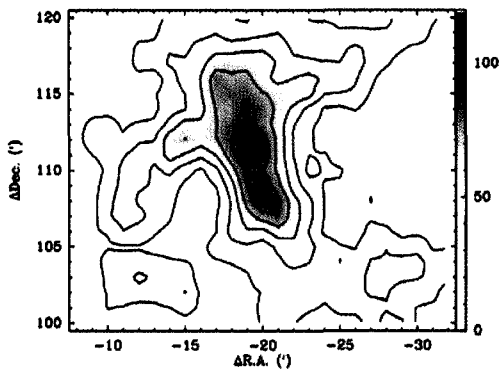


그림 9. G78.2+2.7 기존 관측

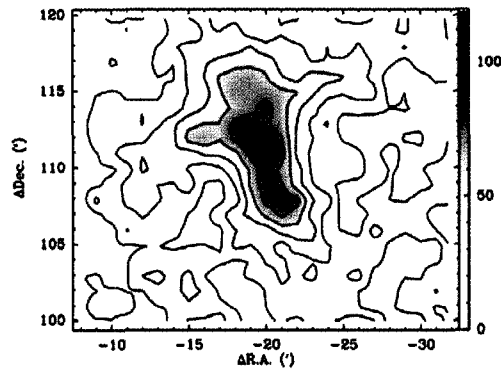


그림 10. G78.2+2.7 OTF 관측

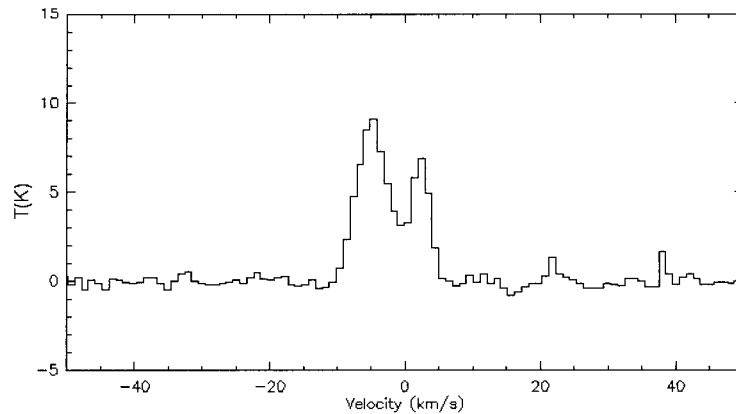


그림 11. 기존 관측 방법으로 관측한 스펙트럼
($\Delta\text{RA}=-19'$, $\Delta\text{Dec}=109'$)

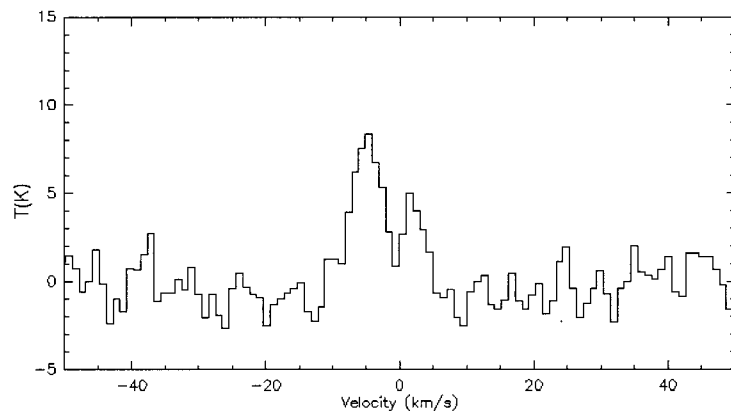


그림 12. OTF 관측 방법으로 관측한 스펙트럼
($\Delta\text{RA}=-18.933'$, $\Delta\text{Dec}=108.575'$)

이제 SRAO에서도 다른 수준급 전파망원경과 같은 방식의 OTF 관측 방식이 구현되었다. SRAO 6미터 망원경은 광역 관측에 주로 많이 사용되고 있으므로 OTF 관측 방법을 활발히 이용하여 관측 효율을 높일 수 있을 것이다. 또한 이 연구는 OTF 관측 방식으로 만들어진 데이터를 효율적으로 처리하는 시스템을 구축하거나, 보다 정밀한 눈금조정을 할 수 있는 개량된 OTF 관측 방법을 개발하는데 밑받침이 될 수 있을 것이다.

참고문헌

- 강현우, 2004, 서울전파천문대(SRAO) 6M 망원경의 On The Fly Mapping 시스템 구축, 석사 학위 논문, 서울대학교
- Byun, D.-Y., Yun, & Y. Z., 2003, Development of control software for the SRAO 6-meter telescope based on PCs running Linux, *Experimental Astronomy*
- Byun, D.-Y., 2004, Development of the SRAO 6-meter Telescope Control System and Molecular Line

- Observation of Supernova Remnants, Ph.D. thesis, Seoul National Univ.
- Choi, et al., 2003, Development of the SRAO 1024-channel digital auto-correlator, International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 24, 5
- Chung, E.-J., et al., 2005, A new referencing method for the array On-The-Fly observation, JKAS, 38, 17
- Galil Motion Control, Inc, COMMAND REFERENCE manual rev.1.0f
- Galil Motion Control, Inc, DMC 1700/1800 manual rev.1.2e
- Koo, et al., 2003, Development of the SRAO 6-METER RADIO TELESCOPE, JKAS, 36, 43
- Lee, J. W., et al., 2002, Development of the SRAO 3MM SIS receiver, International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 23, 47
- Mangum, J., 1999, On The Fly Observing at the 12Meter, NRAO
- Muders, D., 1999, Spectral line On-The-Fly Mapping at the SMT ver 1.1
- Rubini, A. & Corbet, J., 2001, Linux device drivers 2nd Edit., O'REILLY
- SMTO staff, 2002, SMTO Manual Ver 6.5
- Ungerechts, H., 1999, IRAM 30-m Telescope Spectral Line On-The-Fly Mapping, IRAM, Granada
- <http://www.fisica.unlp.edu.ar/rt/> TESTING RT-LINUX