

열전냉각방식의 범용 CCD 카메라 시스템 개발 II. 소프트웨어

오세현¹, 강용우^{2,3†}, 변용익^{1,3}

¹연세대학교 천문우주과학과

²한국천문연구원

³연세대학교 천문대

A DESIGN AND DEVELOPMENT OF MULTI-PURPOSE CCD CAMERA SYSTEM WITH THERMOELECTRIC COOLING II. SOFTWARE

S. H. Oh¹, Y. W. Kang^{2,3†}, and Y. I. Byun^{1,3}

¹Department of Astronomy, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

²Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 305-348, Korea

³Yonsei University Observatory, Seoul 120-749, Korea

E-mail: byulmaru@kasi.re.kr

(Received August 30, 2007; Accepted September 15, 2007)

요 약

천체관측용 고효율 CCD 카메라 시스템과 제어소프트웨어의 독자 개발의 시도로, 우리는 범용 CCD 카메라 시스템을 제작하고, 이를 Linux 운영체제 기반의 PC에서 병렬포트를 이용하여 제어하는 소프트웨어를 개발 완료하였다. 이 소프트웨어는 우리가 개발한 카메라에 장착될 수 있는 KAF-0401E(768 × 512), KAF-1602E(1536 × 1024), KAF-3200E(2184 × 1472) 등 세가지 모델의 CCD 칩에 대해 모두 사용될 수 있다. 제작된 CCD 카메라를 효율적으로 제어하기 위하여, 개발된 소프트웨어는 CCD를 제어하는 부분과 온도와 셔터를 제어하는 부분의 두가지 구성으로 되어 있다. 이 중, 온도와 셔터의 제어는 CCD 동작과 무관하게 작동될 수 있도록 독립적인 프로세스로 작동되며, 관측 시에는 Linux의 다중 프로세스를 제어하는 소프트웨어를 통하여 통합 제어된다. 개발된 소프트웨어는 CCD 카메라를 수동 혹은 자동으로 구동할 수 있으며, 전천을 탐사하는 자동관측 시스템의 기상 모니터나 일반 천체관측 등에 범용으로 사용할 수 있을 것이다. 시험 결과, KAF-0401E, KAF-1602E, KAF-3200E, 각각의 CCD에 대하여 약 15초, 64초, 134초 정도의 영상 읽기 시간이 소요되었으며, 이는 병렬포트 전송속도의 한계로 인한 것이다. 따라서 보다 넓은 수광영역을 가진 CCD를 사용하기 위해서는 입출력 속도를 높일 필요가 있으며, 이를 위하여 USB 포트를 이용한 제어를 고려하고 있다.

ABSTRACT

We present a software which we developed for the multi-purpose CCD camera. This software can be used on the all 3 types of CCD - KAF-0401E (768 × 512), KAF-1602E (1536 × 1024), KAF-3200E (2184 × 1472) made in KODAK Co.. For the efficient CCD camera control, the software is operated with two independent processes of the CCD control program and the temperature/shutter operation program. This software is designed to fully automatic operation as well as manually operation under LINUX system, and is controlled by LINUX user signal procedure. We plan to use this software

[†]corresponding author

for all sky survey system and also night sky monitoring and sky observation. As our results, the read-out time of each CCD are about 15sec, 64sec, 134sec for KAF-0401E, KAF-1602E, KAF-3200E., because these time are limited by the data transmission speed of parallel port. For larger format CCD, the data transmission is required more high speed. we are considering this control software to one using USB port for high speed data transmission.

Keywords: CCD, CCD camera, CCD control software, multi-purpose, Linux

1. 서 론

천체관측용 고효율 CCD 카메라 시스템과 제어소프트웨어의 독자 개발의 시도로, 우리는 전천 탐사 및 원격관측소의 기상 모니터링 등에 사용할 수 있는 범용 CCD 카메라를 개발하였다. 개발된 CCD 카메라는 KODAK사 제품의 세가지 CCD들(KAF-0401E, KAF-1602E, KAF-3200E)에 대한 지원이 가능하며 별도의 클락 발생기나 컨트롤러를 사용하지 않고 카메라 제어 PC에서 만들어진 클락을 사용하여 동작한다. 카메라의 냉각은 열전냉각소자와 냉각팬을 통하여 이루어지며, 온도센서를 사용하여 기준온도에 대한 자동제어가 가능하다. 이러한 제어는 PC에서 기본적으로 제공하는 병렬 포트를 통하여 이루어진다. 국내에서도 CCD 카메라에 대한 개발 연구가 진행되어 왔으며, 그 예로 보현산 BOES 카메라(박병근 외 2003a,b)와 한국천문연구원의 1K 카메라 개발(진호 외 1997)을 들 수 있다. 이 외에도 소형 CCD 카메라의 예로 서울대의 전천 탐사용 CCD 카메라(유영삼 외 2001)를 들 수 있다. 이러한 CCD 카메라들은 하드웨어적인 특성과 카메라의 테스트 및 유지, 보수를 위해 자체적으로 소프트웨어를 개발하여 사용하고 있다. 이러한 이유로 우리가 개발한 CCD 카메라 역시 독자적인 회로설계와 기타 하드웨어적인 특징 및 향후 이루어질 자동 관측 등을 반영하여 제어 소프트웨어를 개발 하였다. 이 논문에서는 개발된 CCD 카메라의 제어 소프트웨어의 알고리즘과 작동방식에 대해 소개하며 시험 관측 결과에 대해 논의하도록 하겠다. 이 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 소프트웨어의 개발 작업환경과 카메라의 각 부분에 대한 제어 알고리즘에 대해 기술하고, 3장에서는 완성된 프로그램의 소개와 시험 관측결과를, 4장에서는 밤하늘 모니터링용으로 실제 사용 예를 보였으며, 5장은 이 논문의 결론이다.

2. 개발환경 및 소프트웨어 구성

2.1 개발환경

이 소프트웨어는 관측자동화의 용이성과 향후 연동될 전천탐사 시스템의 운영체제가 Linux인 점을 고려하여, Linux 운영체제에서 C언어와 gcc 컴파일러를 사용하여 개발하였다. 또 사용자의 편의를 위하여 ncurses 라이브러리를 이용한 사용자방식의 메뉴(User Interface)를 구현하였다.

2.2 프로그램 구성

개발된 소프트웨어는 그림 1에 보인 바와 같이 크게 CCD의 제어를 위한 skycam 프로그램, 서터와 열전냉각소자의 제어를 위한 temptter 프로그램으로 구성되어 있다. 각 프로그램의 제어와 데이

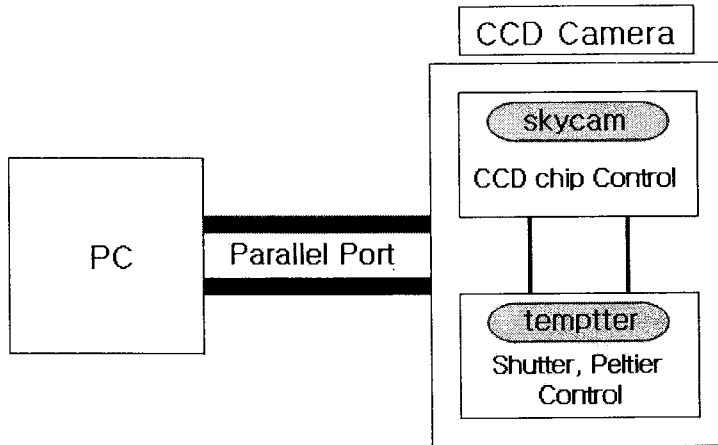


그림 1. 소프트웨어 제어 구성도.

터 송신은 PC에서 기본적으로 제공하는 병렬포트를 통하여 이루어진다. 실제 관측이 이루어지지 않을 경우에도 온도제어가 필요하기 때문에 온도제어를 담당하는 temptter 프로그램은 CCD 제어를 담당하는 skycam 프로그램과는 무관하게 동작하여야 한다. 하지만, 관측시에는 온도 및 셔터의 제어와 CCD의 제어가 상호 유기적으로 이루어져야 하기 때문에, 두 프로그램간의 통신이 필요하다. 이를 위하여 Linux에서 제공하는 공유메모리 지원 기능과 다중 프로세스 제어 기능을 사용하였다. 통신방법은, 우선 각 프로그램에서 사용될 데이터를 공유메모리에 기록한 뒤, 한 프로그램에서 다른 프로그램으로 신호를 보내게 된다. 신호를 받은 프로그램은 공유메모리의 데이터를 점검한 후, 이 값에 해당하는 동작을 하고, 그에 상응하는 데이터를 공유메모리에 기록한다. 그리고, 다시 앞의 프로그램에 신호를 보내게 된다. 이러한 방식으로 정해진 순서에 의하여 프로그램간의 제어가 이루어진다.

2.3 CCD 제어

개발된 CCD 카메라는 KODAK사의 KAF-0401E, KAF-1602E, KAF-3200E의 세가지 소자들을 사용하며, CCD들의 기본적인 사양과 구조는 표 1과 그림 2에 나타나 있다.

CCD에서의 전하전달 방식은 그림 2에서와 같이 먼저 CCD의 화소(pixel)들을 한 줄씩 전하전송 레지스터로 수직 이동한 후, 전하전송 레지스터에서 한 화소씩 영상 출력단자(Floating Diffusion, FD)로 수평이동 한다(http://www.astrosurf.com, Audine 2002). FD에서의 아날로그 전하 값은 16비트 디지털 값으로 변환된 뒤 다음, 병렬포트를 통하여 컴퓨터로 전송된다. 이와 같은 방식으로 CCD 내의 모든 화소의 전하가 컴퓨터로 전송된다.

CCD 제어를 위해 8개의 클락이 사용되며, 이러한 클락들은 모든 화소의 아날로그 전하 값을 FD로 전송하고, A/D 변환기에서 디지털 값으로 변환하며, 컴퓨터로 전송하는 전 과정을 구동시킨다. 각각의 클락들의 역할과 클락 간의 전송 시간 간격들은 그림 3과 같다.

그림 3에서와 같이, 한 쌍의 수직이동 클락(V1, V2)에 의해 화소들이 한줄씩 레지스터로 수직 이

표 1. 사용한 CCD들의 기본 사양(Full frame CCD Image Sensor Performance Specification, KODAK 2002).

	KAF-0401E	KAF-1602E	KAF-3200E
Dimension	768 × 512	1536 × 1024	2184 × 1472
Pixel area	393K	1.6M	3.2M
Photosensitive area	6.91 × 4.6mm	13.8 × 9.2mm	14.85 × 10.26mm
Output sensitivity	10 μ V/e ⁻	10 μ V/e ⁻	20 μ V/e ⁻
Dark current	< 10pA/cm ² @25°C	< 10pA/cm ² @25°C	< 7pA/cm ² @25°C
Quantum efficiency (450, 550, 650nm)	40%, 52%, 65%	40%, 52%, 65%	40%, 52%, 65%

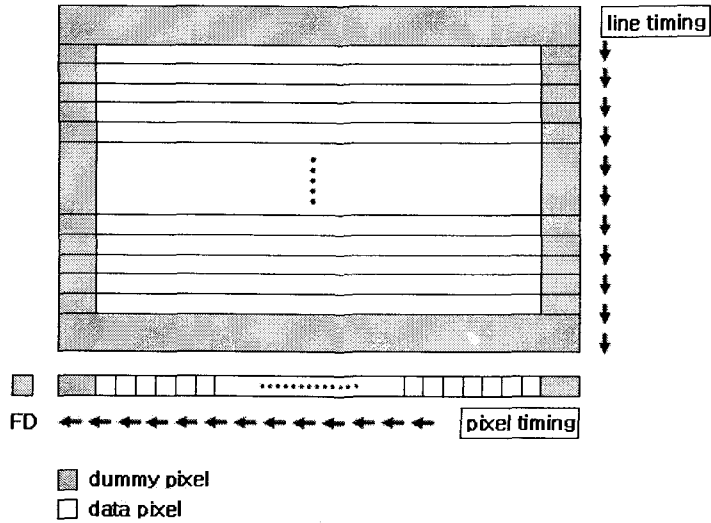


그림 2. CCD의 전하전달 방식.

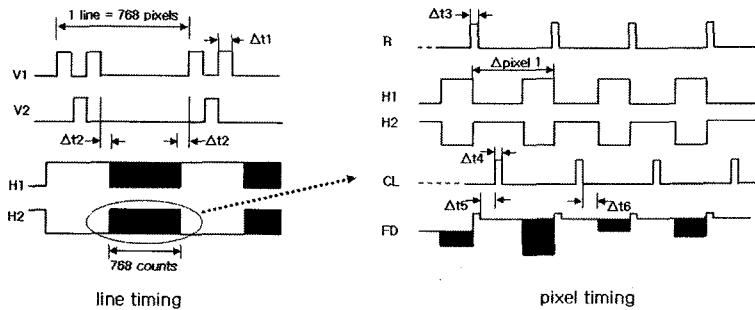


그림 3. CCD의 전하 전송 구동 신호들.

표 2. 이 연구에서 얻어진 신호 단위 간의 시간 간격.

	time (unit: μsec)
Δt_1	13.6
Δt_2	5.1
Δt_3	3.4
Δt_4	3.4
Δt_5	8.5
Δt_6	8.5

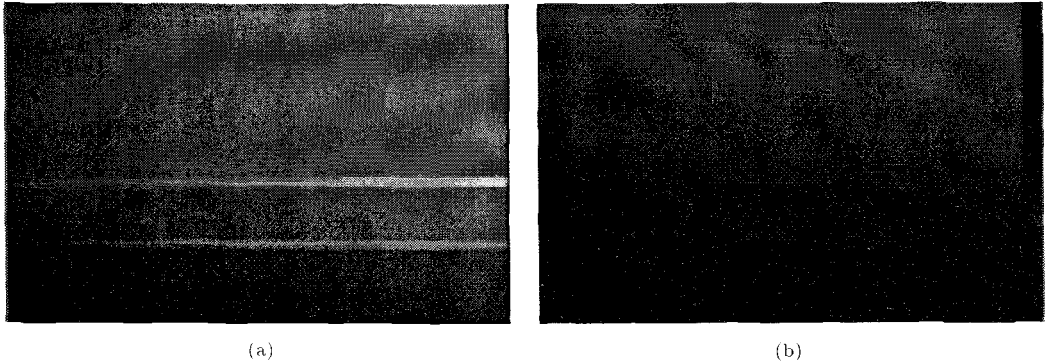


그림 4. 신호단위간의 시간 간격에 따른 얻어진 영상 비교. (a) KODAK사 Data Sheet에 의한 시간 간격을 적용할 경우, (b) 이 연구에서 구하여진 값을 적용한 경우.

동되며, 레지스터에서 수평이동 클락(H1, H2)에 의해 한 화소씩 FD로 수평 이동된다. 리셋 클락(R)은 FD의 잔여 전류를 제거하며, 클램프 클락(CL)은 FD 전하값을 기준전위로 변환시킨다. 이외에 그림 3에는 표시되어 있지 않지만, A/D 변환을 위한 클락과 버퍼 구동 클락이 있다. A/D 변환 클락은 아날로그 영상 신호를 디지털 신호로 바꾸기 위한 A/D 변환기 구동을 위해 사용되며, 버퍼 클락은 16bit로 변환된 디지털 신호를 컴퓨터의 병렬포트의 전송 선로 수에 맞게, 4bit씩 데이터를 나누어 전송하는데 사용된다.

개발된 CCD 카메라는, CCD의 제어와 컴퓨터로의 데이터 전송을 위해 별도의 전용 클락 발생기나 컨트롤러를 사용하지 않고, CCD 카메라 제어 PC에서 만들어진 클락과 병렬포트를 사용한다. 그래서, 개발된 CCD 카메라의 부품 특성들과 구동 소프트웨어 및 병렬포트 사이에 클락 간의 조율이 새로 필요하였다. CCD 카메라를 정확하게 구동하기 위한 최적의 클락킹(Clocking)을 구현하려면, 각 클락 간의 시간 간격 조절이 중요한 변수가 된다. 그림 3에서의 클락 간의 시간 간격인 Δt 가 알맞지 못하면, CCD의 전하전송이 제대로 이루어지지 않아, 얻어지는 영상에 잡음 패턴이 나타나게 된다. 그리고, 시간 간격이 너무 길게 되면 전송속도가 느려지는 등의 문제가 발생한다. 따라서 이러한 PC를 이용한 클락킹과 병렬포트의 한계를 극복하기 위해서, 클락 간의 시간 간격을 다양하게 바꾸어 가면서 많은 시험을 통하여, 개발된 CCD 카메라에 맞는 최적의 값을 구하였다. 이 연구에서 얻어진 최적의 시간 간격 값을 표 2에 나타내었다.

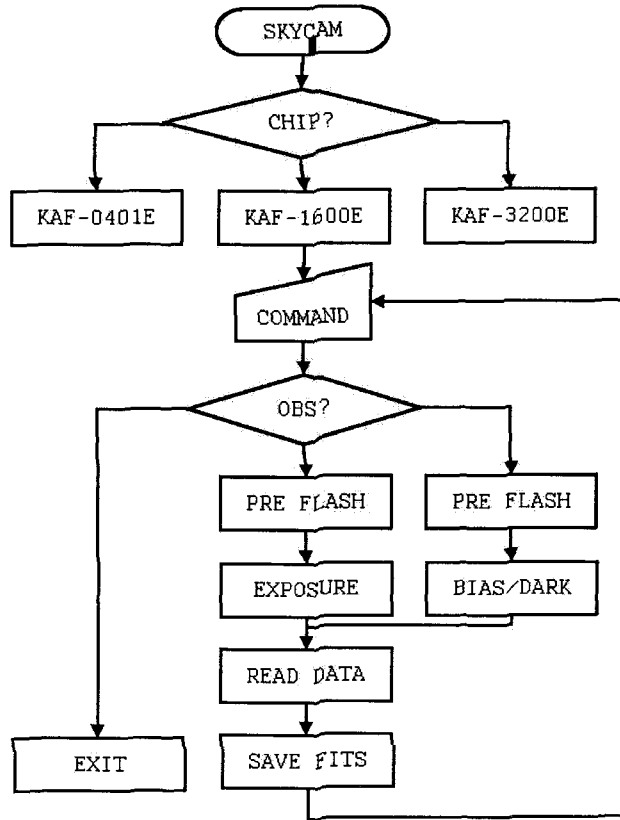


그림 5. CCD 제어 프로그램 흐름도.

KODAK사에서 제공하는 Data Sheet에 의한 시간 간격을 적용할 경우와, 이 연구에서 구한 값을 적용할 경우의 비교 영상을 그림 4에 나타내었다. Data Sheet에 의한 시간 간격의 경우, 그림 4a와 같이 얻어진 영상에 잡음 패턴이 나타남을 볼 수 있다. 클락 간의 시간 간격을 표 2의 값으로 사용할 경우, 그림 4b와 같이 깨끗한 영상을 얻을 수 있음을 볼 수 있다. 위에서 언급한대로 클락 간의 조율이 개발된 CCD 카메라 시스템에 최적화 되었을 경우에만, 영상을 제대로 얻을 수 있었다. 즉, 시간 간격과 overlap 간격이 CCD 구동에 중요한데, PC에서 만들어진 클락을 병렬포트를 통하여 CCD 카메라를 제어하는 과정에서, 하드웨어 특성과 소프트웨어 상호 간의 복합적 지연으로 나타난 현상으로 생각된다.

CCD 제어부분을 담당하는 skycam 프로그램의 알고리즘은 그림 5와 같다. CCD 종류를 선택한 다음, 노출시간과 화소 결합 수(binning) 등의 값을 입력받아 관측을 수행하게 된다. 관측은, 크게 셔터가 열리는 일반적인 관측방식과 영점영상(Bias)과 암잡음영상(Dark) 관측을 위해 셔터가 열리지 않는 관측방식으로 나뉜다. 관측 이전에 CCD 내에 남아있는 잔여 전류를 제거하기 위한 미리읽기(Pre-flash) 과정이 선행된다. 관측 종료시, CCD의 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환한 후, 최종 데이터는 병렬포트를 통해 컴퓨터로 전송되고 FITS 형태로 저장된다.

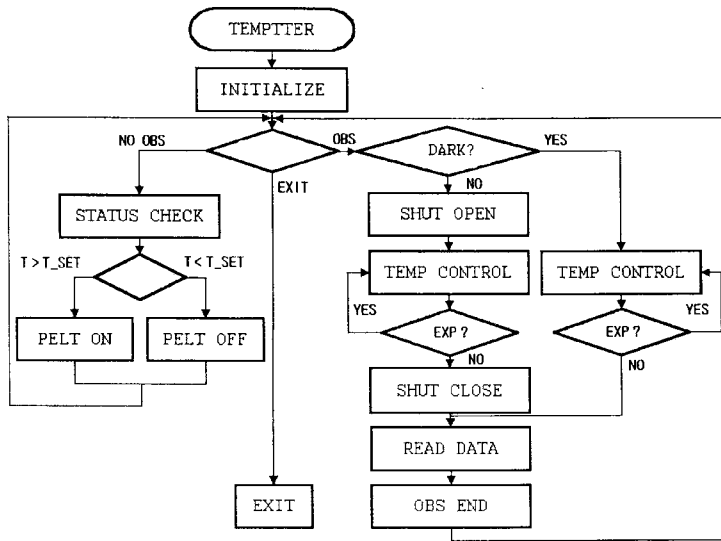


그림 6. 셔터와 열전냉각기 제어 프로그램 흐름도.

2.4 셔터와 열전냉각기 제어

CCD 카메라의 셔터 제어 및 CCD의 암전류 제거와 안정적인 작동을 위한 냉각 제어는, CCD 카메라로 관측을 하기 위하여 반드시 필요하다. 특히, CCD의 온도는 관측하는 동안 일정하게 유지되어야 한다. 이러한 이유로 개발된 CCD 카메라의 셔터와 열전냉각기는, CCD 제어와는 무관한 별도의 독립적인 프로그램에 의해 제어된다. 셔터 제어는 관측시에 skycam 프로그램의 호출 신호를 받아 이루어지며, 셔터 동작 후 그에 상응하는 종료 신호를 skycam 프로그램으로 보낸다. 개발된 CCD 카메라는 관측자에 의해 입력되는 온도 설정값으로 유지되는데, 이를 위한 열전냉각기의 제어는 CCD의 온도 측정을 위해 설치된 온도센서의 값을 읽어 이루어진다. 즉, 입력된 온도 설정값보다 CCD의 온도가 높으면 열전냉각기를 작동시키고, 낮으면 작동을 멈추게 하여 CCD의 온도를 항상 일정하게 유지한다. 하지만 열전냉각기, 온도센서, 온도센서용 A/D 변환기의 작동, 셔터, 그리고 CCD 작동을 병렬포트로 모두 제어하기에는 병렬포트 신호선 수에 한계가 있다. 그래서 래치(latch)회로를 이용하여 여러 종류의 신호선들을 동일한 출력 신호선에 순차적으로 연결하도록 제어하여, 병렬포트 신호선 수의 한계를 해결하였고, CCD 및 셔터와 열전냉각기 제어를 효율적으로 할 수 있었다. 이러한 이유로 CCD의 데이터를 PC로 전송 할 때에는 항상 열전냉각기가 작동되도록 하였다. 셔터와 열전냉각기의 제어를 담당하는 프로그램의 알고리즘은 그림 6과 같다.

병렬포트는 PC의 전원을 켰을 때의 자체 초기값을 갖게 된다. 따라서 프로그램을 처음 실행할 때는 셔터와 열전냉각기의 오동작을 방지하기 위해 초기화 과정을 거치게 되고, 초기화 이후에는 관측과 무관하게 기준온도에 대한 온도제어가 이루어지게 된다. 셔터의 개폐상태와 열전냉각기의 작동상태, 그리고 온도센서로부터 읽혀진 CCD의 온도값은 공유메모리에 기록되며, 이 값들은 skycam 프로그램에서 읽혀져 사용자방식 화면(User Interface)에 출력된다.

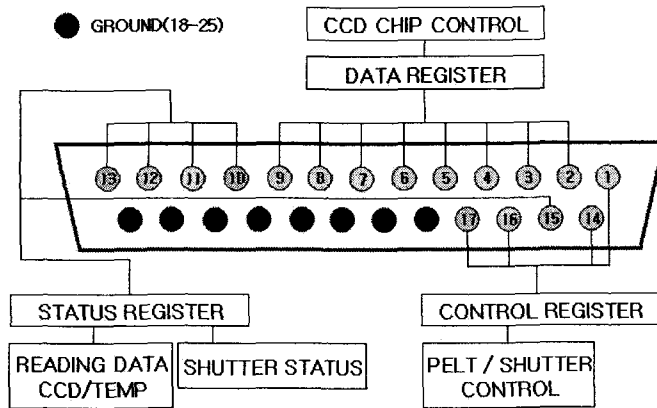


그림 7. PC 병렬 포트의 각 핀에 대한 할당된 신호 배열.

2.5 병렬포트 제어

PC에서 기본적으로 지원되는 병렬포트는 평균 50Kbyte/sec의 전송속도를 가지며, 병렬포트를 이용하여 외부의 하드웨어 제어가 용이하다. 이런 점에서 PC의 병렬포트를, 이 연구에서 개발된 CCD 카메라의 제어 및 데이터 전송에 적용하였다. 그림 7에 병렬포트의 기본적인 신호 규격과 CCD 카메라 제어에 할당된 기능을 나타내었다.

PC의 병렬포트는 크게 데이터 읽기 및 쓰기가 가능한 자료레지스터(Data Register), 읽기만 가능한 상태레지스터(Status Register), 쓰기만 가능한 제어레지스터(Control Register)와 접지선(Ground) 4부분으로 구분되며, 총 25개의 신호선으로 이루어져 있다. 개발된 소프트웨어에서는 CCD의 제어는 자료레지스터, 셔터와 열전냉각기의 제어는 제어레지스터, 데이터의 전송은 상태레지스터를 통하여 이루어진다. 세부적인 사항은 그림 8에 나타내었다.

3. 결과 및 시험 관측

개발된 CCD 카메라는 전천탐사 시스템과 같은 원격관측소의 기상 모니터링과 과학 관측을 위해 사용할 수 있으며, 자동관측 시스템과의 효율적인 연동을 위해 소프트웨어는 자체적인 사용자방식 메뉴 화면은 물론, Linux 프롬프트에서의 작동방식을 지원하도록 개발되었다. 이는 Linux 셸 프로그래밍(Shell Programming)을 통하여 자동관측이 가능하게 해주며, 다른 자동관측 시스템과의 연동을 용이하게 해준다. 자체적인 사용자방식 메뉴 화면은 CCD 카메라의 현재상태(셔터, 열전냉각기, 온도)와 얻어지는 영상에 대한 다양한 정보(화일명, 화소결합수, 노출시간, 영상 평균값 등)를 화면에 보여주고, CCD 카메라 개발 시 각종 시험을 위한 여러 모드(High, Low 신호 인가 등)를 지원한다. 또한 관측 영상의 측광 작업을 위해 필요한 영점영상과 암잡음영상을 얻기 위한 기능이 제공된다. 이 연구에서 개발된 사용자방식의 CCD 제어 프로그램 실행 화면을 그림 9에 보였다.

하나의 영상에서 한 화소의 정보는 16bit로 되어 있고 병렬포트의 상태 레지스터를 통해 4bit씩 4회에 걸쳐 전송한다. 영상 자료의 전송속도는 병렬포트 자체의 전송속도와 개발된 프로그램에 의해

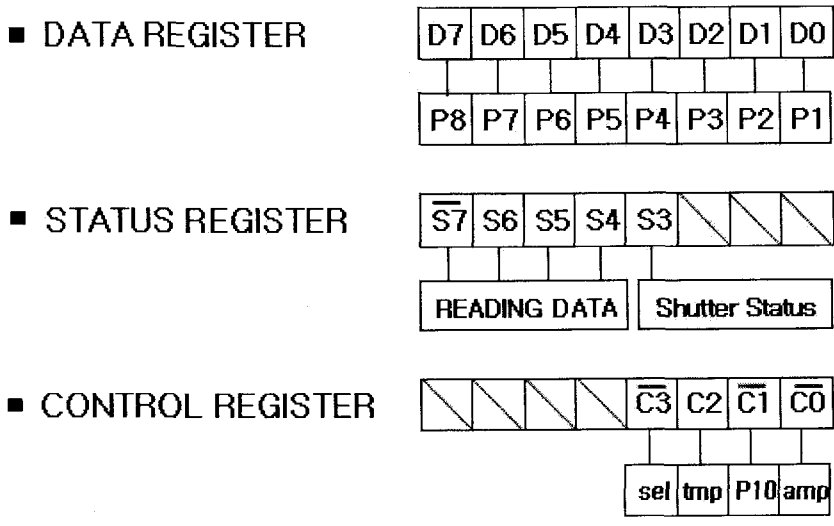


그림 8. PC 병렬 포트 각 레지스터의 세부 신호 규격.

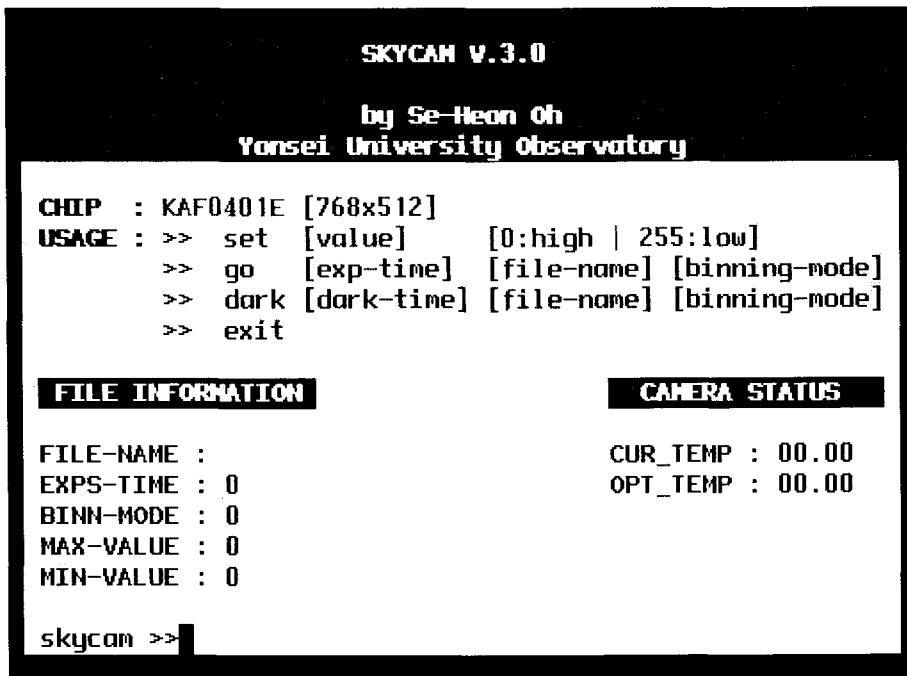


그림 9. 개발된 소프트웨어의 실행 화면.

표 3. 영상 읽기에 소요되는 시간.

	Reading time (sec)
KAF-0401E (768 × 512)	15
KAF-1602E (1536 × 1024)	64
KAF-3200E (2184 × 1472)	134



그림 10. 시험 관측 영상, 노출 30초, 28mm 렌즈, 2004년 5월 19일 21시 29분 촬영.

제한된다. 3종류의 CCD 소자들에 대한 각각의 영상 읽기 시간은 표 3과 같다.

시험 관측은 28mm 표준렌즈와 KAF-0401E(768 × 512) CCD를 장착하여 2004년 5월 19일 연세대학교 천문대 천안 우주탐사관측소에서 이루어졌으며, 시험 결과 영상은 그림 10과 같다. 노출은 30초이고 전처리 하지 않은 영상이다.

4. 전천 탐사용 밤하늘 모니터링으로서의 시험

이 연구에서 개발된 관측 시험이 끝난 CCD카메라들 중, KAF-0401E(768 × 512) 칩을 사용한 CCD 카메라와 28mm 광각렌즈를 사용하여 전천 탐사용 밤하늘 모니터링 시스템을 구성하고, 연세대학교 천문대와 한국천문연구원 공동으로 남아프리카 공화국의 SAAO(South Africa Astronomy Observatory)에 설치 운영중인 전천 탐사 관측소에 설치하였다(그림 11). 관측시험에 사용된 자동 모니터링 프로그램은 C Shell 스크립트와 Source Extractor 패키지 및 C 언어를 사용하여 제작되었다. 이 프로그램은 24시간 자동으로 일출몰 시각과 연동하여 밤하늘을 모니터링하고, 자동 관측시 컴퓨터가 관측 중단과 개시의 판단에 이용되고 있다. 그림 12는 밤하늘 모니터링의 시험 결과 중 대표적인 예이다. 이 연구에서 개발된 CCD 카메라 시스템이 밤하늘의 상태 모니터링에 유용하게 쓸 수 있음을 보여 준다. 밤하늘 모니터링 시스템과 그 연구 내용은 추후 별도로 발표할 예정이다.

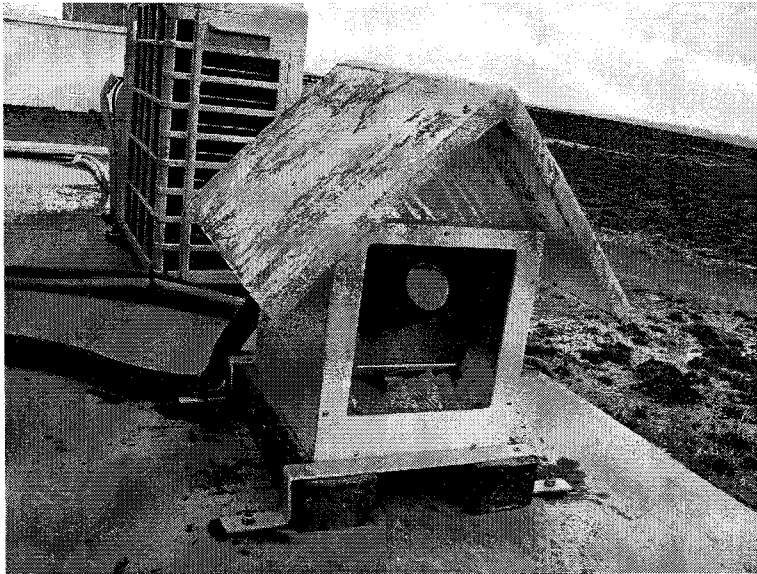


그림 11. 밤하늘 모니터링을 위하여 SAAO의 전천탐사관측소에 설치한, 이 연구에서 개발된 CCD 카메라 시스템의 모습.

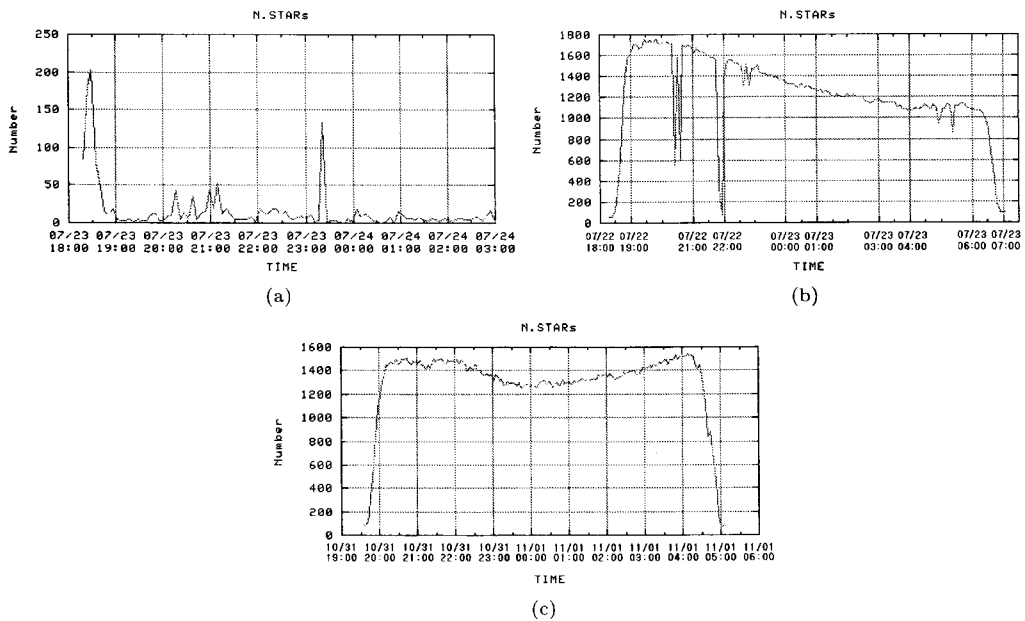


그림 12. 밤하늘 모니터링 시험 결과. (a) 흐린날, (b) 구름이 조금 있는 날, (c) 맑은날 밤 하늘의 starcount.

5. 결 론

천체관측용 고효율 CCD 카메라 시스템과 제어소프트웨어의 독자개발의 시도로 제작된 CCD 카메라의 제어를 위해, 이 연구에서는 독자적으로 CCD 구동 소프트웨어를 개발하였다. 개발된 소프트웨어는 KODAK사의 KAF-0401E, KAF-1600E, KAF03200E, 세 종류의 CCD에 대한 제어 및 셔터 제어와 열전냉각기를 이용한 온도 제어가 가능하다. 이러한 CCD들과 셔터, 열전냉각기의 제어 및 영상 전송은 PC의 병렬포트를 통해 이루어진다. 또한 개발된 CCD 카메라는 별도의 클락 발생기나 컨트롤러를 사용하지 않고 병렬포트를 통해 PC에서 만들어진 클락을 사용하기 때문에, 정교한 클락킹을 위해 소프트웨어적으로 클락 간의 최적 시간 간격을 조절하였다. 영상 읽기 시간은 KAF-0401E, KAF-1602E, KAF-3200E의 각각의 경우 15, 64, 134초가 소요되었다.

개발된 소프트웨어를 사용하여 시험 관측을 수행한 결과, 실제 관측에 적용할 수 있음을 확인하였다. 관측모드는 자동관측을 위한 Linux 프롬프트 상에서의 작동방식과 자체적인 사용자방식 메뉴 화면을 이용하는 작동방식으로 나뉘어지며, Linux 상에서의 작동방식은 전천탐사 시스템과 같은 원격관측소의 기상 모니터링용과 자체적인 관측자동화 프로그램과의 연동에 유용하다. 영상 전송 속도의 향상과 PC의 클락킹 안정성을 확보하면서 통신선 길이를 병렬포트보다 길게 할 수 있다면 보다 편리할 것이다. 이는 병렬포트보다 전송속도가 빠른 USB 포트를 이용하면 해결될 수 있을 것이다.

감사의 글: 이 논문은 학술진흥재단(KRF-2002-070-C00045)의 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- 박병곤, 성현철, 장정균, 장비호, 이병철, 박윤희, 김강민, 한인우 2003a, 한국천문학회총, 18, 75
 박병곤, 장정균, 성현철, 장비호, 김강민, 한인우 2003b, 한국천문학회총, 18, 69
 유영삼, 박수중, 김민진, 이성호, 변용익, 천무영, 한원용 2001, 한국천문학회총, 16, 1
 진호, 한원용, 남옥원, 이재우, 이서구, 이우백 1997, 한국우주과학회지, 14, 259