

## 천문관측용 극미광 영상장비 시험 모델 개발

진 호 · 한 원 용 · 남 옥 원 · 이 서 구 · 이 우 백

천 문 대

### PROTOTYPE DEVELOPMENT OF CCD IMAGING SYSTEM FOR ASTRONOMICAL APPLICATIONS

Jin Ho, Wonyong Han, Wuk-won Nam, Jaewoo Lee, Seogu Lee, Woo-Baik Lee

Korea Astronomy Observatory

(Received November 10, 1997; Accepted November 27, 1997)

#### 요 약

천문대에서 개발 중에 있는 CCD를 사용한 극미광 영상장비의 시험모델 개발과 현재까지의 결과를 논의하였다. 고도의 저잡음도와 안정성이 요구되는 천문관측용 극미광 영상장비는 자외선에서 가시광 및 근적외선 영역에 이르기까지 매우 넓은 파장영역에서 관측을 수행 할 수 있는 장비로서 여러 분야에 널리 사용되고 있다. 그러나 현재까지 국내에서는 이 장비의 핵심부분인 controller의 자체설계 기술이 확보되어 있지 않은 실정이다. 이 연구에서 개발된 시스템의 전자부는 한 개의 EPLD(Erasable Programable Logic Device)에 구현된 controller와, 그 외에 analog driver, video processor로 이루어져 있으며 CCD의 압잡음을 줄이기 위한 방법으로 액체질소 냉각방식을 사용하고 있다. 전체적인 제어와 자료처리는 범용성을 고려하여 개인용컴퓨터(PC)를 이용하였다. 액체질소 냉각용 cryostat와 CCD소자를 제외한 대부분이 자체 설계제작 되어진 이 시스템으로 실험실과 소백산천문대에서 시험영상을 얻는데 성공하였다.

#### ABSTRACT

We present the development process of a prototype CCD imaging system which is being built at Korea Astronomy Observatory(KAO) for astronomical applications. The CCD imaging system requires very low noise and high stability characteristics and is widely used for astronomical purposes from infrared to ultraviolet wavelength regions. However its system design, particularly for the controller design technique, as heart of the system, is not secured in Korea so far. The prototype electronics developed in this study consists of a single chip controller which was implemented in an EPLD(Erasable Programmable Logic Device) and an analog driver, a video processor with a LN2 cooling cryostat. A PC system was employed to control the whole system and to store the image data considering compatibility of the system. We have successfully obtained the first image in the laboratory with the prototype of this imaging system, and an image of the M15 at Sobaeksan Astronomy Observatory.

## 1. 서 론

현재 CCD 영상관측 시스템은 천문관측에 널리 쓰이고 있는 기기로서 영상관측과 분광관측 등에 주로 활용되고 있다. 계속되는 기술개발로 CCD 영상소자의 양자효율이 90%이상 높아지고 있으며 여러 CCD 영상소자를 함께 사용하는 Mosaic CCD 카메라도 활용되고 있다. 과거의 관측기기들 중 광전증배관을 이용한 관측, 사진건판을 이용한 관측 등에 대해서는 이미 많은 연구와 기기 개발 등으로 국내에서도 관측에 잘 활용되고 있다. 그러나 현대의 천체관측의 경우 측광과 분광관측에는 검출기로서 CCD를 많이 활용하고 있으므로 이러한 CCD 영상관측 장비의 자체 설계제작에 관한 연구가 절실히 필요하게 되었다. 특히 상용 제품이나 외국에서 설계 제작된 CCD 관측시스템을 사용하는 경우에 제품이 고장나면 자체 점검 및 수리가 매우 어려운 것이 사실이다. 이는 CCD 영상관측 시스템의 핵심부분인 controller의 설계개념과 시스템 구조에 대하여 완벽한 이해가 전제되지 않으면 시스템 개량이나 수리를 위한 조치가 불가능하기 때문이다. 실제로 최근에 외국의 상용제품 사용중 이상이 발생하여 상당기간 관측이 중단되었던 경우가 여러 번 있었다.

천문관측 목적의 CCD 영상관측 시스템의 기기개발 및 혁신적인 기술발전을 위하여 많은 연구진에 의하여 관련 연구가 수행되었다(Gunn et al. 1987, Leach 1988, Janesick et al. 1988, Reiss et al. 1989, Stover & Allen 1987, Han et al. 1996). 특히 controller 설계 부분에서는 보다 일반적이며 여러 종류의 CCD에 호환이 가능한 controller 개발이 Leach(1988), Reiss et al. (1989), Han et al. (1994) 등에 의해 연구된 바 있다. 이러한 controller는 DSP소자와 마이크로프로세서 소자 등으로 제작되어 있는 경우와(Leach & Denune 1994, Riess 1994) 디지털 논리회로를 EPLD소자에 직접 설계하여 구현된 모델 등으로 크게 분류할 수 있다. 후자의 경우에는 설계개념이 마이크로 프로세서를 이용하는 경우에 비하여 상대적으로 기계어 프로그래밍 등의 복잡한 소프트웨어 작업이 필요하지 않다는 이점이 있다. 이 연구에서는 Han(1993)에 의해 시도되었던 방법을 이용하여 controller를 설계하였다. 이 연구는 CCD 영상관측 시스템 전반에 대한 설계 및 제작을 통하여 천문관측분야는 물론 여러 응용분야에 적용 가능한 기술을 확보하는데 그 목적이 있다. CCD 영상소자와 냉각용 cryostat를 제외한 모든 부분들을 자체 설계제작 되었으며 앞으로 계속적인 안정화 실험을 거쳐 실제관측에 활용할 예정이다. 현재 제작되어 시험 중인 CCD 관측 시스템의 설계와 구조, 각 부분의 기능, 시험관측 및 현재까지의 결과 등에 대하여 논의하고자 한다.

## 2. CCD 영상관측 시스템의 구조

CCD 구동을 위한 시스템의 구성은 그림 1과 같이, 크게 자료처리 및 필요한 명령전달을 하는 컴퓨터, 구동을 위한 전자부, 그리고 CCD를 포함한 냉각기로 구성되어 있다. 자료처리 및 명령전달에 쓰이는 컴퓨터는 범용성을 고려하여 개인용 컴퓨터를 이용하였고 컴퓨터와 전자부간의 인터페이스는 Intel 8255를 이용한 입출력장치를 이용하였으며 전자부는 VME방식을 채택하였다. 전자부는 크게 컴퓨터와 CCD에 명령전달 및 시스템 전반을 운용하는 controller 부분, CCD에 전원을 공급하는

표 1. 실험 및 관측에 사용되는 CCD소자.

| CCD 소자    | 픽셀수       | 픽셀크기           | 실질영상영역        | 제조회사     | 사용목적    |
|-----------|-----------|----------------|---------------|----------|---------|
| CCD 02-06 | 385×578   | 22 μm square   | 12.7×8.5 mm   | EEV(영국)  | 실험용     |
| CCD 05-30 | 1242×1152 | 22.5 μm square | 28×26 mm      | EEV(영국)  | 실험용     |
| SI003AB   | 1024×1024 | 24 μm square   | 24.6×24.6 mm  | SITe(미국) | 실제 사용예정 |
| SI502A    | 512×512   | 24 μm square   | 12.3 ×12.3 mm | SITe(미국) | 실험용     |

analog driver부분, CCD로부터 나오는 출력신호 등을 처리하는 video processor 부분, 그리고 처리된 데이터를 정량화하여 컴퓨터에서 받아들일 수 있도록 하는 digitizer(ADC) 부분으로 나뉘어져 있다. 한편 cryostat 내의 CCD소자 고정 방법과 내부구성은 그림 2와 같이 이루어져 있다.

2.1 CCD 소자

실험용으로 사용한 CCD소자들은 표 1에 정리되어 있는 바와 같으며 현재는 EEV 02-06을 사용하고 있다. 실제 관측에 사용할 CCD소자는 SITe사의 SI003AB(1024 × 1024; 24μm)이다. 이 소자의 특성도 표 1에 정리하였다. CCD소자의 선택을 자유롭게 할 수 있는 것은 controller 설계방식이 어떠한 format의 CCD도 제어 프로그램에서 사용자가 쉽게 조정할 수 있는 범용성을 가지고 있기 때문이다.

2.2 입출력 Interface

컴퓨터와 controller간의 통신은 여러 가지의 방법이 있지만 이 연구에서는 Interface Card로서 Intel 8255를 채용한 I/O 카드를 사용하였다. 이 방식을 선택한 이유는 범용성과 함께 사용하기가 간편하고 PC에서의 제어 소프트웨어를 쉽게 구현할 수 있기 때문이다. 단점으로는 고속의 신호전달 체계에 있어서 작동을 연속적으로 못하는 경우와 8비트 단위로 입출력을 하기 때문에 16비트를 쓰는 방식에는 불편한 점이 있다. Controller와의 명령송수신으로서 쓰이는 이 I/O카드에는 Intel 8255 2개가 내장되어 있어서 address의 선택을 2가지로 할 수 있다. 운영방식은 출력의 경우 mode 1, 입력부는

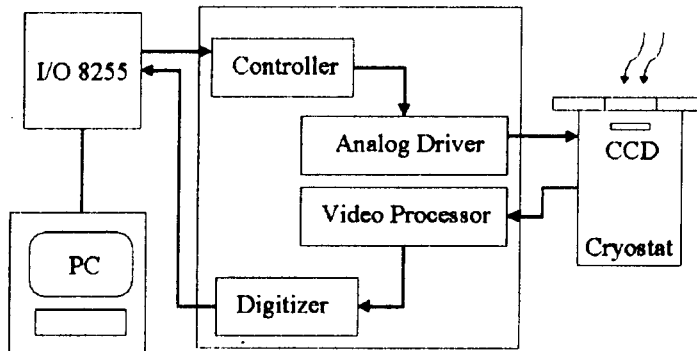


그림 1. 시스템 전체의 구조로서 I/O카드가 컴퓨터에 내장되어 있고 전자부는 controller보드, analog driver보드, video processor(Digitizer포함)보드로 구성되어 있으며 CCD소자는 cryostat 내에 포함되어 있다.

mode 0으로 사용하고 있다(Tompkins & Webster 1988).

### 2.3 제어기(Controller)

Controller는 CCD에 필요한 모든 디지털 구동파형을 처리하며 여러 신호를 제어하게 된다. 이 부분이 CCD카메라 전자부의 설계에 있어서 핵심이 되는 중요부분으로 컴퓨터의 명령을 받고 저장된 명령에 따라 순차적으로 CCD에 필요한 구동파형을 만들어 analog 회로부에 전달되도록 설계되어 있다. 특히 controller는 하나의 소자에 모두 집적되어 있는 EPLD소자를 이용하여 설계가 되었으며 실질적 운용과 내용의 확장성에서도 우수한 적응력을 가지고 있다. 이 controller의 디지털 논리회로를 설계하기 위해서 Altera회사의 MAX+PLUS II electronic CAD system(Altera 1996)을 활용하였고 시스템 설계 및 회로의 운영방법은 한원용 등(1996), 진호와 한원용(1997)에 자세히 설명되어 있다. 그림 3은 controller로 쓰이고 있는 소자의 모습과 CAD시스템에서 설계된 논리회로를 compile과정을 거친 후 자동적으로 할당되어진 핀 배열도이다.

### 2.4 아날로그 신호부(Analog driver)

Analog driver에서는 DAC(Digital to Analog Converter)에서 프로그램이 지정한 명령에 따라 전압이 정해지게되며 뒷단의 op-amp를 통하여 원하는 만큼 증폭을 하여 사용할 수 있게 되어 있다. 여기서 구동에 필요한 펄스형태의 전압은 DAC을 통해 설정된 두 개의 높고 낮은 입력전압을 아날로그 스위치로 선택하여 전달되도록 하였으며 스위치를 제어하는 신호는 controller에서 발생하는 디지털 구동파형 신호를 사용하고 있다. Controller의 회로는 Han(1993)의 설계를 기반으로 구현되었다.

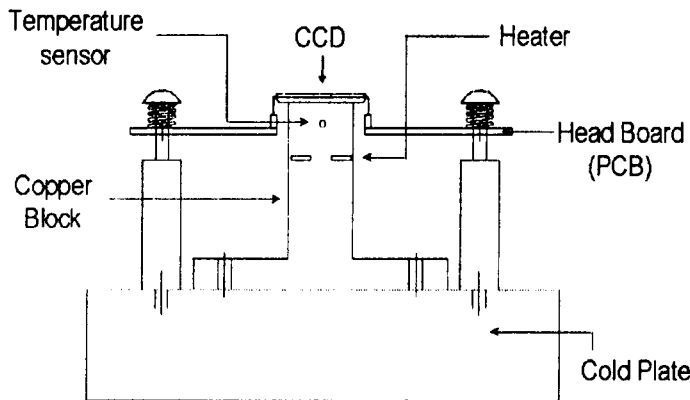


그림 2. Cryostat 내부에 CCD고정 방법은 압축 스프링을 사용하여 cold block에 밀착되도록 하였으며 온도센서와 가열기는 copper block 내에 부착된 모습이다. 저온의 열 전달은 copper block을 고정하는 나사로서 전달되도록 되어 있다.

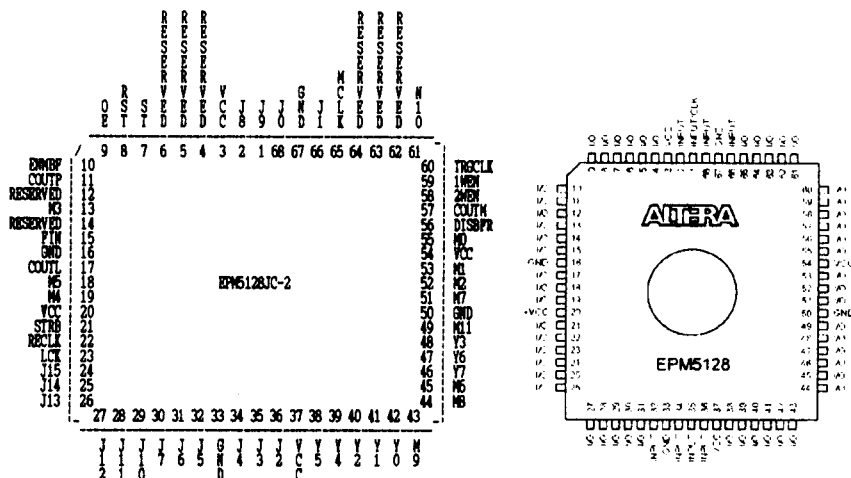


그림 3. CCD controller로 오른쪽의 EPLD 소자의 모습과 프로그램이 완료된 후 정해진 핀 배열을 왼쪽에 표시하였다. EPM5128의 EPLD 소자는 2,500 gate를 사용할 수 있는 용량과 68핀의 배열로 이루어져 있으며 4핀의 전원 입력과 4핀의 그라운드를 접속하도록 되어 있다.

### 2.5 영상처리부(Video processor)

Video processor에서 pre-amp 부분은 일반적으로 널리 쓰이고 있는 회로(Janesick *et al.* 1988, McLean 1997)를, 나머지는 부분은 Leach(1996)의 설계를 기초로 사용하였다. 처리순서는 Pre-Amp, Clamp, Gain, Polarity Reverse, Correlated Double Sampling, Reset의 순서이다. Digitizer(ADC)부분은 video processor로부터 처리되어진 신호를 16 bit의 디지털 신호로 변환하여 opto coupler를 통하여 serial로 출력한다. 한편 8255가 신호를 불연속적으로 읽어오게 됨으로서 일어나는 자료 손실을 방지하기 위해서 FIFO 메모리를 사용하였다. 그림 4는 video processor에서 처리되는 신호의 timing diagram이다.

### 2.6 냉각방법 및 온도조절

CCD의 열잡음을 줄이기 위하여 액체질소 냉각방식을 사용하였다. 질소냉각용 cryostat는 미국 IR Lab회사의 제품을 사용하는데 액체질소 저장용량은 1.61l이며 온도 유지시간은 24시간 이상으로 천체 관측 목적으로 사용하기에 충분하다. 이 cryostat 앞단의 수정창은 1024 × 1024 format의 CCD 소자까지 사용할 수 있는 크기이다. CCD 소자는 온도가 낮아짐에 따라 암잡음 발생은 감소하나 전자의 이동 효율은 낮아지므로 적당한 온도를 유지할 필요가 있다. 이 연구에서는 CCD 소자의 온도 조절을 위하여 1N4148의 다이오드를 온도센서로 사용하고 초소형 마이컴기능을 수행하는 소자(PIC16C74A)를

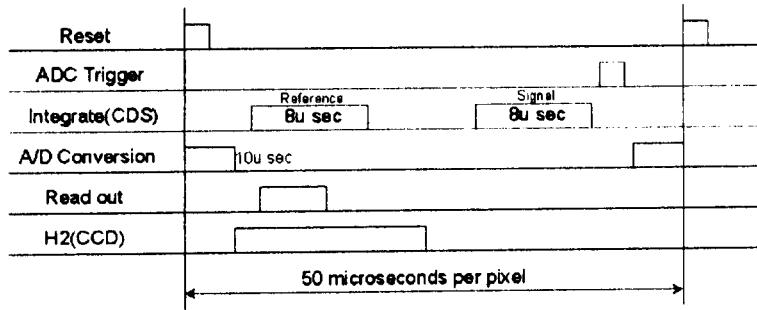


그림 4. Video Processor에서 일어나는 신호처리도. 현재의 시스템은 20KHz 읽기속도를 사용하고 있으며 영상신호의 잡음신호를 줄이기 위하여 CDS(Correlated Double Sampling) 기법으로 처리된다.

이용하여 제어하며 사용자가 지정한 온도를 유지할 수 있도록 구성 되어있다. 가열방법은 일반 카본 저항(1/4W) 150 두 개를 병렬로 연결하여 15V 전원을 가함으로 이루어지며 15V 전압의 입력여부를 마이컴 소자가 판단함으로써 온도를 제어할 수 있다. 그림 2에 온도센서 및 가열기가 설치된 모습을 보였다.

### 2.7 셔터 및 셔터제어부

빛의 노출 제어를 위하여 cryostat 앞단에 64mm 구경의 전자석 개폐식의 셔터를 설치하였다. 셔터 단 노출은 0.1초이며, 이 이하의 개폐는 안정성이 없다. 그러나 현재 이 시스템에서의 노출은 개폐시 모두 열리는 최대 시간이 19ms, 닫히는 최대시간이 24ms로서 중심부와 바깥쪽의 노광량 차이가 크게는 약 45ms 정도이기 때문에 0.1초의 노출시 노광량이 50%가까이 차이가 나므로 0.1초라는 최소 노출시간은 크게 의미가 없다. 이 셔터부 제어용회로는 보현산 천문대에서 개발하여 사용 중인 회로(한인우 등 1996)를 사용하였으며 개폐의 명령은 역시 컴퓨터에서 제어하도록 되어있다.

## 3. 실험방법

실제로 구성된 영상관측 시스템을 이용하여 3가지 방법으로 실험하였다. 첫번째의 방법은 CCD 소자에 붙어 있는 수정창 위에 빛을 막을 수 있는 가림막을 붙여 미광에 노출을 주고 CCD 영상을 얻어 보았고, 두번째는 가림막이 없이 bias영상을 얻어보았다. 이 두가지 방법은 실험실 내에서 이루어졌다. 세번째로 소백산천문대 61cm망원경에 시스템을 부착하여 천체의 영상을 얻어보았다. 이러한 실험을 위해서 cryostat 내의 진공도는 약  $6.0 \times 10^{-6}$  torr 상태로 유지시키고, 냉각온도는 액체질소를 이용하여 약  $-140^{\circ}\text{C}$ 를 유지하도록 하였다. 미광의 노출은 cryostat 앞단의 빛을 통과하는 수정창에 알루미늄 판을 대고 검은 테이프를 막아 테이프 사이로 새어 들어가는 빛을 이용하였고 읽어낼 때에는 빛이 새어 들어가는 것을 방지하기 위하여 암막으로 완전히 빛을 가리고 읽어내기를 시도하

였다. 이 시스템을 운용하기 위한 소프트웨어는 DOS 운영체제에서 사용되는 Turbo C로 작성되었으나, Win95환경에서 사용할 수 있도록 Visual C++를 이용하여 재작성 중에 있다.

운용프로그램에서는 시스템의 전원을 켜 후 사용할 CCD 소자의 화소 수와 CCD에 필요한 전압 크기 그리고 구동파형 전압의 최고값과 최저값을 전달하는 것으로 초기화되며, 이후 읽어내기 명령으로 처리된 화상자료를 전자부로부터 받아들인다. 입력받은 자료는 화면에 바로 표시할 수 있으며, 화상자료를 분석할 수 있는 몇 가지 기능이 첨부되어 있다. 이렇게 얻은 영상자료들은 일반적인 bias화면으로부터 얻은 표준편차로서 안정성 실험을 시도하였다. 보다 정밀하고 실질적인 검증을 위해서는 mean variance 실험 과정을 최종적으로 거쳐야하지만(McLean 1997) 현재의 시험모델로 제작된 이 시스템에서는 각 부분에서의 순차적인 작동여부와 빛의 반응실험으로 정상작동 여부를 판별하였다. 그림 5는 첫번째 실험을 하였을 때의 모습이며 두번째의 실험은 그림 5에서 보이는 CCD 표면의 가림막을 제거하고 수행한 실험이다. 그림 6은 소백산천문대의 61cm반사망원경에 부착하여 실험하는 모습을 보이고 있다.

#### 4. 결과 및 토의

위의 실험에서 얻은 영상자료를 이용하여 제작된 극미광영상장비의 현재의 성능을 검증 하였다. CCD소자 앞의 수정창에 가림막을 하고 미광의 노출로서 얻은 실험 초기의 영상들에서는 잡음 신호가 많이 포함되어 있었으나 빛에 대한 반응이 정상적으로 일어나고 있음을 확인할 수 있었다. 초기의 실험은 회로 전체가 wire wrapping으로 구성되었고 외부의 잡음원에 노출이 심하여 매우 안정적이지는 못하였지만 영상자체를 획득하기에는 큰 문제가 없었다. 1997년 2월경의 초기실험에서 얻은 bias

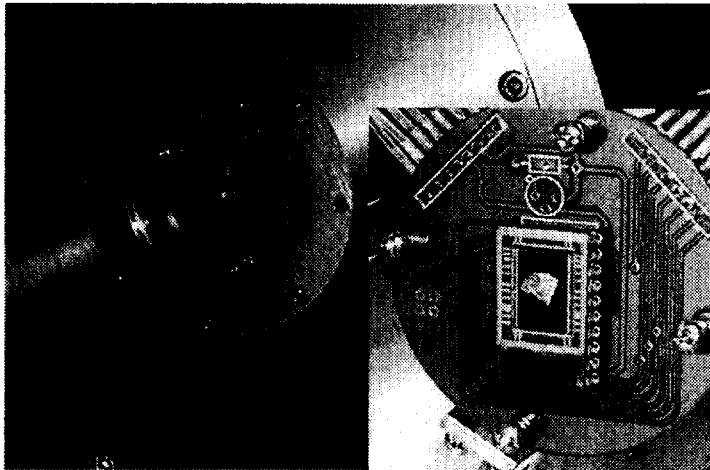


그림 5. CCD소자 앞에 놓인 수정창 위에 가림막을 붙인 모습. 왼쪽은 Heart 심벌을 붙여보았고, 오른쪽은 알루미늄 foil조각을 붙여 실험해 보았다.

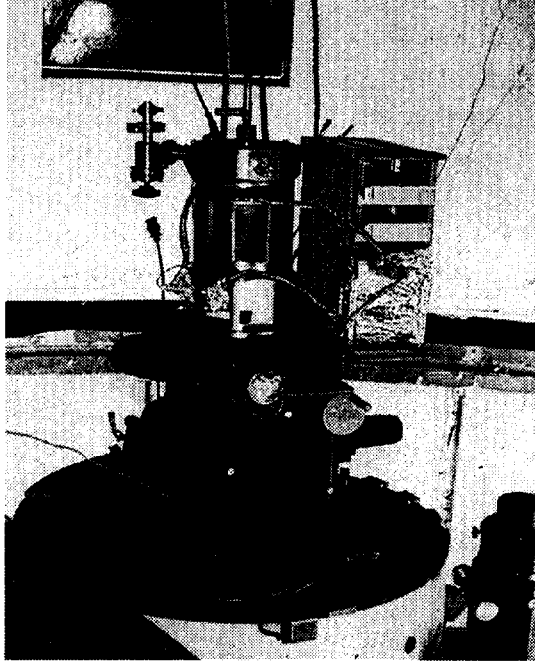


그림 6. 소백산 천문대의 61cm 반사망원경에 부착하여 실험한 모습.

영상으로부터 각 화소들의 표준편차 분석을 해 본 결과, 그 값들은 약 450~600ADU의 큰 편차를 보였으나 이후 회로의 개선과 잡음의 요소를 줄여나가는 작업을 통해 조금씩 안정도를 향상시킬 수 있었다. 시스템 최적화 작업은 그라운드 재배치 및 전자부품의 교환, 전송선 교체, EMI shielding, video processor 회로개선, 구동파형 실험 등의 여러 가지 시도를 통하여 이루어 졌다. 이는 극미광을 다루는 천체관측용 시스템에서 요구되는 저잡음도는 일반적인 영상관측 시스템과는 달리 이론적인 분석 연구가 어렵고, 수많은 시행착오와 실험과정을 통하여 얻어지는 것이 일반적인 개발과정이기 때문이다.

약 8개월의 실험 이후 실험실에서 얻은 bias 영상으로부터 계산된 표준편차의 값들은 평균적으로 250~350 ADU로 낮아졌고 일정한 상태를 유지하고 있었기 때문에 제작된 시스템을 사용하여 소백산천문대에서 시험관측을 시도하였다. 소백산천문대의 61cm 반사망원경에 시스템을 부착하여 얻은 bias 영상에서는 실험실에서 얻은 자료에 비해 5~6배에 가까운 잡음신호가 나타나 상대적으로 불안정한 모습을 보였다. 다른 시험영상은 M15(구상성단)를 대상으로 필터없이 120초의 노출을 주어 얻어보았다. 관측 당일은 맑은 날이었으나 달이 보름달로서 하늘의 밝기가 매우 밝았고 상의 초점



이 정확히 맞추어져 있지 않아 선명한 화상을 얻지는 못했다. 그러나 M15를 대상으로 얻은 영상에서는 M15자체의 구상성단의 모습이 명확하게 구분되어 보여졌지만 잡음신호가 매우 많이 나타나(약 1700ADU) 실질적인 관측용으로 사용하기 위해서는 보다 많은 실험과 개선이 요구되고 있다.

그후 소백산천문대에서 시험관측으로 얻은 bias 영상과, 관측을 수행한 이후 다시 실험실에서 얻은 bias 영상으로부터 각 화소들의 표준편차분석을 비교하여 보았다. 실험실에서 얻어진 bias 영상들은 평균적으로 250~350 ADU의 표준 편차를 보이고 있었으며 관측전에 실험실에서 얻은 것과는 차이가 없었다. 소백산천문대에서 얻은 bias영상의 경우 약 1700 ADU정도의 표준편차를 보이고 있는데 이러한 큰 수치적 변화의 요인은 소백산천문대의 실제 관측환경이 실험실과는 달리 많은 잡음발생 요소를 가지고 있을 뿐만 아니라, 현재의 시스템이 외부로부터 유입되는 잡음신호를 철저히 방지하지 못하는데 원인이 있을 것으로 추정되고 있다. 현재 실험실에서 얻어진 영상에서 나타난 편차의 값은 주로 CCD 소자로 유입되는 bias 전압의 불안정성에 기인한다고 보여진다. 시스템이 '읽어내기' 작동중일 경우 전압의 변동이 크게는 약 50mv까지 발생하는데 이러한 원인과 신호처리 과정에서 잡음이 합쳐져 250~350 ADU 표준편차를 가진 전압변화가 나타날 수 있다. 실험 중 최적의 상태에서는 17~50 ADU의 경우도 있었으나 대부분은 전자와 같은 수준을 보이고 있는 실정이다.

현재의 시작품으로 제작되어진 극미광 영상장비의 시스템은 일반적인 목적의 영상장비로서는 사용할 수 있지만 전문적인 천문관측용으로 사용하기에는 아직 개선해야 할 점이 남아 있다. 그동안 계속 진행되어 왔던 저잡음도 실현을 위한 시스템 최적화 작업에서 얻어진 bias 영상들의 표준편차 값들은 점차 안정화되어 가고 있다. 이 시스템이 전문적인 천문관측용으로 활용될 수 있기 위해서는 공급전압과 구동파형 및 bias 전압 등이 수백 마이크로볼트( $\mu V$ ) 단위의 안정성을 요구하고 있는데, 이러한 저잡음도를 달성하기 위해서는 아직도 많은 시행착오를 통한 연구와 실험이 필요할 것으로 예상하고 있다.

### 참 고 문 헌

- 진호, 한원용 1997, EPLD를 이용한 CCD Controller 설계 (천문대: 대전)  
 한원용, 성인창, 박남규, 박장현, 박승철, 진호, 주영대, 전충남, 김대중, 김재수, 송두중, 경재만, 문홍규, 남옥원 1996, 소백산천문대 천체관측 연구 및 운영 (천문대: 대전)  
 한인우, 오병렬, 심경진, 박영득, 천문영, 박병근, 육인수, 김승리, 장정균, 성현철, 문용재, 장비호, 남옥원, 김강민, 전영범, 경재만, 윤홍식, 안병호, 이동훈 1996, 광학 적외선 천문 관측시스템 개발 (천문대: 대전)  
 Altera 1996, MAX+PLUS II Getting Started (Altera Corporation: San Jose)  
 Gunn, J. E., Emory, E. B., Harris, F. H. & Oke, J. B. 1987, PASP, 99, 518  
 Han, W. Y. 1993, PhD Thesis, University of London, University College  
 Han, W., Clayton, M. & Walker, D. D. 1994, SPIE, 2198, 1158  
 Han, W., Clayton, M. & Walker, D. D. 1996, PASP, 108, 1028  
 Janesick, J., Elliot, T., Bredthauer, R., Chandler, C. & Bruke, B. 1988, SPIE, 982, 70  
 Leach, R. W. 1988, PASP, 100, 1287  
 Leach, R. W. & Denune, J. 1994, SPIE, 2198, 821  
 McLean I. S. 1997, Electronic Imaging in Astronomy (John wiley & Sons Ltd.: New York)

Reiss, R. 1994, SPIE, 2198, 895

Reiss, R., Bauer, H., Deiries, S., D'Odorico, S. & Longinotti, A. 1989, SPIE, 1130, 152

Stover, R. J. & Allen, S. L. 1987, PASP, 99, 877

Tompkins, W. J. & Webster, J. G. 1988, *Interfacing sensors to the IBM PC* (Prentice-Hall International, Inc: Englewood Cliffs)