

## 열전 냉각방식을 이용한 극미광 영상장비 개발

박영식<sup>1</sup>, 이청우<sup>1</sup>, 진호<sup>1</sup>, 한원웅<sup>1</sup>, 남욱원<sup>1</sup>, 이응삼<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국천문연구원

<sup>2</sup>충북대학교

### DEVELOPMENT OF CCD IMAGING SYSTEM USING THERMOELECTRIC COOLING METHOD

Youngsik Park<sup>1</sup>, Chungwoo Lee<sup>1</sup>, Ho Jin<sup>1</sup>, Wonyong Han<sup>1</sup>, Uk-Won Nam<sup>1</sup>, Yong-Sam Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Korea Astronomy Observatory, Taejon, 305-348, Korea

<sup>2</sup>Department of Astronomy and Space Science, Chungbuk National University  
Cheongju, 361-763, Korea

e-mail: parkys@kao.re.kr, jinho@kao.re.kr, whan@kao.re.kr

(Received March 25, 2000; Accepted May 15, 2000)

#### 요 약

한국 천문연구원은 국내 관련 기업과 함께 열전냉각방식 (thermoelectric cooler, 이하 TEC)을 이용한 실용화 극미광 영상장비를 개발하였다. 개발한 모델을 구성하는 부품들은 Kodak사의 KAF-0401E (768 × 512 pixels, blue plus version) CCD 센서를 사용하였고, 국내 업체인 Thermotek의 TEC 모듈을 사용하여 -25℃까지 냉각이 가능하다. 셔터는 Uniblitz사의 VS25S를 사용하여 최소 80ms의 노출을 할 수 있다. PC와의 인터페이스는 현재 한국 천문연구원에서 개발하여 사용중인 ISA 버스의 컨트롤러 보드를 사용하고 12bit 비디오 프로세서인 AD9816을 사용하여 영상을 얻는다. 암잡음은 -10℃에서 0.4e<sup>-</sup>/pixel/s이며 직선성은 99.9 ± 0.1%, gain은 4.24e<sup>-</sup>/ADU이고 전체 시스템 잡음은 25.3e<sup>-</sup>(rms)이다. 실험한 모델은 측광이 가능할 정도 (±0.01등급)의 정밀도를 가지고 천문관측 뿐만 아니라 다른 분야의 영상획득에 유용하게 사용 할 수 있을 것이다.

#### ABSTRACT

We developed low light CCD imaging system using thermoelectric cooling method collaboration with a company to design a commercial model. It consists of Kodak KAF-0401E (768 × 512 pixels) CCD chip, thermoelectric module manufactured by Thermotek. This TEC system can reach an operative temperature of -25℃. We employed an Uniblitz VS25S shutter and it has capability a minimum exposure time 80ms. The system components are an interface card using a Korea Astronomy Observatory (hereafter KAO) ISA bus controller, image acquisition with AD9816 chip, that is 12bit video processor. The performance test with this imaging system showed good operation within the initial specification of our design. It shows a dark current less than 0.4e<sup>-</sup>/pixel/sec at a temperature of -10℃, a linearity 99.9 ± 0.1%, gain

$4.24e^-/\text{adu}$ , and system noise is  $25.3e^-$  (rms). For low temperature CCD operation, we designed a TEC, which uses a one-stage peltier module and forced air heat exchanger. This TEC imaging system enables accurate photometry ( $\pm 0.01\text{mag}$ ) even though the CCD is not at 'conventional' cryogenic temperatures (140K). The system can be a useful instrument for any other imaging applications. Finally, with this system, we obtained several images of astronomical objects for system performance tests.

## 1. 서 론

현재 CCD (charge coupled device, 이하 CCD)는 영상장비에 널리 사용되는 소자로서 천문 관측과 같은 과학 실험용에서 일반 디지털 카메라에까지 매우 다양하게 활용되고 있다. Boyle & Smith (1970)의 CCD 영상소자의 발명 이래로 꾸준히 발전되어진 CCD는 천문관측 목적에서 다양성을 요구하며 계속 발전해왔다. 현재 제품으로 생산되는 단일 크기의 소자는 Philips (1999)에서  $7K \times 9K$  픽셀의 제품이 개발되었고, 지난 20 여 년간 광학천문학을 혁명적으로 발전시켰다. 특히 천문학 분야에서는 관측효율을 크게 높였을 뿐만 아니라 과거의 관측방법들에 비해 많은 정보와 정밀한 관측자료를 얻을 수 있게 되었다. 광학관측에 있어서 광전증배관을 이용하거나 사진 건판을 이용한 관측들이 대부분 CCD로 교체되었기 때문에 CCD 영상 장비에 대한 기본적인 이론과 응용 및 활용에 관한 연구가 절실히 필요한 실정이다.

국내에서 천문관측 관련 CCD 영상장비 활용에 대한 연구는 Han (1993), 진호 등 (1997)에 의해 계속 설계·연구되고 있다. 이 연구는 한국 천문연구원의 우주과학 실험실에서 이루어졌기 때문에 실제 관측시 발생하는 문제점들을 연구팀들이 직접 점검하고 수리가 가능하다. 보현산 천문대나 소백산 천문대 등에서는 액체질소를 이용한 냉각장치를 사용하지만 그 이외의 연구소나 대학 천문대에서는 일반적으로 열전 냉각방식을 이용한 상용 CCD 영상장비를 사용하고 있다. 그 이유는 액체질소를 이용한 냉각 방식보다 냉각효과가 우수하지 못하지만 저렴하고 사용하기가 간편하기 때문이다. 이 연구에서는 열전 냉각방식의 CCD 영상장비에 대한 연구를 통해 기존 상용화된 CCD를 수입해 사용하는 현 실정에서, 기초적인 연구를 통해 상용화시스템이나 대학 천문대 수준에서 사용할 수 있는 CCD 영상장비를 개발하기 위한 목적이다.

## 2. 시스템 구성

이 연구를 통하여 제작한 CCD 영상장비는 크게 전원장치, 냉각장치, 아날로그 전원부와 비디오 프로세서, PC 인터페이스 등으로 나눌 수 있다. 먼저 이번 연구의 영상장비에서 가장 중요한 부분인 CCD 센서는 Kodak사의 KAF-0401E ( $768 \times 512$  픽셀)를 시험모델에 사용하였다. 이 센서는 2상 (two phase) 클럭킹을 사용하며 상온 ( $20^\circ\text{C}$ )에서  $10e^-/\text{pixel}/\text{sec}$ 의 작은 암잡음 특성을 가진다. 이 센서를 선택하게 된 이유는 기존의 상용화 모델인 SBIG (1999), Apogee (1999)

등에 많이 사용되는 센서이면서 한 픽셀의 크기가  $9\mu\text{m} \times 9\mu\text{m}$ 로 작아서 픽셀 분해능이 좋고 가격이 저렴하여 실험 모델 제작에 적합하다고 판단하였다. 전체적인 감지 면적은  $6.9\text{mm} \times 4.6\text{mm}$ 로 좁은 편이나 CCD의 픽셀수가 많아지면 그만큼 읽는 시간이 길어지기 때문에 시험제작에서는 이 CCD 센서를 선택하게 되었다.

CCD와 PC와의 연결은 EPLD (erasable and programmable logic device)를 이용하여 진호 등 (1997)이 개발한 CCD 컨트롤러를 사용하였다. 기존의 컨트롤러는 16 bit의 자료를 8 bit씩 두 번 주고받게 되어 있으나, 이번 연구에서는 12 bit로 한번에 주고받을 수 있도록 수정하여 사용하였다. 또한 CCD에 입력되는 클럭 신호들도 Kodak (1999) KAF-0401E 센서의 특성에 맞게 수정하였다.

TEC 모듈은 국내 업체인 Thermotek에서 개발한 제품을 선정하여 사용하였고, 뜨거운 면과 차가운 면의 온도차이인  $\Delta T_{\text{max}}$ 는 실험실에서 약  $55^\circ\text{C}$ 를 측정할 수 있었다. TEC 자체가 열 펌프처럼 작동을 하기 때문에 펌핑 능력이 뛰어난 모듈을 사용할 경우 냉각 효과를 더 좋게 할 수 있지만 그만큼 방열판 설계에 더 신경을 써야 한다. 실험실의 상온 ( $\sim 25^\circ\text{C}$ )에서 실험을 했을 때, 뜨거운 면은 약  $35^\circ\text{C}$ 정도의 온도가 되었고, 구리 블럭의 온도는  $-15^\circ\text{C}$ 정도를 유지하는 실험 결과를 확인하였다. 냉각의 효율을 높이기 위해서 카메라 몸체를 방열판 기능을 하도록 설계하였다. 또한 효과적으로 열이 전달되도록 열 전달이 이루어지는 각 접촉면에 thermal interface material을 사용하였고 카메라 몸체의 뒷면에 작은 팬을 달아 열 교환이 쉽게 이루어지도록 하였다.

CCD 센서에 들어오는 빛을 차단하고, 노출시간을 조절하기 위해서 윈도우의 앞부분에 셔터를 부착하였는데 최대 유효 구경은 25mm이고, 최소 80ms의 노출이 가능한 Uniblitz (1999)사의 VS25S 셔터를 사용하였다. 이 셔터는 두 장의 스테인레스 판으로 되어있고, 기본적으로 셔터막 표면에 테프론 코팅이 되어있다. 케이스가 있는 경우에는 케이스가 셔터를 보호해 주기 때문에 정밀한 셔터제어가 가능하고, 케이스가 없는 경우 공간의 제한이 따르는 곳에 부피를 줄여 사용할 수 있다. 이 Uniblitz VS25S 셔터는 electro-magnetic actuator에 기초를 두고 펄스가 주어질 때 작동하고 펄스를 제거하면 닫히게 된다.

CCD에 공급되는 전원은 기본적으로  $\pm 15\text{VDC}$ 를 공급하고, 전압 레귤레이터를 사용하여 CCD에 입력되는 여러 종류의 전압레벨을 얻는다. Kodak (1999)에 명시되어 있는 대로 클럭 신호를 공급하는 클럭 전압 신호 발생부는 Samsung (1999)의 KS 7221D 칩을 사용하였다. 클럭 전압 신호를 만들기 위해서 컨트롤러에서 나오는 TTL (transistor transistor logic) 신호가 KS 7221D 칩을 지나면서 잡음성분을 제거하는 동시에 원하는 파형 및 전압레벨을 만들어 주는 방식이다. Vertical 클럭킹 ( $\phi V1, \phi V2$ )에 각각 하나씩의 칩을 사용하고, horizontal 클럭킹 ( $\phi H1, \phi H2$ )에 하나의 칩을, 그리고 reset 클럭킹 ( $\phi R$ )에 하나의 칩을 사용하여 총 4개의 KS 7221D 칩을 사용하였다.

CCD에서 출력되는 비디오 신호를 처리해 주는 비디오 보드에는 12bit 비디오 프로세서인 AD9816 (Analog Devices 1998) 칩을 사용하였다. 이 칩은 8 bit의 gain과 offset 조정이 가능하

표 1. TEC 모듈의 종류 및 사양 (Thermotek 1999).

Model	Q <sub>cmax</sub> (Watts)	I <sub>max</sub> (Amps)	V <sub>max</sub> (Volts)	ΔT <sub>max</sub> (°C)	W	Dimension	
						L	H
TK 03127	27.1	3.7	14.5	67.9	30	30	3.8
TK 04031	8.2	4.7	14.5	67.9	20	20	4.8

며, 세 개의 비디오 신호 (R, G, B)를 동시에 처리할 수 있는 능력을 가졌으나 이 연구에서는 1 채널의 CDS (correlated double sampling) 모드로 사용하였다.

### 3. 냉각 시스템

현재 국내외 천문대의 전문적인 관측연구용 CCD 관측 시스템은 거의 대부분 100K까지 냉각 가능한 액체질소를 이용한 냉각 시스템을 채용하고 있다. Buil (1991)에 의하면 이론적으로는 77K까지 냉각이 가능하지만 극저온 상태에서 카메라 몸체 안의 구성요소들이 오동작 할 우려가 있고, 100K 보다 더 낮은 온도가 되면 CCD 센서의 특성 때문에 전하가 원활하게 전달되지 않는 경우가 발생하여 대개 120~160K 로 냉각을 한다. CCD를 냉각시키는 이유는 빛을 주지 않아도 CCD 센서에 축적되는 암잡음 (dark current)를 줄이기 위해서 이다. 최근의 CCD는 제작 기술이 향상되어 상온 또는 -20°C 정도로만 냉각을 시켜도 적은 암잡음 특성을 갖게 되었으나 장시간 노출을 줄 경우와 S/N비가 낮은 천체를 관측할 경우에는 기존의 액체질소 방식의 냉각을 사용해야 할 것이다. 액체질소를 사용하는 냉각시스템은 시간이 지남에 따라 액체질소가 증발해 버리기 때문에 관측을 중단해야 하며 아울러 설치 및 유지비가 많이 들고, 소형의 망원경에 부착할 수가 없는 문제점이 있으나, 열전냉각방식을 사용하여 CCD를 냉각할 경우 이런 문제점을 해결하여 연속적인 관측을 할 수 있다. TEC란 모듈의 +/-전극에 일정한 전압을 걸어주면 모듈의 양쪽 표면 사이에 온도차이가 발생하는 peltier 효과를 이용한 소자이다. 이 방법을 이용하면 작은 TEC 모듈을 사용하더라도 ΔT~60°C는 쉽게 만들 수 있다. 즉 모듈의 뜨거운 면의 온도가 +35°C이면 차가운 쪽의 온도는 -25°C로 냉각할 수 있어 차가운 면 위에 CCD를 부착하면 -25°C로 냉각시킬 수 있는 것이다.

국내외 여러 업체에서 TEC 모듈을 생산하고 있으나 성능차이가 크게 나지 않았고, 국내의 제품이 오히려 성능이 더 우수한 것도 있기 때문에 국내업체의 제품을 사용하기로 하였다. 국내의 Thermotek이라는 업체에서 여러 종류의 제품을 생산하고 있으나 표 1의 두 모델을 선정하여 실험에 사용하였다. Thermotek (1999)에 의하면 TK 04031은 입력되어야 할 전류가 4A가 넘어서 전류 공급의 문제가 있고, 열 펌핑 능력이 작아 연구에는 TK 03127을 사용하기로 했다.

또한 TK 03127은 TEC 모듈이 가진 단점중의 하나인 습기에 약한 점을 극복하기 위해 모듈의 구리블록들을 공기 중에 노출시키지 않고 실리콘으로 보호되어 있어 거의 반영구적으로 사용이 가능하다. TEC 모듈이 작동할 때에 고온단과 저온단 사이에 급격한 온도차이에 의한 열변형 (thermal stress)이 발생하여 전자냉각모듈의 냉각성능과 수명을 떨어뜨린다. Thermotek은 열변형에 대한 열수축과 팽창을 흡수하는 B.L.형의 모듈을 이미 개발 완료하여 공급하고 있다. B.L.형

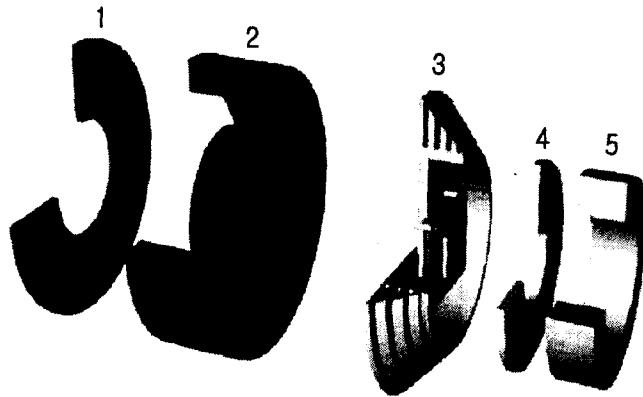


그림 1. 제작한 CCD 카메라 몸체의 전개도.

모듈은 power cycle test에서 타사의 제품과 비교하여 월등히 뛰어난 냉각성과 내구성을 가지고 있으며 반영구적인 수명과 신뢰성을 확보한 전자냉각 모듈이다.

#### 4. 카메라 몸체 제작

CCD 카메라 몸체는 전자부를 부착하고 또한 몸체 자체가 방열판 역할을 하도록 설계하였다. 방열판 역할을 잘 수행할 수 있도록 몸체의 재질은 알루미늄 합금인 두랄루민을 사용하였다. 그림 1은 제작한 CCD 카메라 몸체의 전개도이고, 그림에서 1번은 제작한 비디오 보드와 analog driving 보드가 부착되며 2개의 25핀 커넥터와 팬이 부착되는 뒤 판이다. 2번은 몸체로써 방열판 기능을 하며, 3번은 CCD 카메라에서 가장 중요한 부분으로 TEC 모듈, 구리블럭, 헤드보드, CCD가 부착되어 있고, I/O를 위한 커넥터와 진공상태를 만들기 위한 밸브가 설치되어 있다. 4번은 fused silica window가 부착되며, 5번은 앞서 언급한 Uniblitz VS25S 셔터이다. 그림 1을 실제 조립하여 Nikon 50mm 렌즈를 부착한 모습이 그림 2이다. 삼각대에 직접 부착할 수 있도록 CCD 몸체의 아래 부분에 고정장치를 부착하였다.

가장 중요한 부품들이 배치되어 있는 그림 1의 3부분은 진공상태를 유지할 수 있고, 각 연결부위에 진공용 커넥터와 O-링을 사용하여  $1.0 \times 10^{-4}$  (Torr)까지 진공상태를 유지하는 것을 확인하였다. 하지만 실험실에서의 테스트를 하기 위해 평상시에는 공기를 뽑지 않기 때문에 fused silica window와 CCD 표면에 이슬이 맺히는 것을 방지하기 위해 헤드 내부에 실리카겔을 넣어 두었다. 실제 부품을 부착할 수 있는 진공상태의 공간은 지름 80mm에 높이 25mm의 아주 작은 공간이다. 하지만 이 내부에 TEC 모듈, 구리블럭, CCD 센서가 부착된다. TEC 모듈에서 CCD 센서로 열 전달을 하기 위해 구리블럭을 사용하였다. 공간이 협소한 관계로 작은 구리 블럭이 그림 3과 같이 부착되어 있다. 또한 이 구리블럭과 각 접촉면사이에 보다 효과적인 열 전달을 위하여 thermal

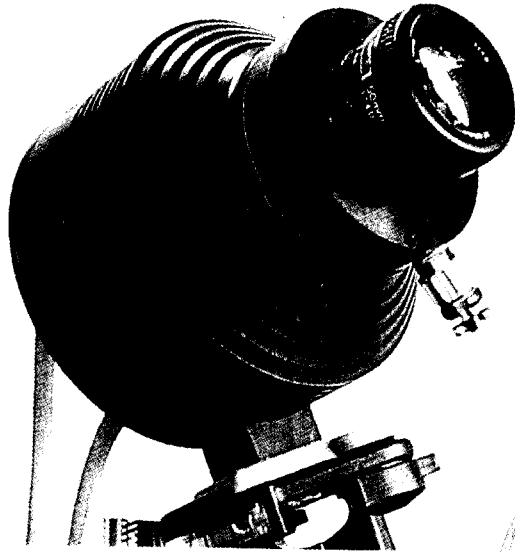


그림 2. 제작한 CCD 카메라.

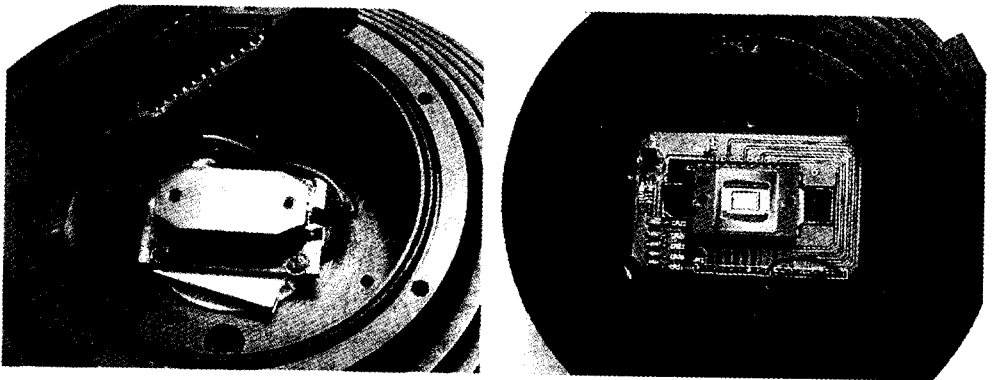


그림 3. 카메라 헤드부분에 장착한 TEC 모듈, 구리블럭, CCD 센서, 헤드보드.

interface material을 사용하였다.

그림 3의 좌측 그림에서 구리블럭 아래의 바닥부분에 부착된 흰색의 것이 TEC 모듈이다. 그 위에 구리블럭이 부착되고, 이 구리블럭을 열전도율이 낮은 플라스틱 볼트를 이용해 카메라 헤드의 바닥부분에 고정시켰다. 구리블럭의 상단부에 M2 (2mm)의 나사 구멍을 내어 CCD와 헤드보드를 부착하였다. 그림 3의 우측 그림이 바로 CCD와 헤드보드가 부착된 모습이다. 이 위에 다시 fused silica window가 있는 부분이 부착된다.

## 5. 성능시험

CCD 영상장비를 제작한 후에는 실제 관측을 하기 이전에 여러 가지 방법으로 시스템의 성능을 측정한다. 이러한 성능시험은 Janesick & Elliott (1992), Leach (1988), Han (1993), McLean (1997) 등에 의해 연구되어 활용되고 있으며 극히 미약한 신호를 처리하는 저잡음 영상시스템에서 일반적으로 사용하고 있는 방법이다. CCD의 전체 표면 검사와 CTE (charge transfer efficiency), QE (quantum efficiency)는 이미 CCD 제작회사에서 수행이 된 자료를 이용하고 다시 측정을 하지는 않았다. 성능시험으로 많이 수행하는 것들은 평균 변이실험 (mean variance test), 시스템의 직선성 (linearity), 시스템의 이득 (system gain) 그리고 시스템의 전체 잡음도 측정 등이다. 이 연구에서는 Han (1993)이 수행한 평균변이측정 (mean variance test) 방법을 기준으로 하여 실험하였다.

### 5.1 직선성 (Linearity) 측정

직선성은 CCD가 포화되지 않는 범위 내에서 얼마나 빛에 일정하게 반응하는 정도를 측정하는 것이다. Buil (1991)에 의하면 적어도 1% (0.01 등급)의 정밀도가 있어야 측광에 사용할 수 있다고 하였다. 이 직선성을 측정하기 위한 방법은 깜깜한 곳에서 균일한 조명을 한 후 CCD 카메라의 셔터 앞에 평평한 흰 종이를 여러 장 대고 적당한 값이 나오도록 설치를 하였다. 너무 빛이 밝거나 종이의 장수가 너무 적으면 1~2초의 노출로도 포화 (saturation)되기 때문에 적당한 양의 밝기와 종이의 장수를 선택하여 실험을 해야 한다. 또한 주변의 다른 잡광이 들어가게 되면 그 밝기의 변화에 따라 실험의 수치가 변하기 때문에 암막을 설치하여 실험하였다. 실험실에서의 측정환경은, 3파장 스탠드를 사용하여 흰 벽에 빛을 조명하고, 거기서 반사된 빛을 셔터 앞면에 흰 종이로 가리고 밝기를 조절하거나 일반 카메라용 ND (neutral density) 필터를 이용하여 광량을 조절하였다. 여러 번의 영상 획득을 통해 적당한 노광 상태를 설정하여 10초 정도의 노출로 포화 상태가 되도록 하였다.

여러 번의 테스트를 거쳐 직선성이 유지되는 구간을 선택하여 그래프를 그려보았다. 이 실험을 하기 위해서는 각각 overscan 영역이 포함된 같은 시간의 노출을 준 두장의 영상을 얻고, image 영역과 overscan 영역에서 50×50픽셀의 영역을 선택하여 각 픽셀의 값을 평균한다. Image 영역의 평균값에서 overscan 영역의 평균값을 뺀 것이 실제 노출 시간의 증가로 밝아진 양이다.

이런 방법으로 각각의 노출시간과 측정된 값을 가지고 그림 4와 같은 결과를 얻었다. 좋은 직

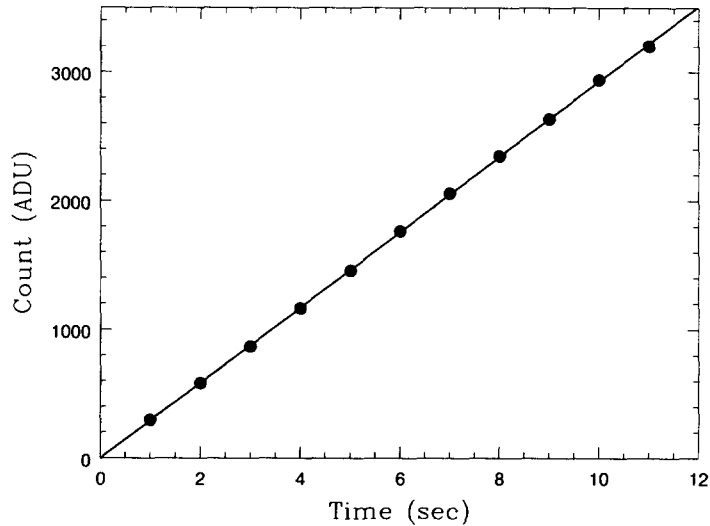


그림 4. 직선성 측정 결과.

선성을 보이며 테스트 결과 직선성은  $99.9 \pm 0.1\%$ 이었다.

### 5.2 평균변이 (Mean-Variance) 측정

평균 변이 실험방법은 직선성 테스트방법과 거의 유사하나, 자료 처리 방법만 약간 다르다. 자료 처리 방법은 image 영역의 평균값을 구하고, image 영역에서  $\sigma^2$ 이 변이 값이다. 이 변이 값과 평균값과의 관계를 그림으로 나타내면 그림 5와 같다. 변이 값이 너무 편차가 심해 비디오 프로세서에 입력되는 gain 값을 조절하고, 시스템의 연결상태를 체크하여 다시 여러 번의 실험결과 얻은 것이 그림 5이다. 이 실험의 결과를 가지고 시스템의 이득값과 시스템 전체의 잡음값을 측정할 수 있다. 그림 5의 실험결과 위 직선을 1차 함수 ( $y=ax+b$ )의 꼴로 나타내면  $y=0.2359x+35.67$ 가 된다. 이 직선의 기울기의 역수 ( $1/a$ )가 시스템의 gain (이득)값이 되고,  $\sqrt{b}$ 가 시스템의 잡음값이 된다. 따라서 시스템의 gain값은  $4.24 (e^-/ADU)$ 가 되고, 시스템 전체의 잡음은  $25.3e^- (rms)$ 가 된다.

또 다른 방법으로 전체 시스템 잡음을 측정할 수 있는데, 위의 방법으로 구한 gain값과 overscan 영역의 표준편차 값의 곱이 바로 시스템 잡음이라고 할 수 있다. 이때 실험으로 얻은 overscan 영역의 표준편차의 평균값이 약 6ADU (analog to digital unit)정도이므로 이 방법으로 측정한 시스템의 잡음은  $25.44e^-$ 이 되므로 거의 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. Han (1993)에 의하면 위 실험 결과가 평균변이 실험의 신뢰도 및 시스템의 안정성이 있음을 알 수 있다.

### 5.3 암잡음 (Dark Count)

액체질소를 사용하는 CCD system의 경우  $-100^\circ\text{C}$  이하로 냉각을 하므로 거의 암잡음은 없다고 볼 수 있다. 하지만  $-20^\circ\text{C}$ 내외의 온도로 냉각하는 열전 냉각방식의 CCD의 경우 100초 이상



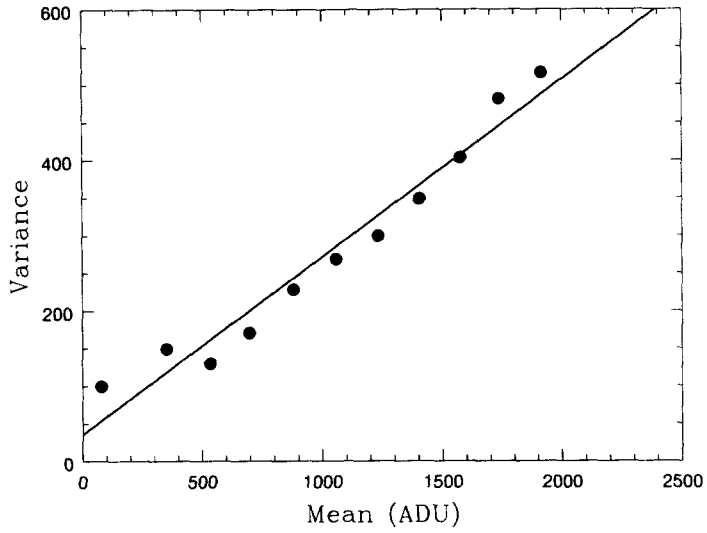


그림 5. 평균변이 실험의 결과.

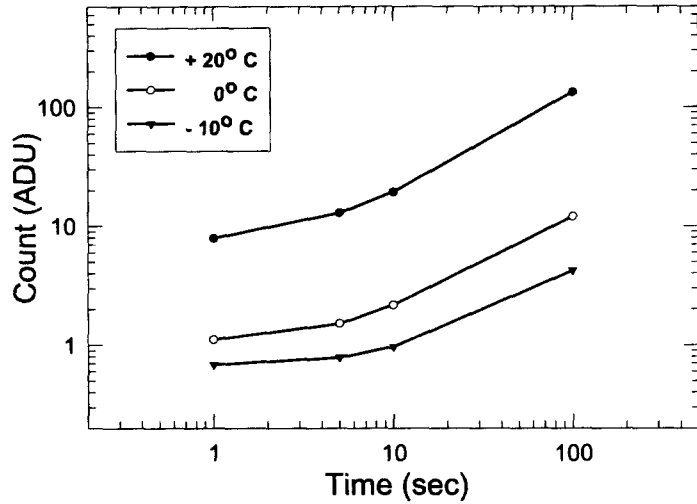


그림 6. 측정된 암잡음 값 (시간 vs. Count).

표 2. 망원경별 CCD 카메라의 시야각.

망원경/렌즈 (구경 / f-ratio)	초점거리 (mm)	시야각 <sup>1</sup> (arcmin)	1 pixel <sup>2</sup> (arcsec)
1.4 inch(F/1.4)	50	475.2×316.2	37.1×37.1
8 inch(F/10)	2032	11.7×7.45	0.91×0.91

<sup>1</sup>시야각은 CCD imaging sensor의 크기인 6.9mm×4.6mm로 계산한 값이다.

<sup>2</sup>1 픽셀의 크기는 9 $\mu$ m×9 $\mu$ m이다.

의 장시간 노출시 적은 양이지만 암잡음이 나타날 수 있다. 따라서 시스템의 암잡음 발생 특성을 측정하는 것은 중요하다 할 수 있다. 이 실험을 할 때는 서터 자체가 미약하나마 빛을 투과시킬 수 있기 때문에 가능하면 암실 같은 곳에서 측정을 해야 한다. 실험 과정은 -10℃, 0℃, +20℃에서 각각 1초, 5초, 10초, 100초의 노출을 주어 암화면을 얻었다. 측정하는 방법은 일정 시간의 암화면 노출을 주고 촬영하여 image 영역에서 overscan 영역을 빼면 남는 값이 암잡음에 의해 증가된 값이 된다.

그림 6은 log 단위로  $x$  (time),  $y$  (count: ADU)축을 표시하였고, 시간이 증가하고 온도가 증가함에 따라 암잡음 값이 증가하는 것을 볼 수 있다. 대개의 CCD 영상장비의 경우 doubling temperature가 약 7℃가 된다. Apogee (1999)에 의하면 doubling temperature란 온도가 어느 정도 증가했을 때 그 두 배만큼의 암잡음 값이 증가하는 온도를 말한다. -10℃일 때 10초의 순수한 암잡음 값은 0.97 ADU이고, 0.4e<sup>-</sup>/pixel/sec가 된다.

## 6. 시험관측

설계·제작한 열전 냉각방식의 CCD 영상장비를 가지고 시스템의 상태를 측정하기 위해 충북대학교 43동 옥상에서 시험관측을 하였다. 관측을 하기 위해서는 적도의 시스템에 부착된 망원경, PC, CCD 영상장비 시스템, 전원박스 등이 필요하다. 적도의는 Losmandy GM8을 사용하였고, 망원경은 Celestron C8 (8 inch, F/10) Schmidt Cassegrain 망원경을 사용하였다.

망원경과 카메라렌즈를 부착하였을 때의 시야각과 픽셀 분해능을 나타낸 것이 표 2이다. 8 inch 망원경에 부착했을 경우 대각선의 시야각이 13 arcmin 정도가 되기 때문에 작은 구상성단을 관측하기에 적당한 값이다. 초점거리 50mm의 카메라 렌즈를 부착하였을 경우 약 8°×5°의 넓은 시야를 관측할 수 있다.

시험관측은 CCD 영상장비 시스템의 제작이 끝난 1999년 10월 중순부터 11월 중순까지 실시하였다. 노출시간을 짧게 주어도 CCD의 반응도가 높아서 10초 내외의 노출시간에도 밝은 별들은 포화되었다. 다음의 영상들은 필터를 사용하지 않고 촬영한 것들이며, 반전시킨 영상이다.

그림 7은 50mm 일반 카메라 렌즈를 부착하여 5초의 노출로 얻은 M45 (Pleiades 성단)의 영상이고 짧은 노출시간임에도 불구하고 10등급 정도의 별까지 검출되었다. 또한 시야에서 나타나는 우측의 배경화면은 청주시의 광공해로 나타난 것이다. 그림 8은 8 inch 망원경의 초점면에 CCD를 부착하여 30초의 노출로 얻은 M42 (Orion 성운)의 영상이다. 30초의 노출로도 밝은 별들은 이미 포화되었고, 성운의 희미한 형태를 알아볼 수 있다. 화면상에 나타나는 가로줄 무늬는

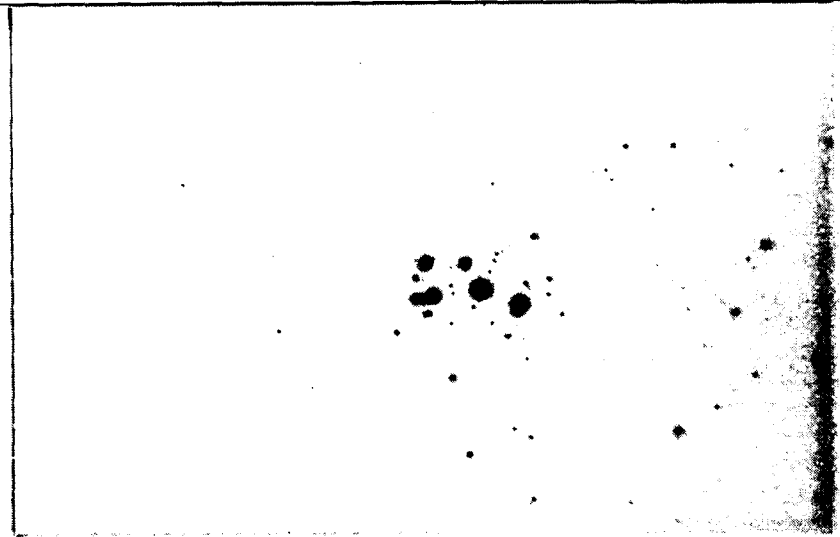


그림 7. 관측한 M45의 영상 (1999. 11. 3., 5sec, 50mm, f/1.4 lens).

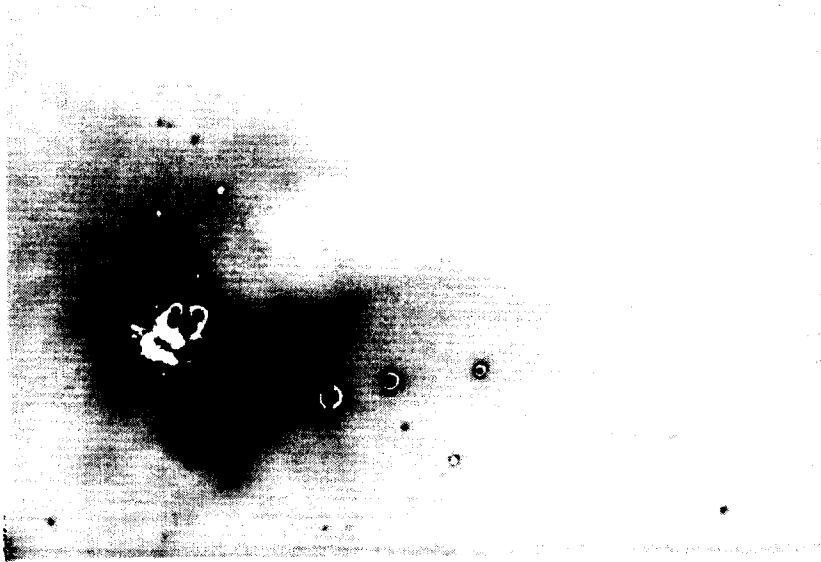


그림 8. 관측한 M42의 영상 (1999. 11. 3., 30sec, 8 inch, f/10).

표 3. 설계·제작한 열전냉각방식 CCD의 주요 성능과 구성요소.

구성요소	부품 및 사양	특징
CCD Image Sensor	Kodak KAF-0401E	Blue plus version
Quantum Efficiency(%)	40 / 50 / 60	$\lambda = 0.45 / 0.55 / 0.65\mu\text{m}$
Window	Fused Silica	
Cold Finger	Copper Block	
TEC module	TK 03127	3A 12VDC
냉각방식	Thermoelectric Cooling	-25℃까지 냉각 가능(@25℃)
방열판	Housing 자체	알루미늄 합금
Video Processor	AD 9816	12 bit video processor
Analog Driver	KS 7221D	
Controller	EPLD를 이용한 ISA 방식	
Linearity	99.9±0.1%	
Dark count	0.4e <sup>-</sup> /pixel/sec	-10℃일 때 10초의 image에서
Gain	4.24e <sup>-</sup> /ADU	
System Noise	25.3e <sup>-</sup> (rms)	

패턴 잡음으로 bias가 불안정하여 나타나는 것으로 해석 할 수 있다. 앞으로 필터시스템이 갖추어진 곳이나 작은 필터시스템을 구축하여 많은 관측을 실시하여 측광을 실시하여 시스템의 성능을 측정할 예정이다.

## 7. 향후 연구방향 및 결론

국내의 천문관측용으로 사용하는 액체질소를 이용한 냉각방식의 CCD 영상장비 시스템에 대한 연구는 국내에서도 시도되어진 적이 있으나 열전냉각방식의 시스템에 대한 연구는 아직도 미흡한 상태이다. 이 연구에서 제작된 천문관측용 열전 냉각방식의 CCD 영상장비 시스템의 전반적인 구성과 시스템의 성능 측정 및 시험관측에 대해 서술하였다. 현재의 시스템은 아직 최적화가 되지 않아 잡음성분이 많이 있어 실제적인 관측용으로 활용하기 위해서는 지속적인 연구가 더 필요하다. 주요 시스템의 구성은 표 3과 같다.

이 시스템은 앞에서 언급한대로 Kodak사의 KAF-0401E CCD 센서를 사용하였고, 냉각시스템으로는 열전 냉각방식을 채택하였다. 이 방법으로 -25℃까지의 냉각을 할 수 있었고, 온도 제어의 오차는 ±0.2℃이었다. 하지만 계절적으로 동절기에는 상온이 0℃일 경우에는 -40℃까지의 냉각도 가능할 것이다. 진호 등 (1997)에 의하면 한국천문연구원에서 제작한 액체질소를 이용한 냉각방식의 CCD 영상장비의 경우  $1.0 \times 10^{-5}$  (Torr) 상태에서 1.6리터의 액체질소를 주입하고 24시간 이상 일정한 (-110℃) 온도를 유지한다고 한다. 이 경우 거의 압잡음은 없지만 이 연구에서 열전 냉각 방식의 장비의 경우 압잡음 값을 측정한 결과 -10℃에서 10초 동안의 자료로 0.4e<sup>-</sup>/pixel/sec가 나왔다. 이 연구를 통하여 열전 냉각방식의 CCD 영상장비 시스템을 설계·제작해 보았으나, 제작시 여러 가지 문제점들이 발생하고 처음 시도되는 냉각기 부분의 효율적인 설계 등으로 제작이 쉽지 않았다. 또한 연구에 사용한 CCD 센서의 크기가 너무 작아서 망원경에 부착시 시야가 좁은 것은 사실이나 기본 구동회로는 같기 때문에 기본회로의 변화 없이 픽셀수가 많은 CCD 센서로 교체하면 좀더 넓은 시야를 확보할 수 있을 것이다.

이 연구에서 설계·제작한 영상장비 시스템과 현재 상용화 제품으로 국내외에 많이 보급되어

표 4. 상용화된 CCD 영상장비 시스템과의 비교.

Model	Ours	Apogee		SBIG	
		KX1E	AP7	ST-7	ST-8
CCD 센서	Kodak KAF-0401E	Kodak KAF-0400E	SITe SIA502AB	Kodak KAF-0401E	Kodak KAF-1602E
Array (픽셀)	768×512	768×512	512×512	768×512	1536×1024
픽셀의 크기 (μm)	9×9	9×9	24×24	9×9	9×9
감지면적 (mm×mm)	6.9×4.6	6.9×4.6	12.3×12.3	6.9×4.6	13.8×9.2
Well depth (e <sup>-</sup> )	85,000	85,000	300,000	85,000	100,000
전하전달효율 (%)	99.999	99.999	99.999	99.999	99.999
Read out noise (e <sup>-</sup> )	10~20	15	10	15	15
Digital resolution	12bit 100KHz	14bit 1.3MHz	16bit 30KHz	16bit 30KHz	16bit 30KHz
암잡음 (e <sup>-</sup> /pixel/sec) at -10℃	0.4	0.2-0.6	1	0.5	0.5
TEC Cooling (below ambient :℃)	50	35~40	50	35~40	35~40
PC 인터페이스	16Bit ISA	16Bit ISA	16Bit ISA	standard parallel port	standard parallel port

있는 SBIG (1999), Apogee (1999) 모델의 기본적인 성능들을 비교해 표 4에 나타내었다. 각 모델들은 Kodak사의 센서를 많이 사용하였고 Apogee의 AP7은 SITe의 센서를 사용하였다. SITe의 센서는 한 픽셀의 크기가 24μm로 크기 때문에 감지면적이 큰 편이며 많은 전하를 축적할 수 있다. 전하전달 효율은 (CTE) 대부분 99.999%를 보이고 있다. 비디오 프로세싱 방법의 차이로 12bit에서 16bit의 영상처리를 하며, 우리의 모델은 12bit의 영상처리를 하기 때문에 다른 제품들에 비해 다소 성능이 떨어지는 부분이나 비디오 프로세서를 교체하면 16bit의 영상처리도 가능할 것이다. 비교한 모델들이 대부분 작은 암잡음 특성을 보이며 우리의 모델이 약간 우수한 특성을 보이며, 모두 열전 냉각방식을 채용하였으나 우리의 제품이 냉각효율이 우수한 편이다. 우리의 모델과 Apogee의 모델은 16bit ISA 방식으로 PC와의 인터페이스를 수행하나 SBIG의 모델은 병렬 포트를 이용하기 때문에 손쉽게 PC와 연결할 수 있다는 장점이 있다. 전체적인 성능 및 감지면적 등은 Apogee의 AP7, SBIG ST-8 모델이 가장 우수하나 가격이 너무 비싸고, 냉각 효율이나 암잡음은 이 연구에서 설계·제작한 모델이 다소 우수하다. 우리가 제작한 CCD 영상장비는 외국의 상용제품에 비해 크게 성능이 떨어지지 않으나 아직 개선해야 할 점들이 몇 가지 남아있다.

현재 bias 영상에 많은 잡음성분이 들어가 있으나 관측과 실험을 통해서 이 잡음 성분을 제거해야 하고, 더 낮은 온도까지의 냉각을 하기 위해 다단계의 TEC 모듈을 사용하는 것에 대한 연구도 시도할 예정이다. 또한 방열판의 적절한 설계와 강제 송풍식과 수냉식의 방법도 고려해야 할 것이다. SBIG, Apogee의 모델을 보면 사용자가 사용하기 쉽고, 설치하기도 쉽게 되어 있고 크기도 작다. 현재의 모델은 개발되는 단계의 초기 시험모델로서 크기도 크고 무게도 많이 나가기 때문에 작은 망원경에 부착하기 어려운 문제가 있다. 따라서 크기를 축소하면서도 방열판의 기능을 잘 할 수 있는 몸체 디자인 등에 대한 연구가 더 진행되어야 할 것이다.

본 연구에서 개발되어진 시스템을 보다 개선하면 영상 관측용 장비로서 기존의 연구, 실험용 및 상용의 광학 카메라를 대체할 수 있는 고기능의 다목적 영상장비로서 사용할 수 있다. 또한 이러한 기술개발로서 관련분야 특수 목적의 영상탐지장비 주문제작에 기초 연구자료로 활용이 가능

하며 고가장비인 천체관측 시스템, 교육목적으로 사용할 수 있는 경제적인 보급형 장비활용, 더 나아가 인공위성 원격탐사 영상탐지 시스템 국내개발을 위한 기술로의 활용 등 많은 부분에서 응용이 가능할 것으로 예상된다. 앞으로 위에서 언급된 문제점등을 보완하여 개선해 나간다면 보다 다양하고 기술 집약적인 영상장비를 개발하는데 기반이 되는 원천기술요소로 활용될 수 있을 것이다.

### 참고문헌

- 진호, 한원용, 남옥원, 이서구, 이우백 1997, 한국우주과학회지, 14, 259
- Analog Devices 1998, AD9816 Data Sheet
- Apogee 1999, Apogee CCD Camera Homepage, URL: <http://www.apogee-ccd.com/>
- Boyle, W. S., & Smith, G. E. 1970, The Bell System Technical Journal, 49, 4
- Buil, C. 1991, CCD Astronomy (Richmond: Willman-Bell, Inc.), 131, 259
- Han, W. Y. 1993, PhD Thesis, University of London
- Janesick, J., & Elliott, T. 1992, in ASP Conference Series, vol.23, Astronomical CCD Observing and Image Reduction Techniques, ed. S. B. Howell (California: BookCrafters, Inc.), 1
- Kodak 1999, KAF-0401E Full Frame CCD Image Sensor Performance Specification
- Leach R. W. 1988, PASP, 100, 1287
- McLean, I. 1997, Electronic Imaging In Astronomy (Chichester: Praxis pub.), pp.271-306
- Philips 1999, The World of Philips Imaging page,  
URL: [http://www-us.semiconductors.philips.com/imagers/prod/b\\_block.htm](http://www-us.semiconductors.philips.com/imagers/prod/b_block.htm)
- Samsung 1999, KS7221D Datasheet
- SBIG 1999, Santa Babara Instrument Group Homepage, URL: <http://www.sbig.com/>
- Thermotek 1999, Thermotek Homepage, URL: <http://www.thermotek.co.kr/>
- Uniblitz 1999, Uniblitz Shutter Homepage, URL: <http://www.uniblitz.com/>