

천문대 극미광영상장비의 성능 시험
PERFORMANCE TEST OF THE KAO CCD IMAGING SYSTEM

진호, 한원웅, 이서구, 이우백

천문대

JIN, HO, HAN, WON YONG, LEE, SEOGU, LEE, WOO-BAIK

Korea Astronomy Observatory

(Received November 18, 1998; Accepted December 4, 1998)

ABSTRACT

Korea Astronomy Observatory (KAO) recently developed a new model of CCD imaging system for astronomical purpose. This paper presents system structure and electrical circuit descriptions with the performance of the CCD imaging system. The developed system can handle astronomical image acquisition with additional functions of on-chip binning, sub-image acquisition using a SITe 1024 x 1024 CCD chip. Particularly the controller design of the system allows us great flexibility and versatility with the software system control and it is possible to cope with any format CCDs by any manufactures, in principle. The system performances are derived by mean variance test in our laboratory, which shows that the total system noise $10.5e^{-}$ (R.M.S), Gain $1.9e^{-}$ /ADU, non-linearity 0.37%

1. 서론

현재 CCD는 대부분의 모든 영상장비에서 사용되는 소자로서 과학실험목적에서 일반 디지털 카메라에 이르기까지 매우 다양하게 활용되고 있다. 1970년 Boil & Smith의 CCD영상소자의 발명(Boyle & Smith 1970)이래로 꾸준히 발전되어진 CCD소자는 천문관측 목적에서 다양성을 요구하며 계속 발전 해, 현재 제품으로 생산되는 단일 크기의 소자로는 4096 x 4096 크기까지 이어지고 있으며(Kodak 1995) 지난 20여 년간 광학천문학을 혁명적으로 발전 시켰다(Mackay 1986, Janesick & Blouke 1987). 국내에서도 광학 천문관측에 있어서 CCD영상장비의 활용은 필수 관측장비로 자리잡고 있다. 그러나 현재 국내에서 활용중인 고가의 CCD영상장비가 모두 외국에서 설계되었거나 외국의 상용제품을 사용함으로써 특정한 연구목적에 부합되는 CCD영상장비의 응용이나 제품에 문제가 발생했을 때 관측을 중단하는 등의 어려움 있어 CCD영상관측장비의 자체 설계제작에 관한 연구가 절실히 필요하였다. 이에 천문대에서는 CCD영상장비를 자체 개발하여 기본적인 시험관측을 끝내고 실제 관측에 활용할 수 있게 되었다.

최근 급속히 발전해온 CCD영상장비는 운용하는 방법 중에서 제어기(controller)의 제작 접근

방식은 Leach (1988), Reiss et al. (1994), Han et al. (1994, 1996) 등에 의한 연구와 저 잡음 특성을 위한 연구는 Janesick et al. (1988) 등에 의해 수행되었다. 특히 천문관측목적에 사용되는 CCD영상시스템의 경우 저 잡음과 넓은 동적 범위(dynamic range)를 요구하며 영상영역이 보다 넓은 CCD소자를 활용하고 있다(Holst 1996). 이러한 저잡음의 기능을 요구하는 CCD영상시스템 개발의 경우 시스템전체의 특징과 성능을 확인하기 위한 실험방법은 Janesick et. al. (1987), McLean (1997) 등에 의해 연구된 방법이 주로 활용하고 있다.

천문목적에 사용되는 CCD의 읽어내기 방법은 느린읽어내기(slow scan)방식의 전형적인 방법과 적응광학(Adaptive Optics)용에 사용되어지는 wave front sensor처럼 작은 영상영역을 매우 빠르게 읽어내는 방식(Burley et al. 1998) 등 다양하다. 본 연구에서 개발된 CCD영상장비는 일반적으로 사용되는 full frame CCD를 사용한 느린읽어내기 방식을 사용하고 있다.

이 연구에서는 천문대에서 개발된 CCD영상시스템의 구성과 새로운 설계 개념 및 이 시스템의 성능시험결과를 서술하였다. CCD와 냉각용 듀어(Dewar)를 제외한 모든 부분을 자체 설계 제작된 CCD영상 시스템은 개인용 컴퓨터(PC)를 사용하여 시스템을 제어하고 전자부는 제어기(controller), 아날로그 구동부(analog driver), 영상처리부(video processor)로 구성되었다. 현재의 시스템은 AR (anti-reflection)코팅이 된 후조명(back illuminate) 1024 x 1024(SITe)의 CCD를 사용하고 있고 binning, 부분영상(sub-image)획득 등의 기본적인 기능을 가지고 있다. 특히 전자부는 원칙적으로 어떠한 CCD를 사용하여도 소프트웨어에서 조정으로 작동할 수 있도록 설계되어 있기 때문에 호환성이 뛰어나다. CCD영상관측시스템의 자체개발로서 관측목적에 맞는 시스템 개발과 유지보수가 보다 쉽기 때문에 관측의 효율을 높일 수 있는 장점과 보다 다양한 영상관측장비를 위한 기술 축적으로 저 비용의 관측장비를 갖출 수 있게 되었다. 이 연구에서는 진호 등(1997)의 연구에서 다루지 않았던 시스템개발 및 성능시험결과를 논의 하고자 한다.

II. EPLD를 이용한 CCD 제어기

전체 시스템에서 CCD와 신호의 입출력을 다루는 중심부는 제어기이다. 이 연구에서 사용되어진 제어기의 경우 자체 설계 제작한 EPLD (Erasable Programmable Logic Design)를 이용하여 시스템 전체의 신호를 제어하게 되며 운용방법과 기능은 한원용 등(1996), 진호와 한원용(1997)에 설명되어 있다. 이전의 Intel 8255를 이용한 방법(진호 등, 1997)을 바꾸어 컴퓨터와 제어기의 통신방법은 개인용 컴퓨터의 ISA 버스를 이용하며 개인용 컴퓨터 슬롯에 제어기가 장착되도록 구성되어 있다. 제어기는 전체신호제어를 담당하는 EPLD와 32K의 정적기억장치(Static Memory), CCD로부터 나오는 신호를 직렬방식으로 받기 때문에 16 비트의 자료를 가진 직렬신호를 병렬신호로 바꾸어주는 shift register와 이후 처리된 자료를 순차적으로 안정되게 받기 위한 FIFO로 구성되어 있다. CCD에서 저장된 전하를 이동하기 위한 수직과 수평파형신호들은 EPLD 내부의 순차구동부에서 발생하는 신호가 외부의 기억장치에 저장되어 있는 파형신호를 발생하도록 한다. 전형적인 CCD구동에 사용되는 타이밍도는 그림 1에서 보였다.

각각의 비트는 프로그램에서 8비트씩 묶인 신호를 2번에 걸쳐 EPLD를 통해 외부 메모리에 쓰여져 총 16개의 파형신호를 제어 할 수 있도록 되어 있다. 16개의 신호들은 전하의 수평이동

에 필요한 S1, S2, S3, SW, 수직이동에 필요한 P1, P2, P3, TG와 나머지 신호들은 CCD로부터 출력되는 신호를 처리하는데 사용되어지는 것으로 이중적분회로의 On/Off신호, 극성전환 스위치, 적분과 초기화, ADC의 제어신호로서 사용되어 진다. 사용하지 않은 여분의 비트들은 컨트롤러에서 사용되거나 다른 기능을 첨가 할 수 있다. 이러한 16비트의 파형신호와 함께 CCD의 픽셀갯수와 파형의 주기횟수는 프로그램으로부터 EPLD와 이것을 거쳐 메모리 소자에 전달되기 때문에 어떠한 CCD도 구동할 수 있는 범용성을 가지게 된다.

일반적으로 CCD작동에 필요한 파형은 수직이동 파형과 수평이동 파형 그리고 나머지 영상신호처리에 관련된 부분으로 제작회사에서 제시되는 사양이 나와 있기 때문에 이를 기준으로 사용하면 되지만 이러한 파형은 실제 시스템 구동을 위해 최적화 과정을 거치는 동안 조금씩 변하게 된다. full frame 전송방식을 사용하는 CCD의 경우는 작동 방식이 대부분 같은 방식을 사용하기 때문에 더 많은 신호가 첨부되거나 크게 변경되어야 하는 일이 없다. MPP(Multi-Phase Pinned)모드를 지원하는 CCD의 경우에서도 파형의 모양이 바뀌는 것이기 때문에 컨트롤러 하드웨어의 변경이 필요하지 않다(SITe 1996).

III. 회로 구성

전체 시스템에는 제어기 외에 아날로그 구동부와 영상처리부가 있다. 이 부분들은 이전에 발표되어진 논문(진호 등 1997)과 개념은 같으나 전자부품과 배열이 변경되었다. 아날로그 구동부는 컨트롤러의 파형신호로부터 들어오는 로직수준의 신호를 CCD에서 요구하는 전압수준으로 변화시켜주는 부분과 고정적으로 입력되는 DC 바이어스 전압을 제공하는 기능을 담당하고 있

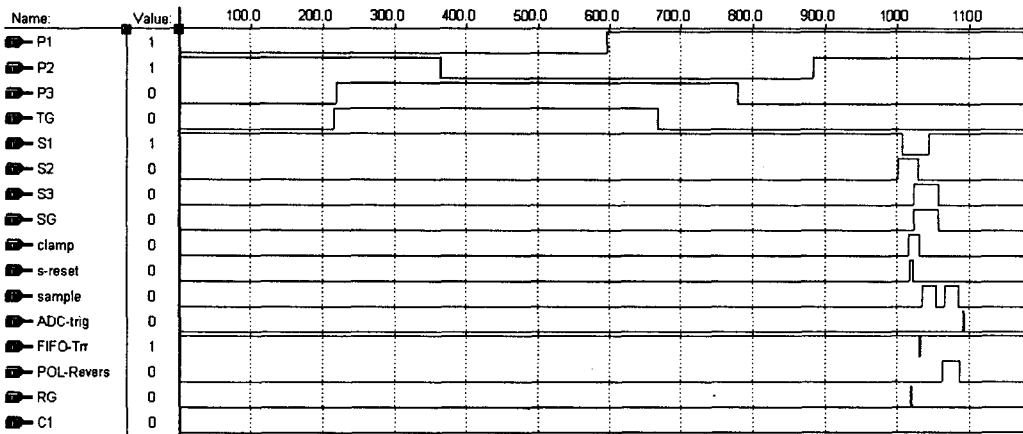


그림 1. 제어기에 기억되는 타이밍으로 0부터 1000까지는 수평이동에 사용되는 파형이며 1001부터 1100까지는 수직이동과 화상처리 신호에 사용되는 파형이다. 전부 16개의 파형신호를 제공한다.

다. 그림 2에서 보인바와 같이 회로의 개념은 아날로그 스위치를 이용하여 전압수준을 변화시키는 방법을 사용하고 있으며 CCD로 전해지는 전압수준의 상승, 하강시간간격은 2 μ s이하이다.

그러나 이 신호가 CCD와 연결이 되면 상승, 하강의 시간 간격이 늘어나게 되며 늘어나는 비율은 전압이 걸리는 픽셀의 개수에 따라 달라지기 때문에 실험으로 확인하여 파형의 간격을 조정하였다.

영상처리부는 CCD로부터 출력되는 신호를 처리하여 디지털화된 신호를 전해주는 부분이다. CCD로부터 나오는 출력신호는 약 1.5 μ V/e-이하의 매우 미약한 신호이기 때문에 처음에 신호의 증폭단계가 매우 중요하다. 현재 초기증폭(preamp)은 차동증폭회로를 이용하여 신호를 10배 증폭하며 신호의 증폭도는 변화가 가능하다. 신호처리과정에서 클램프, 이득조정, 극성전환, CDS (correlate double sampling)등에 사용되는 스위치는 DG403을 사용하였다. 특히 Leach가 설계한(Leach 1997) 영상처리부의 OP27과 OP37은 우리의 영상처리부에서 사용해 본 결과 직진성과 안정성에서 많은 문제가 있었다. 따라서 주파수대역폭이 크지 않은 이 부품들을 AD744 (Analog Device 1996)로 교체한 결과, 저잡음도, 직진성의 반응범위 등에서 크게 향상된 기능을 얻을 수 있었다.

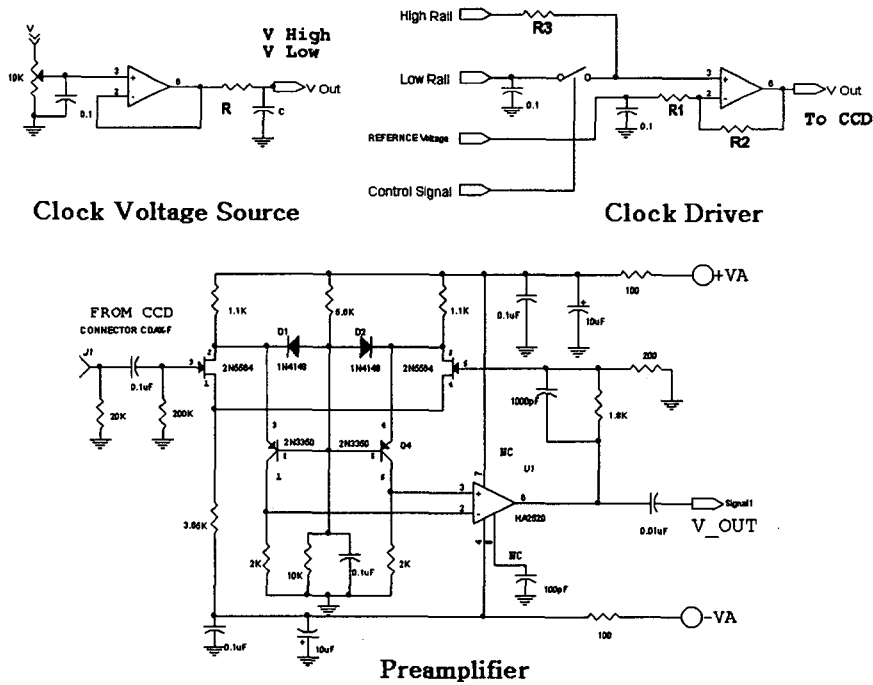


그림 2. 파형출력부의 기본회로 개념과 CCD의 영상신호를 처리하기 위한 초기증폭기 회로

CDS와 신호과정에서 사용되는 op amp는 빠른 설정시간과 높은 이득 주파수대역 폭 그리고 저 잡음을 고려해 AD744를 사용하고 있다(Analog Device 1996). 이러한 부품들의 특성과 가장 안정적인 신호의 배열이 A/D 변환기로부터 진정한 16비트 자료를 얻기 위해 필수적이다. sample/hold에 사용되는 적분시간은 8us이며 0.01 μ F과 800 Ω 으로 구성하였다. 적분기의 적분 캐패시터는 전하누설이 적은 폴리스틸렌(polystyrene)형을 사용하였고 영상처리부의 모든 저항부품은 군사용 부품을 사용하여 온도 변화에 전기적인 신호의 변화가 없도록 노력하였다. ADC로 입력되는 최종단은 버퍼 op amp를 통하게되며, 이것은 sample/hold회로에서 출력되는 신호를 가변전압조정을 통해 차감(offset)을 조정할 수 있게 하기 위함과 ADC에 저 임피던스원을 공급하기 위해 사용하였다. ADC의 신호변환은 각 픽셀주기의 마지막 단에서 이루어지게 되며 그 결과는 다음 화소 샘플링 전까지 유용하다.

ADC는 16비트 출력과 기준전원을 가지고 있는 hybrid IC analog to digital converter로 AD1377을 선택하였다(Analog Device, 1990). Controller에서 처리하는 속도가 1화소당 40 μ s로 사용하기 때문에 16bit의 10 μ s신호변환시간은 부족하지 않다. 최종 디지털 출력은 ADC에서 나오는 직렬전송출력을 통해서 제어기로 전해진다. 아날로그 보드와 비디오보드는 각각 하나의 160 x 100 mm 기판에 구현되었으며 CCD로부터 듀어의 컨넥터를 통과하는 영상신호의 전송선 길이는 25cm이다. 전체 CCD영상장비에 사용되는 전원은 3mV이하의 리플(ripple)특성을 지닌 +24V, +15V, -15V, +5V 4가지로 모두 선형전원공급기를 사용하고 있다.

IV. 작동과 처리시간

제어컴퓨터로부터 EPLD컨트롤러로 전해지는 소프트웨어는 다음과 같은 CCD구동에 필요한 기본적인 내용을 가지고 있다. 1) CCD 영상영역의 pixel수를 지정 2)파형신호의 분해능 3) 파형신호 자료 4) mpp or non-mpp 구동 모드 5) serial flush 와 parallel flush. 이러한 기능들의 조합으로 기본적인 CCD 영상소자를 구동할 수 있도록 되어 있다. PC에서 초기화과정은 자료 전달을 ISA방식을 사용하고 있기 때문에 8비트씩 2번에 걸쳐 16비트의 데이터 조합으로 전송한다. 파형신호자료는 제어기의 메모리에 저장되며 나머지 신호들은 제어기내부에 기록된다.

초기화에서는 한번의 신호전달만 하면 되므로 빠른 속도의 신호전달이 필요하지 않다. 프로그램에서 전달되는 인자들이 CCD를 구동하는 핵심요소들로 원리적으로는 이 인자들의 수치만 바꾸면 어떠한 CCD도 구동할 수 있다. CCD구동에 필요한 구동파형은 2절에서 설명한 바와 같이 그림 1에서, 1000까지의 신호는 수평전송에 필요한 파동의 모습이며 1000에서 1100까지는 수직전송과 신호처리부에서 사용되는 모습이다. 1000과 1100등의 수치는 파형을 세분화시켜 운용함으로써 파형의 조절을 얼마나 세밀하게 조종할 수 있는지를 나타낸다. 현재 1은 400ns를 사용하기 때문에 1000이라는 수치의 한번의 수평 전송은 400 μ s가 소요된다. 화소처리 속도 면에서도 40 μ s당 하나의 화소를 변환하고 있으며 이 처리 시간 내에서 자료전송과 저장이 모두 끝난다. 현재 1024 x 1024 CCD의 경우 full frame으로 읽어 내기 때문에 읽기시간은 43초가 소요된다. 2 x 2 비닝(binning)의 경우는 21초가 소요되며 사용자가 지정하는 임의의 부분영상의 경우는 화소수에 따라 읽어내는 시간은 달라지지만 50x50의 영상은 약 3초 이하가 소요된다.

V. 시스템 성능 시험

시스템의 성능시험에는 평균변이실험(mean variance)을 이용하여 시스템의 직진성(linearity), 시스템이득(system gain) 그리고 전체 시스템의 잡음도를 조사하였다. 이러한 성능시험방법은 오래 전부터 연구되어 활용되고 있으며(Janesick 1987, Leach 1980, Maclean 1997) 극히 미약한 신호를 처리하는 저잡음 영상시스템에서 일반적으로 사용되고 있는 방법이다. CCD의 전체 표면 검사와 CTE (Charge Transfer Efficiency), QE (Quantum Efficiency)를 측정하기 위해서는 적분구(Integrating Sphere)와 Monochrometer등을 이용하여 검사를 하지만 이러한 검사는 이미 CCD 제작회사에서 수행이 된 것을 사용하고 따로 실험실에서 수행하진 않았다. 실험실에서 수행된 성능실험은 표면장착형 녹색 LED를 사용하여 일정시간별 노출을 주고 반사막을 이용한 간접 주사 방식을 사용하였고 실험장치의 개념도는 그림 3과 같다. 각각의 일정 노출시간을 통하여 2개씩 얻어진 영상을 가지고 처리한 평균변이실험 과정은 다음과 같다.

- 1) overscan을 포함한 영상을 각각의 같은 노출시간에서 2장씩을 얻는다.
- 2) 전체화면 중 사용자 지정의 검사영역을 설정하고 지정된 영상영역(A영상)과 그것과 같은 줄에 해당하는 overscan 영역(AO영상)을 각각 추출한다. 우리의 실험에서는 영상영역 중앙부분과 그 줄에 해당하는 overscan 영역 내에 50x50 크기의 영상을 택하였다. 같은 노출(t sec)의 첫 번째 영상에서 2)와 같은 과정으로 얻은 것을 A_1 , AO_1 라고 2번째 얻은 영상에서 추출된 영상들을 A_2 , AO_2 라고 하자.

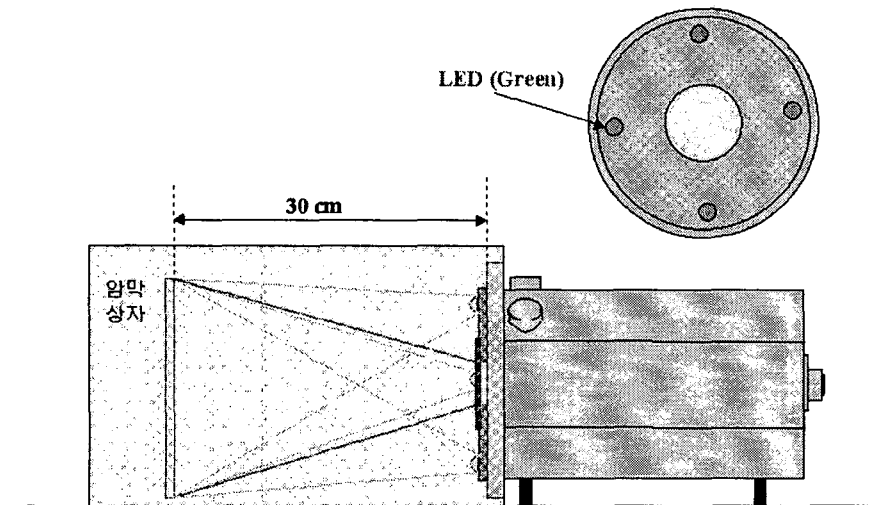


그림 3. 실험실에서 수행된 평균변이실험의 실험장치 개념도

Image 1 (t sec) : $A_1 = \text{image}(x_1, y_1, x_2, y_2)$ $AO_1 = \text{image}(x_3, y_1, x_4, y_2)$

Image 2 (t sec) : $A_2 = \text{image}(x_1, y_1, x_2, y_2)$ $AO_2 = \text{image}(x_3, y_1, x_4, y_2)$

3) 여기서 각 영상영역에서 overscan 값을 뺀다. 이 과정은 순수한 빛의 양만을 측정하기 위한 과정이다. CCD의 냉각온도가 약 133K 였고 최대 노출시간이 20초 이하였기 때문에 Dark 영향을 고려하지 않았다.

$$R_1 = A_1 - AO_1, \quad R_2 = A_2 - AO_2$$

4) 2장의 영상에서 차이를 구한다.

$$R_{diff} = R_1 - R_2,$$

$$R_R = R_{diff} / 2$$

5) 처리된 영상(R_{diff})을 2로 나누고(R_R) 표준편차와 변이(Variance)를 구한다.

6) 이 변이와 R_1 과 R_2 의 평균값을 가지고 시스템의 성능을 평가했다.

실험중 하나의 예로서 각각의 노출 시간별의 영상에서 이와 같이 계산된 자료를 그림 4, 그림 5, 표 1에 보였다. 그림 4에서 나타나는 기울기가 전체시스템의 이득 값이다. 구해낸 이득 값과 overscan 표준편차의 곱이 전체 시스템 잡음이 되는데 이것은 그림에서 y축 절편의 값과 큰 차이를 보이지 않아야 한다. 만일 이 차이가 크게 나타나면, 이는 시스템이 불안정하거나 실험방법이나 절차에 오류를 의미한다. 실제로 이 값은 평균변이 실험의 신뢰도 및 시스템의 안정도를 나타내는 지표라고 할 수 있다. 이러한 실험으로 얻어진 결과로는 overscan 영역에서의 표준편차평균은 5.5ADU이며 gain은 1.927e-/ADU로서 전체 시스템 잡음은 약 10.539 e-(R.M.S)로 나타났다.

선형성에 대해서는 노출시간과 평균값으로 그려진 그림 5이며 시스템의 선형성이 잘 나타난다. 노출시간은 7초 정도의 노출에서 포화수준에 도달할 수 있을 만큼 LED의 밝기를 조절하여 1초씩 7번의 노출을 주었고 평균값은 얻어진 영상에서 바이어스 영상을 빼준 영상으로부터 구

표 1. 평균변이 실험의 처리 자료

변이 (variance)	평균값 (mean)	overscan영역 (1)	표준편차 (2)
2277.23657	4293.15723	8.52611	6.84154
4185.30615	7924.66602	5.06059	4.61693
6711.85693	11627.86523	4.30156	5.59634
8637.47070	15213.96289	5.37372	5.56076
9935.18945	18861.92773	4.42563	3.71304
11826.77830	22757.98242	4.44597	3.81868
14677.63770	26527.57813	3.77989	3.74113
15503.79490	30471.71289	4.61417	5.43674
18288.12500	34352.65234	7.53739	7.45756
19631.24023	38100.98828	7.54263	6.83450

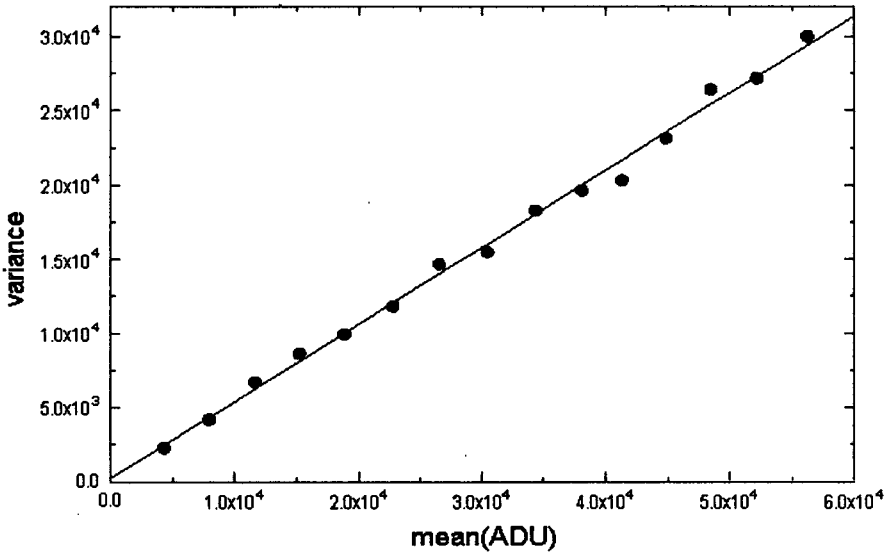


그림 4. 평균변이 실험의 최종 자료로 얻어진 그림으로 가로축은 평균값이며 세로축은 변이값이다.

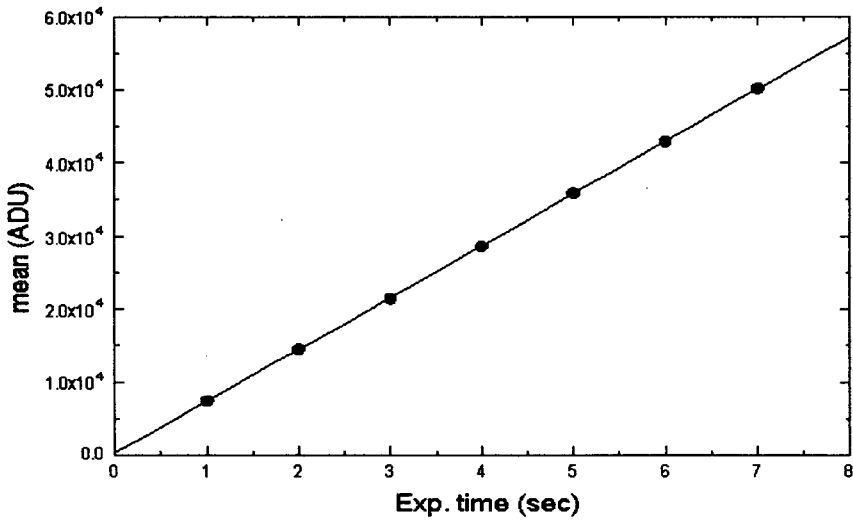


그림 5. 시스템의 직진성 그림으로 7번의 노출을 통해 얻은 자료에서 가로축은 노출시간이며 세로축은 영상 중앙 50 x 50의 같은 지역의 평균값을 구하였다.

한 평균값이다. 일반적으로는 비선형성에 대한 수치를 나타내는데 이는 아래 식 1과 같으며 비선형성은 0.37%로 나타났다.

$$\text{비선형성(\%)} = (\text{양수 최대변이} + \text{음수 최대변이}) / \text{측정 최대값} \times 100 \quad (1)$$

여기서 양수 최대변이는 선형회기곡선으로부터 차이값 중 가장 큰 양의 값이며 가장 큰 음의 값이 음수 최대 변이 이다. 측정최대값은 측정된 자료중 가장 큰 값을 의미한다.

VI. 결론 및 향후 연구 방향

본 연구에서 개발되어진 천문관측 목적 CCD영상장비의 전반적인 구성과 시스템의 성능측정에 대하여 서술하였다. 현재의 시스템은 주로 영상관측용으로 활용될 수 있도록 설계가 되어 1K(1024 x 1024)의 CCD경우 하나의 영상을 얻는데 약43초의 시간이 소요되며 전체 시스템잡음은 실험환경과 부품선정에 따라 $10 \sim 15e^-(\text{R.M.S.})$ 사이 이다. 같은 전자부를 가지고 512 x 512 CCD(SITe)에 활용하여 시험관측을 이미 성공하였고 그때의 시스템 잡음은 $16e^-(\text{R.M.S.})$ 이하를 나타낸 바 있다. 이 외에도 EEV사의 CCD로 사용해 본 경험이 있기 때문에 전자부의 기능면에서는 안정성이 입증되었다고 할 수 있다.

냉각용 듀어는 1.6리터의 액체질소 저장크기를 가지고 있으며 한번 채우고 24시간 이상 온도를 유지하고 있음을 확인하였고 진공도는 10^{-5}torr 이하를 유지하였다. 듀어내의 진공도를 계속 일정하게 유지하기 위해서는 최소한 2주에 한번씩은 진공상태를 점검해야 한다.

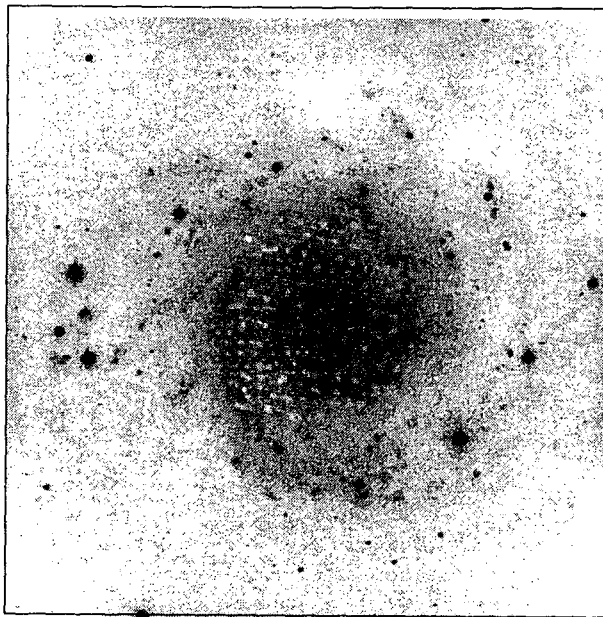


그림 6. 소백산천문대에서 1K CCD를 이용하여 얻은 M74의 영상

처음에는 전자부를 와이어 랩핑 보드(wire wrapping board)로 실험을 하고 현재는 PCB (printed circuit board)로 되어 있다. CCD영상장비의 성능검증을 하면서 현재의 저잡음 수준으로 되기까지는 많은 실험이 수행되었다. 특히 부품들의 특성과 잡음에 의한 영향이 많았고 외부로부터의 전자기파의 영향도 나타났으며 CCD의 출력 신호의 전송거리도 매우 민감하게 변화를 보였다. 이러한 것들에 대한 영향은 대부분 제거된 상태이기 때문에 현재는 안정적인 상태를 보이고 있다. 앞으로는 CCD출력단의 신호를 듀어내부에서 증폭시켜 신호전송의 길이를 늘리는 방법도 실험 할 예정이다.

시험관측은 소백산천문대에서 여러 차례 수행되었고 그림 6은 소백산천문대 24인치 반사망원경에 장착되어 관측했던 M74의 영상이다. 시험관측 중 망원경과 시스템이 전기적으로 절연이 되지 않을 경우 영상에 특이한 패턴이 발생됨을 알 수 있었다. 이는 두 시스템을 절연시킴으로 문제를 해결하였다. 그러나 시험관측에서 성공적으로 얻은 영상의 경우 전문적인 분석을 위한 관측이 아니었기 때문에 앞으로는 제작된 CCD영상장비를 이용하여 체계적인 관측으로 시스템의 특성을 계속 확인할 예정이다. 그러나 실험의 결과와 시험영상관측의 결과를 보면 관측용으로 사용하는 데는 문제가 없다고 생각된다.

시스템의 성능개선과 다양화를 위해 보다 빨리 읽어낼 수 있는 방법과 열전냉각방식을 이용한 CCD영상장비 개발 연구도 계속 이어질 것이다. 앞으로는 CCD영상장비에 대한 발생될 수 있는 문제에 대해서는 자체 수리가 가능할 뿐만 아니라 보다 다양한 관측목적에 부합된 CCD영상장비를 개발하여 보다 효율적인 관측을 수행하는데 큰 도움이 될 것이며 관측을 통해 개발된 시스템의 안정성과 기능이 계속 향상될 것으로 생각한다.

참고 문헌

- 진호, 한원용, 1997, "EPLD를 이용한 CCD Controller 설계", 천문대 기술보고서
- 진호, 한원용, 남옥원, 이서구, 이우백, 1997, 한국우주과학회지, 14, 259
- 한원용, 성언창, 박남규, 박장현, 박승철, 진호, 주영대, 전충남, 김대중, 김재수, 송두중, 경재만, 문홍규, 남옥원, 1996, "소백산천문대 천체관측 연구 및 운영", 천문대 연구보고서
- Analog Devices. 1990, Design-In Reference Manual
- Analog Devices. 1996, Linear Data Book.
- Boyle, W. S. & Smith, G. E. 1970, The Bell System Technical Journal, Vol. 49, No. 4, 587-593
- Burley, G. S., Walker, G. A. H. & Johnson, R. 1998, Pub.A.S.P., 110, 330
- Han, W., Clayton, M. & Walker, D. D. 1994, SPIE, 2198, 1158
- Han, W., Clayton, M. & Walker, D. D. 1996, Pub.A.S.P., 108, 1028
- Holst, E. P. 1966, "CCD Arrays, cameras, and displays", (JCD Publishing.:FL)
- Janesick, J. R. & Blouke, M. M. 1987, Sky and Telescope 74, 238
- Janasick, J. R., Klaasen, K. P. & Tom Elliot. 1987, Optical Engineering, Vol. 26, No. 10, 927
- Janesick, J., Elliot, T., Bredthauer, R., Chandler, C. & Bruke, B. 1988, SPIE, 982, 70

- Kodak. 1995, "Solid State Image Sensor", Eastman Kodak Company
- Leach, R. W. 1988, Pub.A.S.P., 100, 1287
- Leach, R. W. 1997, "SDSU CCD manual"
- Leach, R. W., Schild R. E. & Gursky, H. 1980, Pub.A.S.P., 92, 233
- Mackay, C.D. 1986, Ann. Rev. Astron. Astrophys. 24, 255
- McLean I. S. 1997, "Electronic Imaging in Astronomy", (John wiley & sons Ltd. : England)
- Reiss, R., Bauer, H., Deiries, S., D'Odorico, S. & Longinotti, A. 1989, SPIE, 1130, 152
- Reiss, R. 1994, SPIE, 2198, 895
- SITe. 1996, "An Introduction to Scientific Imaging Charged-Coupled Devices"