

열전냉각방식의 범용 CCD 카메라 시스템 개발 I. 하드웨어

강용우^{1,3†}, 변용익^{2,3}, 이종환², 오세현², 김도균²

¹한국천문연구원

²연세대학교 천문우주학과

³연세대학교 천문대

DESIGN AND DEVELOPMENT OF MULTI-PURPOSE CCD CAMERA SYSTEM WITH THERMOELECTRIC COOLING I. HARDWARE

Y.-W. Kang^{1,3†}, Y. I. Byun^{2,3}, J. H. Rhee², S. H. Oh², and D. K. Kim²

¹Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 305-348, Korea

²Department of Astronomy, Yonsei University, Seoul 120-749, 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 독자개발의 시도로 KODAK사의 KAF-0401E(768 × 512), KAF-1602E(1536 × 1024), KAF-3200E(2184 × 1472) 등 세 종류의 CCD를 바꾸어 가며 장착할 수 있는 범용 CCD 카메라 시스템을 개발 하였다. 기본적인 자료 입출력과 제어는 병렬 포트뿐만 아니라 입출력 속도가 상대적으로 빠른 USB 포트로도 가능하도록 만들었다. ±18V를 전원공급기로부터 공급받아 ±15V와 +5V로 정류시켜서 시스템의 전원으로 사용하고 열전냉각소자 및 서터는 +12V와 +5V로 동작되도록 하였다. 개발된 CCD 카메라는 전자회로기관을 2단으로 구성해서 공간 효율을 높였고, 전자회로의 구성은 컴퓨터에서 만들어진 클락 신호를 입력받아 CCD 동작을 위한 신호패턴을 만들어 주는 부분, CCD로부터 받은 신호를 증폭해서 디지털 신호로 바꿔주는 부분, 이 신호를 4비트씩 나누어서 병렬 포트에 전달하는 CCD 제어 부분과, 온도 센서의 신호를 디지털 신호로 바꾸어서 컴퓨터로 전달하는 온도제어 부분으로 이루어져 있다. 최대 냉각능력은 상온대비 Δ33°C이고, 이 온도 범위에서 약 0.4°C의 정밀도로 제어 할 수 있다. 제작된 CCD 카메라 시스템의 읽기잡음은 6e⁻ 이고, 이득은 5e⁻/ADU 이다. 모두 10대의 카메라가 만들어졌으며, CCD 카메라들은 작동시험에서 모두 만족한 결과를 얻었다.

ABSTRACT

We designed and developed a multi-purpose CCD camera system for three kinds of CCDs; KAF-0401E(768×512), KAF-1602E(1536×1024), KAF-3200E(2184×1472) made by KODAK Co.. The system supports fast USB port as well as parallel port for data I/O and control signal. The packing is based on two stage circuit boards for size reduction and contains built-in filter wheel. Basic hardware components include clock pattern circuit, A/D conversion circuit, CCD data flow control circuit, and CCD temperature control unit. The CCD temperature can be controlled with accuracy of approximately 0.4°C in the max. range of temperature, Δ33°C. This CCD camera

†corresponding author

system has with readout noise $6 e^-$, and system gain $5 e^-/ADU$. A total of 10 CCD camera systems were produced and our tests show that all of them show passable performance.

Keywords: CCD, CCD camera, multi-purpose

1. 서 론

현대 천문관측에서는 CCD 카메라의 비중이 상당히 크다. 전문적인 천문학자부터 아마추어 천문가들까지 널리 수요가 증가하고 있다. 이러한 수요 증가에 의하여 CCD 카메라가 자체 개발되거나 전문 업체에서 제작되고 있다. 국내에서도 CCD 카메라 개발 연구가 시도되어 왔으며, 이는 국내 개발 역량을 높이는 데 많은 기여를 하고 있다. 그 예로 한국천문연구원의 1K 카메라 개발(진호 외 1997)과 적외선카메라 개발(차상목 외 2006)을 들 수 있다. 소형 CCD 카메라의 개발도 시도되었는데, 천체의 광역 관측을 위한 CCD 카메라 개발(유영삼 외 2001)이 그것이다. 그러나, 시제기에서 그치고 실용화되지는 않았다.

원격지에 떨어져 있는 여러 관측소에 망원경들을 설치하는 전천 탐사를 위한 밤하늘 모니터용으로 많은 수의 소형·범용의 CCD 카메라가 필요하다. 그러나, 소형·범용으로 사용되고 있는 CCD 카메라들은 그 수요가 꾸준히 늘어남에도 불구하고 아직까지는 고가이다. 또한, 자체적으로 수리와 정비하기도 어렵다. 더욱이 전용 소프트웨어는 의존성이 높다. 이에 동급으로 좀더 나은 성능을 가지면서 다루기 쉽고, 수리와 정비가 자유로우며 상당히 저렴하게 CCD 카메라 시스템을 구성할 수 있다면, 경쟁력 있으리라 판단되어 개발을 시도하게 되었다. 또한 이런 장비를 직접 개발해 봄으로써 이 분야에 대한 개발 경험을 쌓아서 외국에 의존하던 것을 자체 기술로 대체하는 것은 물론이고 아울러 좀 더 높은 기술을 필요로 하는 대형 CCD 관측장비 개발도 시도할 수 있을 것이다.

이 연구에서 개발한 CCD 카메라 시스템의 회로기판은 KODAK사의 KAF-0401E(768×512), KAF-1602E(1536×1024), KAF-3200E(2184×1472) 등 세 종류의 CCD를 모두 사용할 수 있게 되어 있다. 즉, KAF-0401E를 장착했던 시스템에 KAF-1602E나 KAF-3200E로 바꾸고 간단히 점퍼만 설정해주면 된다. 그리고 열전냉각(thermoelectric cooling)소자를 이용한 온도 제어가 가능하도록 설계되었다. 온도 센서를 통해서 CCD의 온도를 실시간으로 모니터링하면서 CCD가 최적의 성능을 발휘할 수 있는 적정 온도를 유지하도록 열전냉각소자를 제어한다. 구동 소프트웨어는 윈도우와 리눅스 O/S에서 모두 사용이 가능하다.

이 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 개발 과정을 다루고, 3장에서는 채택한 CCD의 특징에 대하여 기술하고, 4장에서는 시스템 구성, 5장에서는 성능 시험과 그 결과를, 마지막 6장은 이 논문의 결론이다.

2. 설계 및 개발 과정

우선 개발하고자 하는 소형·범용 CCD카메라의 기초 모델로 GENESIS사의 샘플 보드를 택하였다. 그림 1은 샘플 보드 키트를 조립하여 제작한 사진이다. 80×80mm의 크기로 우리의 시스템에서 사용하는 CCD와 같은 KODAK사의 KAF-0401, KAF-1602 CCD를 사용할 수 있도록 되어 있다.

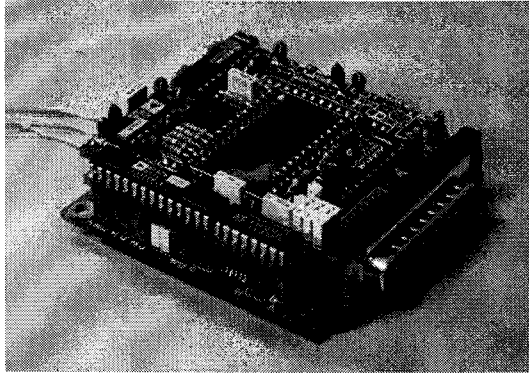


그림 1. 조립 제작된 샘플보드 키트.

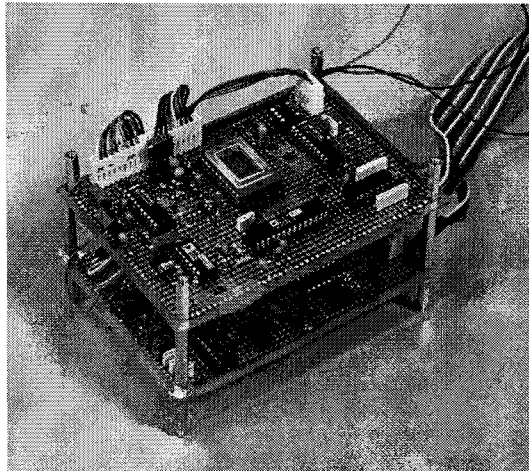


그림 2. 시험 제작된 CCD 카메라 시스템.

IBM 호환 PC와 병렬포트로 연결해서 동작되며 $\pm 15V$ 의 전원, 소비전력 0.9W, 읽기잡음(Readout noise)이 15electron 정도이다(<http://www.genesis16.net>; Genesis 2002, <http://www.astrosurf.com>; Audine 2002). 샘플보드의 조립제작을 통하여, 우리가 제작하고자 하는 CCD 카메라 시스템에 대한 실용적인 작동 원리 등을 획득하였다.

다음으로 우리는 직접 만능기관에 시험용 시스템을 제작하였다. 그림 2는 제작된 시험용 시스템이다. 우선 CCD는 KODAK사의 KAF-0401E와 KAF-1602E를 사용하였으며 CCD를 제외한 모든 부품들은 국내에서 구입하기 쉬운 부품들로 선정하여 대체하였다.

완성된 전체 시스템의 소비전력은 목표로 하는 고성능 소형·범용 CCD카메라의 소비전력에 비해 2.7W로 다소 높았다. 이는 국내에서 구입 가능한 부품으로 대체함에 따른 성능 변화로 최적화 과정이 필요하였다. 또한 몇가지 문제점들도 발견할 수 있었다. 우선은 시스템에 사용되는 전원이 불안

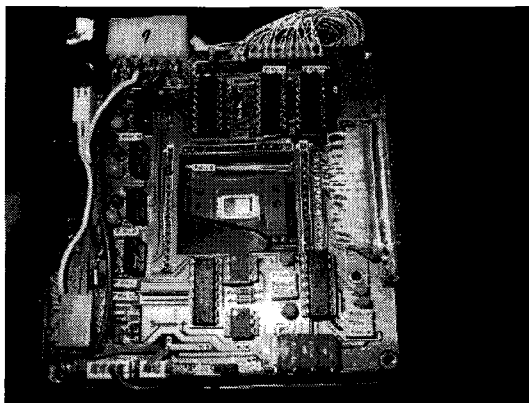


그림 3. PCB보드로 제작된 CCD 카메라 시스템.

정하다는 것이고, 다른 하나는 CCD 소자를 구동하는데 사용되는 여러 전압들이 일정하지가 않아서 CCD 작동에 문제가 생길 수 있다는 점이었다. 그리고 KAF-0401E와 KAF-1602E는 구동 클락 형태와 전압이 같은데 반해, KAF-3200E는 구동 클락 형태와 전압이 다르기 때문에, KAF-3200E까지 작동할 수 있는 범용 시스템을 구현하기 위해서는 개선이 필요하였다.

이런 점들을 개선하기 위해 아래와 같은 새로운 방안을 모색하여 새로운 회로기판을 제작했다. 이 시스템을 살펴보면 우선 약 1 ~ 3V 정도 변동폭을 가지는 다소 불균질한 전압이 공급돼도 시스템에서 원하는 안정된 전압을 공급할 수 있도록 노이즈 필터와 정전압 회로를 사용하였으며, CCD 구동에 필요한 전원들에 요구되는 전압을 일정하게 유지할 수 있도록 개선하였다. 또한 세가지 CCD가 동일한 회로기판에서 모두 동작할 수 있도록 하기 위하여 각각의 CCD에 따른 구동 클락 형태에 맞추어 점프선 연결로 설정할 수 있도록 하였다. 그 결과 소비전력도 앞의 시험보드보다 현저히 적은 1.8W 정도를 나타냈다. 새로 제작한 이 회로는 우리가 실제로 구현하고자 하는 시스템에 가장 가까운 모델이었기 때문에 이것을 기반으로 최종 PCB 회로를 제작하였다. 그리고 이 단계에서 온도 제어 회로 부분의 설계가 이루어졌다. 그림 3에 PCB보드로 제작된 CCD 카메라 시스템 최종 모델을 보였다.

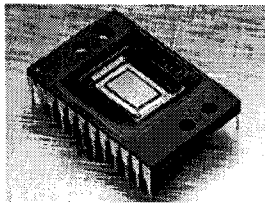
PCB 기판을 제작해서 만든 최종 시스템은 다음과 같은 특징이 있다. 접지(ground) 배선을 아날로그와 digital로 분리해서 회로 자체의 백색 잡음(white noise)을 최소화하였고, 세종류의 CCD를 사용할 수 있으며, 온도 제어 회로가 구현되어 있어 원하는 온도로 CCD를 냉각시킬 수 있다. 데이터 전송에서는 병렬 포트를 사용하는데, 전송 효율을 높이기 위하여 USB 포트도 사용할 수 있도록 설계하였다. 전원은 $\pm 15V$ 와 $+12V$, 그리고 $+5V$ 를 사용한다. 소비전력은 0.72W 정도로 상당히 줄어들어서 시스템의 부하를 낮추었다.

3. CCD

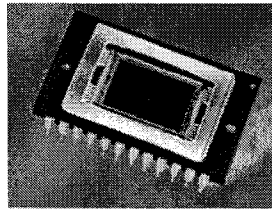
이번에 개발한 CCD 카메라 시스템에서 사용할 수 있는 CCD들은 총 세가지로 KODAK사의 KAF-0401E, KAF-1602E, KAF-3200E이다. 그림 4는 이 연구에서 채택한 CCD들의 모습이다. 우

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

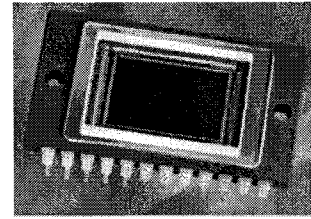
	KAF-0401E	KAF-1602E	KAF-3200E
Dimension	768×512	1536×1024	2184×1472
Pixel area	393K	1.6M	3.2M
Photosensitive area	6.9 × 4.6mm	13.8 × 9.2mm	14.85 × 10.26mm
Output sensitivity	10 μ V/e ⁻	10 μ V/e ⁻	20 μ V/e ⁻
Dark current	< 10pA/cm ² @25°C	< 10pA/cm ² @25°C	< 7pA/cm ² @25°C
Quantum efficiency (450, 550, 650nm)	40%, 52%, 65%	40%, 52%, 65%	40%, 52%, 65%



(a) KAF-0401E



(b) KAF-1602E



(c) KAF-3200E

그림 4. 이 연구에서 사용한 CCD들.

선 KODAK사의 제품을 사용하게 된 이유는 성능면에서 다른 회사의 제품에 비해 가격 대 성능비가 우수하다고 판단하였기 때문이다. KAF-0401E, KAF-1602E, KAF-3200E는 모두 2상 구동방식(two-phase technology)으로 제작되어 구동 시스템의 구조를 간단하게 할 수 있으며, 또한 암전류(dark current)가 낮은 장점이 있다. 여기에 청색 파장대 강화(Blue Plus)라는 기술을 사용해서 짧은 파장대뿐만 아니라 전체적인 가시영역의 양자효율을 높인 제품들이다. 이전 제품들에 비해 400nm에서는 양자효율이 2%에서 30%로, 양자효율의 최대값을 보이는 575-675nm에서는 양자효율이 40%에서 63%로 높아졌다. 우리가 사용한 CCD들의 주요 사양을 표 1에 나타내었다.

4. 시스템 구성

시스템을 구성하는 요소는 크게 네부분으로 나눌 수 있는데, 첫째가 CCD 구동부로서 CCD 클락 생성(CCD clock shaping), 신호증폭(amplification), A/D 변환(A/D conversion)으로 구성되어 있다. 둘째가 영상 전송부로서 컴퓨터에서 시스템으로 동작 신호를 보내는 것과 CCD 카메라에서 얻은 영상 신호를 컴퓨터로 전송하는 역할을 주로 한다. 신호전송은 두 가지 방식을 사용할 수 있는데, 하나는 병렬포트를 이용하는 것이고 다른 하나는 USB 포트를 이용하는 것이다. 셋째는 시스템의 동작을 위한 전원을 공급해 주는 전원공급(power supply) 부분이다. 전용으로 제작된 전원공급장치는 출력 전압이 각각 $\pm 15V$, $+12V$, 그리고 $+5V$ 이다. 이는 CCD 구동에 필요한 여러 전압들을 안정적으로 공급해 주는 역할을 한다. 넷째로 온도 제어 및 셔터 구동부분이다. 온도 제어를 위한 센서와 솔레노이드를 이용한 셔터로 구성되어 있다. 전체 시스템의 구성도를 그림 5에 보였다. 시스템을 구성하고 있는 요소들은 다음과 같다.

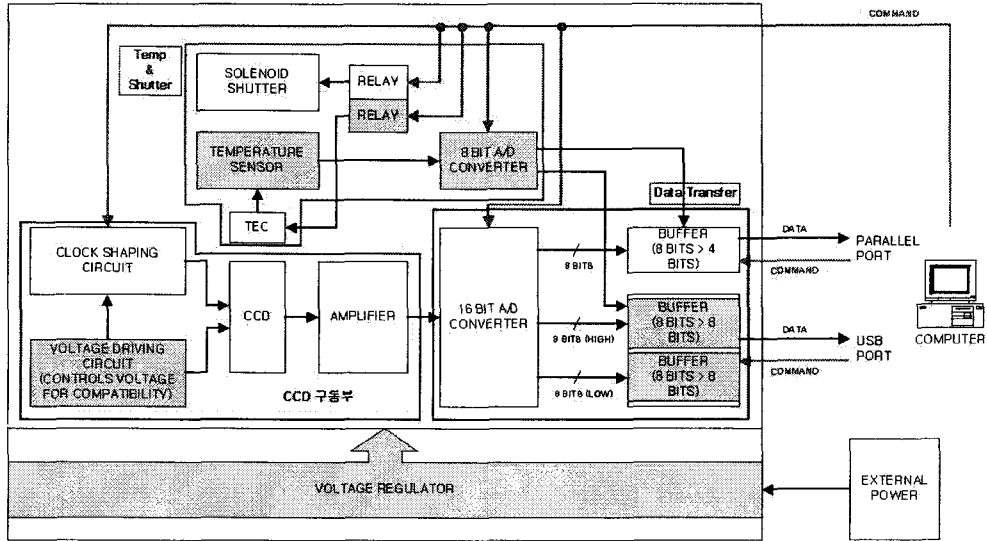


그림 5. 개발된 CCD 카메라 전체 시스템 구성도.

표 2. CCD 전하 전송을 위한 클럭 신호들의 전압값(Full frame CCD Image Sensor Performance Specification, KODAK 2002).

Description	Symbol	Level	KAF-0401E Norm.	KAF-1602E Norm.	KAF-3200E Norm.	Units
Vertical CCD Clock - Phase 1	ΦV1	Low	-10.0	-10.0	-8.5	V
		High	0.5	0.5	2.0	V
Vertical CCD Clock - Phase 2	ΦV2	Low	-10.0	-10.0	-8.5	V
		High	0.5	0.5	2.0	V
Horizontal CCD Clock - Phase 1	ΦH1	Low	-4.0	-4.0	-3.0	V
		High	6.0	6.0	7.0	V
Horizontal CCD Clock - Phase 2	ΦH2	Low	-4.0	-4.0	-3.0	V
		High	6.0	6.0	7.0	V
RESET Clock	ΦR	Low	-2.0	-2.0	4.0	V
		High	4.0	4.0	11.0	V

4.1 CCD 구동부

CCD 구동부는 CCD에서 영상을 얻을 수 있도록 하는 클럭을 만들어 주는 CCD 클럭 생성 부분과 CCD에 인가되는 전압들을 안정적으로 공급해 주는 부분, CCD에서 나오는 영상 신호(video signal)를 증폭해 주는 부분으로 구성되어 있다.

4.1.1 CCD 클럭 생성 회로(Clock shaping circuit)

CCD로부터 영상 정보를 읽는 과정을 보면 CCD 각 화소에 저장된 전하들이 우선 수직 전하전송 클럭(vertical clock) V1과 V2가 전달되면 수평 레지스터로 이동하게 된다. 이렇게 되면 KAF-0401E의 경우 768개의 전하량을 수평레지스터가 전달받게 된다. 수평 레지스터는 수평 전하전송 클

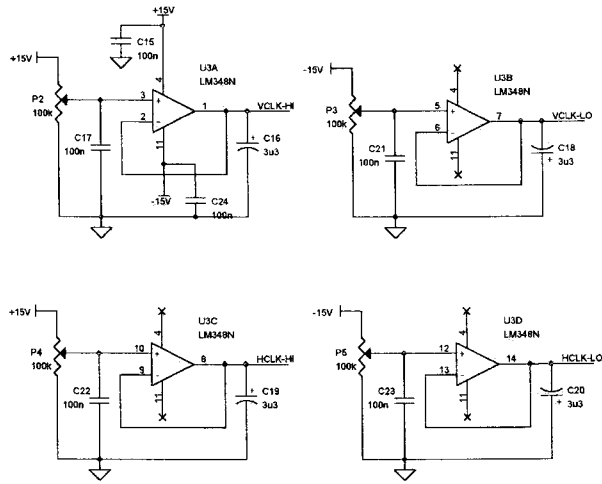


그림 6. CCD 전하 전송을 위한 클락의 전압 발생 회로도.

표 3. CCD 구동을 위하여 CCD에 인가되는 전압값들(Full frame CCD Image Sensor Performance Specification, KODAK 2002).

Description	Symbol	Pin	KAF-0401E Norm.	KAF-1602E Norm.	KAF-3200E Norm.	Units
Reset Drain	VRD	4	11	11	12	V
Output Amplifier Return	VSS	6	2.0	2.0	3.0	V
Output Amplifier Supply	VDD	3	15	15	15	V
Substrate	VSUB	11, 14	0	0	0	V
Output Gate	VOG	1	4	4	5	V
Guard Ring	Guard	23	9.0	9.0	10	V
Video Output Current	Iout		-5	-5	-5	mA

락(horizontal clock)인 H1, H2가 전달되면 수평 레지스터의 전하량이 하나씩 출력단으로 전달되고, 이것들이 전압으로 바뀌어 출력단을 떠나게 된다. 한편, 컴퓨터에서 CCD 구동을 위하여 만들어지는 클락은 고전압준위(high level)의 경우 +5V이고, 저전압준위(low level)는 0V이기 때문에, 표 2에서 보듯이 CCD에서 요구하는 전압과 차이가 있다. 따라서 CCD의 전하 전송을 위한 클락을 만들어 주기 위한 회로가 필요하게 된다. 이를 위해서 4개의 독립적인 OP Amp를 가지고 있는 LM348(LM348 Data sheet, Texas Instruments 2002)와 가변 저항을 사용하여 세가지 종류의 CCD 모두에서의 전하 전송을 위한 클락의 전압을 만들 수 있도록 하였다. 이를 CCD 구동을 위한 클락 형태로 만들기 위해서 아날로그 스위치 IC를 사용하여 컴퓨터의 클락에 따라 클락 파형을 만들도록 하였다. 그림 6은 CCD 클락 생성 회로이다.

아날로그 스위치는 LM348에서 얻어진 CCD 구동을 위한 각 클락의 고전압준위와 저전압준위 전압들을 컴퓨터에서 나오는 TTL 신호의 변위값에 따라 출력하게 해준다. 예를 들면 KAF-0401E의

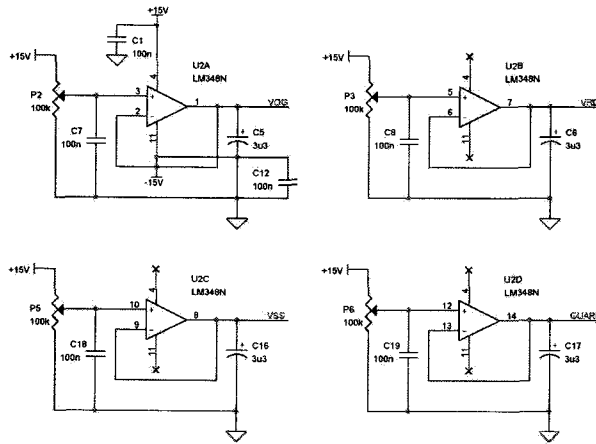


그림 7. CCD 구동을 위하여 CCD에 인가되는 전압들을 발생하는 회로도.

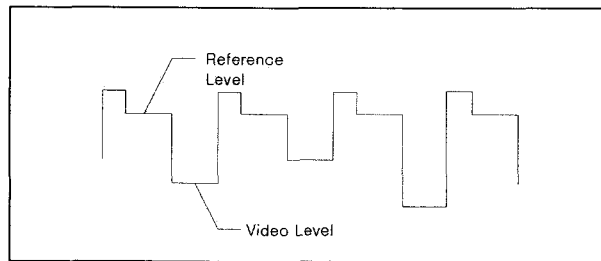


그림 8. CCD 영상 신호 출력 파형 모습.

V1 클럭에 대해서 보면, V1 클럭은 high일때 0.5V이고 low일때 -10V이다. 0.5V와 -10V를 LM348에서 만들어서 아날로그 스위치 IC의 각 선택 핀에 연결해 놓고 제어 신호용 핀으로 컴퓨터에서 만들어지는 클럭을 연결하면, 컴퓨터의 클럭이 high 즉, 5V일 경우는 스위치가 해당 핀과 연결되어 0.5V가 출력단으로 나가고 다시 제어 신호용 핀에 low 즉, 0V가 들어올 경우 스위치가 다른 핀으로 연결되어 출력단에 -10V가 출력되게 된다. 결국 클럭의 크기를 조절해 주는, 즉 고전압준위 값과 저전압준위 값을 바꿔주는 효과를 얻게 됨으로써 CCD에서 원하는 클럭을 보낼 수 있게 되는 것이다.

4.1.2 CCD 구동 회로(Driving voltage circuit)

CCD는 각 화소에서 얻은 전하의 전송에 필요한 클럭 뿐만 아니라 몇몇 DC 전압을 인가 받아야 정상적인 작동을 할 수 있도록 되어 있다. 이러한 전압은 CCD에 직접 인가되는 것이므로 절대 허용치를 넘지 않아야 한다. CCD는 이런 부분에 상당히 민감하게 반응하기 때문에 허용치를 넘어서는 전압이 공급되면 CCD가 손상되는 경우가 발생한다. 때문에 안정적인 전압을 공급하고, 또한 세 종류의 CCD들에서 요구하는 전압이 각각 다르다는 것도 고려해야 한다. 이를 위하여 가변 저항과 앞에서 언급한 LM348을 이용해서 항상 일정한 전압과 가변저항의 조절만으로 원하는 전압을 얻을 수

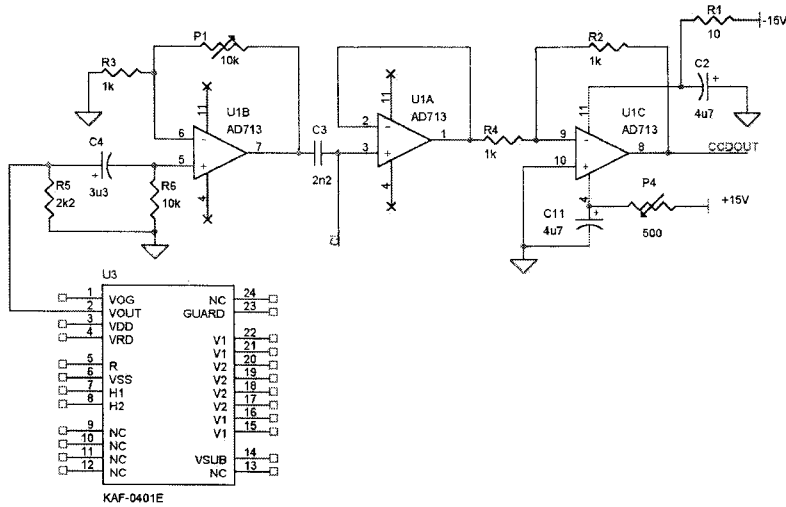


그림 9. 영상 신호 증폭 회로도.

있도록 회로를 설계 하였다. 표 3과 그림 7에 각각의 전압들과 회로도를 나타내었다.

4.1.3 신호 증폭(Amplification)

CCD의 출력단에서 나온 영상 신호는 다음 그림 8과 같은 형태의 신호가 된다. 여기서 기준 준위(reference level)의 전압과 영상신호 준위(video level)의 전압 차이가 바로 CCD를 통해서 얻은 정보 중에서 우리가 필요로 하는 영상 신호값이 된다. 이런 전압 차이는 실제로 상당히 작은 값이기 때문에, 이 값을 A/D 변환하여 디지털 영상 정보 신호로 바꾸기 위해서는 증폭을 시켜야 한다. 또한 영상의 실제 정보를 얻기 위하여 두 준위 사이의 전압 차이만을 추출해 내는 기능이 필요하다. 이를 위해서 신호 증폭용 OP-Amp(AD713; AD713 Data sheet, Analog Device 2002)와 저항, 콘덴서 등을 이용해서 증폭, 반전 및 클램핑(clamping) 기능을 하는 회로를 구성했다. 개발된 CCD 카메라의 영상 신호증폭 이득(video signal amp. gain)은 5.0으로 고정되어 있다. 그림 9는 이 연구에서 구성한 영상 신호 증폭 회로이다.

4.1.4 A/D 변환(A/D conversion)

이렇게 증폭된 영상 신호는 아날로그 신호이기 때문에 컴퓨터에서 읽고 처리하기 위해서는 디지털 신호로 변환해야 한다. 이를 위해 16비트 A/D 변환기를 사용하였다. 여기서 디지털 신호로 바뀐 값들은 병렬포트의 상태 레지스터의 4비트 신호선을 이용하여 PC로 전송된다. 즉, 8비트씩 두 번에 나누어서 신호분배기(74HC157; 8-to-4 mutiplexer)로 보내지고, 이 신호는 다시 4비트씩 두 번에 걸쳐 병렬포트를 통해서 컴퓨터로 전송이 이루어진다. 한편, USB 포트를 이용할 경우 16비트 전체를 한꺼번에 두개의 버퍼(74HC244)로 보내서 USB 포트를 거쳐 8비트씩 두 번에 걸쳐 컴퓨터로 데이터가 전송된다.

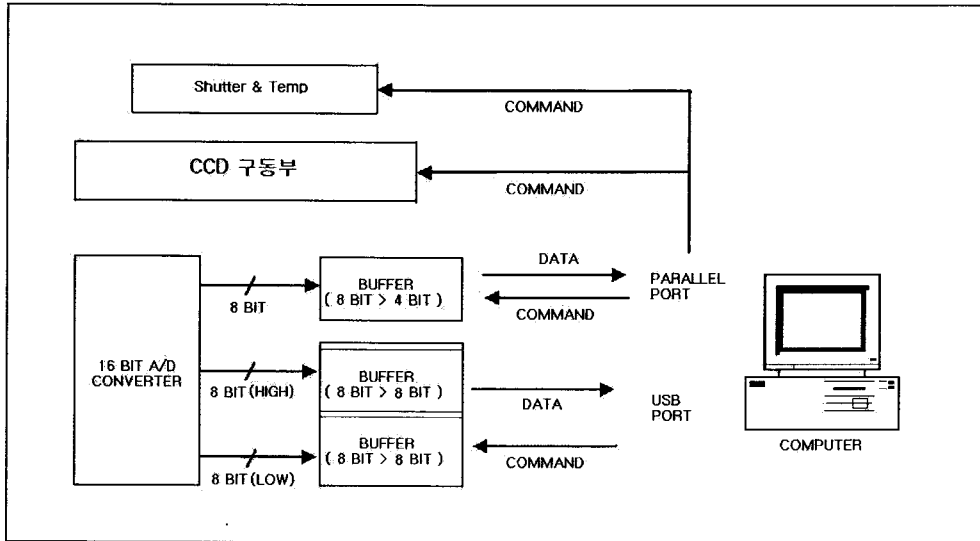


그림 10. 영상 신호와 제어 신호의 흐름도.

4.2 영상 신호 및 제어 신호 전송(Data transfer)

이 시스템에서 CCD 제어 명령 및 영상 신호 전송은 컴퓨터의 병렬 포트를 통하여 이루어지고 있다. 병렬 포트는 총 25핀으로 되어 있는데 이 중에서 CCD 구동을 위한 제어 명령들을 위해서 8핀을 사용하고, CCD를 통해서 얻어진 영상을 전송하기 위하여 4개의 핀을 사용하며, 나머지는 셔터나 열전냉각기 등 CCD 주변 장치 제어에 사용하고 있다. 그림 10에 CCD 구동의 제어 명령과 영상 신호의 흐름을 나타내었다.

데이터 전송부는, 그림 10에서 보는 바와 같이 컴퓨터의 병렬 포트를 통해서 CCD 구동부에 동작을 위한 명령을 내리고 또한 셔터와 온도 제어부에도 동작 명령을 전달할 수 있도록 되어 있고, CCD를 통해서 얻어진 영상 정보를 컴퓨터로 전송할 수 있도록 명령을 전달하고 데이터들을 받도록 되어 있다. 영상 신호들은 16비트 A/D 변환기를 통해서 16비트의 디지털 데이터로 변환된다. 이렇게 디지털 신호로 바뀐 데이터들은 8비트씩 버퍼로 전달되고 신호분배기(74HC157)가 병렬 포트로 4비트씩 데이터를 나누어서 전송해 준다.

4.3 전원부(Power Supply)

CCD 카메라 시스템의 전자회로에서 사용하고 있는 전원은 $\pm 15V$ 와 $+5V$ 이다. 이들 전원은 회로 내부에서 여러가지 반도체 소자들과 CCD의 구동에 사용되기 때문에 항상 안정적으로 공급이 되어야 한다. 이를 위해서 외부의 전원을 입력받아 정전압 레귤레이터(LM7805, LM7815, LM7819)를 사용해서 $\pm 15V$ 와 $+5V$ 를 안정적으로 공급할 수 있도록 했다. 그림 11은 전원부 회로이다.

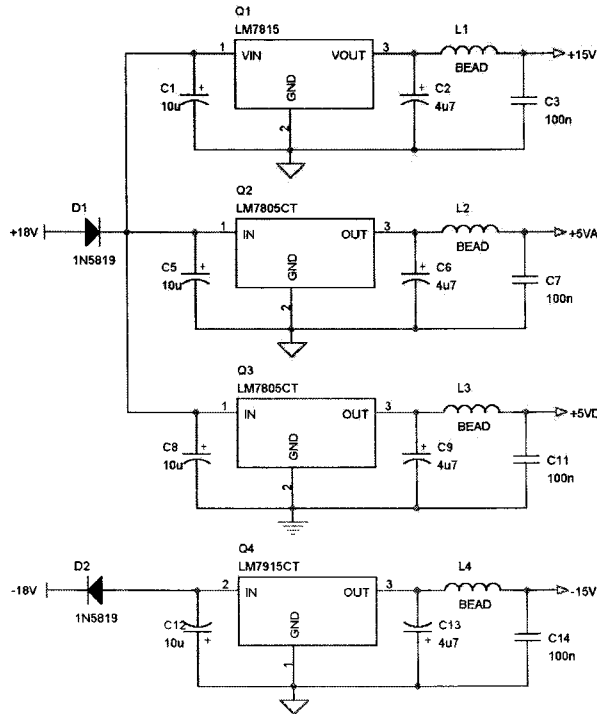


그림 11. 주 전원 공급 회로도.

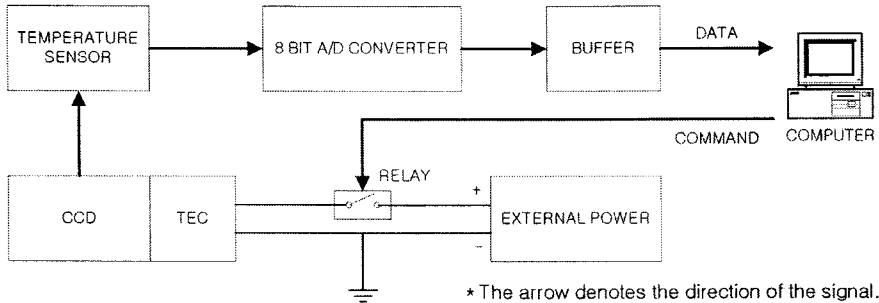


그림 12. 온도 제어 구성도.

4.4 온도와 셔터의 제어(Temperature & shutter control)

온도제어를 위한 구성요소를 보면, CCD의 온도를 측정하기 위한 온도 센서 LM335(LM335 Data sheet, National Semiconductor 2002)와 CCD를 냉각 시키기 위한 열전냉각소자(thermoelectric cooler, Peltier device)와 냉각 보조재(cold finger), 온도센서로 측정된 값을 디지털 값으로 변환시켜 주는 8비트 A/D 변환기로 되어 있다. 그림 12에 온도 제어의 전체 구성도를 나타내었다.

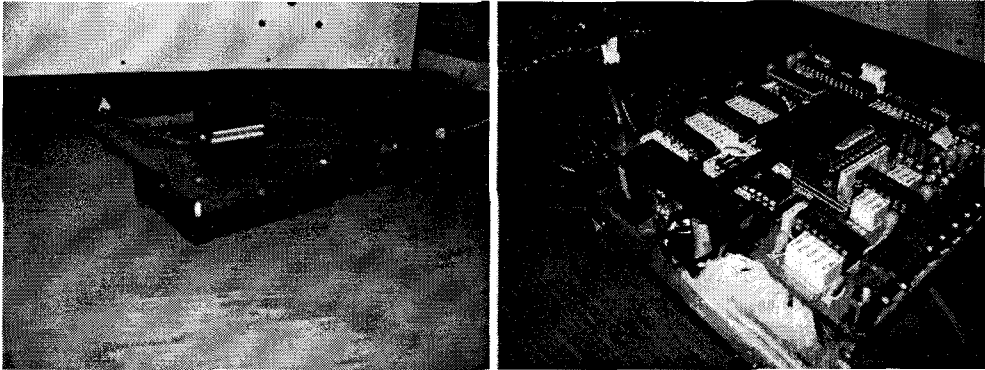


그림 13. 열전냉각장치와 셔터의 모습.

온도제어 과정을 살펴보면, 온도센서로 읽은 값이 A/D 컨버터를 거쳐서 컴퓨터로 입력이 되고, 컴퓨터에서는 이 온도가 요구되는 온도와 같은지를 비교해서 원하는 온도에 미치지 못하면 열전냉각소자를 작동하게 한다. 계속해서 센서의 값을 읽고, 그 값을 원하는 온도와 비교해서 그 온도를 유지하도록 열전냉각소자를 동작시킨다. 온도와 A/D 변환값에는 실험에 의하여 얻어진 실험식 (1)을 적용하였다.

$$\text{Temp.} = 0.39045 \times \text{ADU} - 40 \quad (1)$$

여기서 사용한 열전냉각소자는 크기 $30 \times 30\text{mm}$ 로써 $\Delta T = 70^\circ\text{C}$ 정도의 온도 냉각 효과를 가지고 있다. 열전냉각기는, 열전 재료로 만든 N, P형의 열전반도체(<http://www.tesemicon.com>, Tesemicon 2002)를 전기적으로는 직렬로, 열적으로는 병렬이 되도록 Π 자 형으로 구성하여 DC 전류를 흘렸을 때, 열전현상이 발생하여 한쪽 면은 차가워지고 다른 한쪽은 뜨거워지는 것을 이용한 장치이다. 이 열전냉각소자 위에 냉각 보조재를 올려 놓고, 냉각보조재를 CCD에 접촉시켜서 CCD 소자의 열을 열전냉각소자로 전달하여 준다. 열전냉각소자 밑에는 열전냉각소자에서 발생한 열을 식혀주는 방열판과 냉각팬이 장착되어 있다.

셔터는 솔레노이드(solenoid)를 이용한 기계식 셔터(mechanical shutter)를 사용했다. 솔레노이드는 전압계의 지침계 부품을 이용하여 자체 제작하였다. 제작된 셔터는 +12V 전원을 사용하며, 45° 의 회전각을 가지고 동작한다. 그림 13은 열전냉각장치와 셔터를 시험하는 모습이다.

4.5 CCD 케이스(Housing)

CCD 회로 및 여러 장비들을 담을 수 있는 케이스는 알루미늄을 사용해서 제작하였다. 가장 밑부분에는 방열판과 냉각팬이 있고 그 위에 알루미늄 케이스를 부착하였다. 알루미늄 케이스는 2단으로 제작하였다. 케이스의 아래 단에는 CCD를 장착한 두 장의 회로기판(PCB)이 위치하고, 두 장의 회로기판 사이에 셔터가 놓인다. 케이스의 윗 단에는 광학 보호창(optical window)과 필터휠이 장착되고, 가장 위에 카메라 렌즈를 장착하는 판이 올라가게 된다. 그림 14는 내부에 장착된 필터휠의 모습이고, 그림 15는 실제 제작된 최종 CCD 카메라 시스템 전체 모습이다. 그림 15의 오른쪽에 있는 장치가 개발된 CCD 카메라를 위하여 제작된 전용 전원 공급 장치이다.

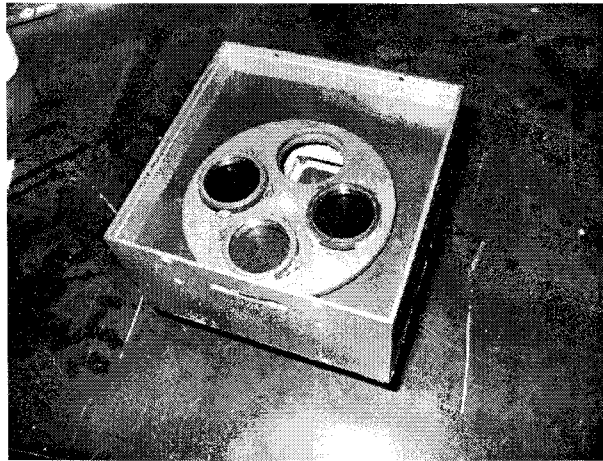


그림 14. 내부에 장착된 필터휠 모습.



그림 15. 완성된 CCD 카메라와 전용 전원 공급 장치.

4.6 조립 및 질소 충전

개발된 CCD 카메라의 열잡음을 최소화하고, 제 기능을 발휘하기 위해서는 $-20^{\circ}\text{C} \sim -10^{\circ}\text{C}$ 정도로 냉각된 상태에서 사용하게 되는데, CCD 케이스를 밀봉하지 않거나 내부에 수분이 있으면 CCD 수광면에 결로가 생긴다. 이 연구에서는 모든 조립 과정의 단계마다 밀봉을 고려하여 각 부품들을 배치하고 결합하였으며, CCD 케이스 내에 방습제를 설치하고, 실리콘 패드와 접착제 등으로 밀봉하였다. 단, 질소가스 치환 작업을 위해 마지막 밀봉 결합 부분은 글로브 박스 내에서 작업 할 수 있게 하였다. CCD 케이스 내부에 남아있는 수분을 함유한 일반 공기는 글로브 박스 내에서 무산소 무수분의 질소 가스로 치환하였는데, 치환 작업에는 약 24시간 정도가 소요되었다. 그림 16에 글로브 박스 내에서의 작업 모습을 보였다.

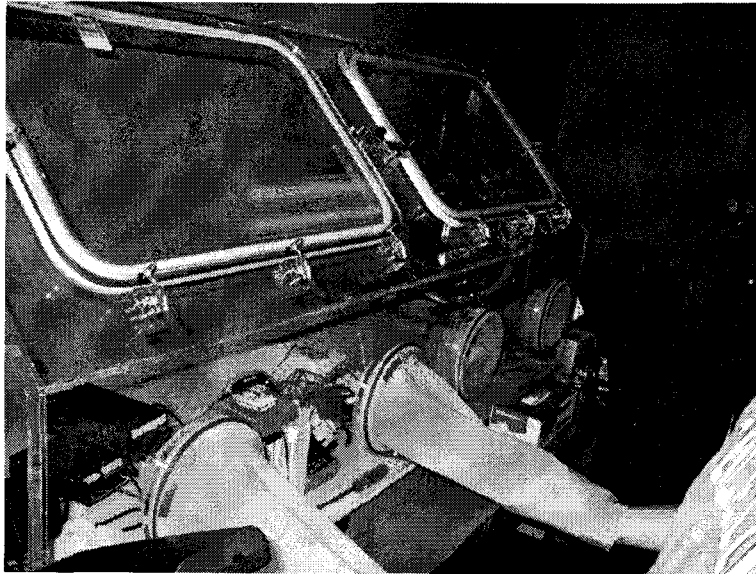


그림 16. 글로브 박스에서 작업하는 모습.

5. 성능 시험

5.1 CCD 카메라 냉각 시험

이 연구에서 개발된 CCD 카메라는 자체 내에 온도센서가 있어 온도 설정 하한 값을 충분히 낮게 한 다음(예, 설정값 = -100°C), 상온에서부터 냉각되는 값을 10초 간격으로 측정하였다. 각각의 측정값은 3회 측정의 평균값으로 나타내었고, 초기 온도가 각 17°C , 13°C 에서 냉각을 시작하였으며, 여기에는 총 3회의 실험치를 나타내었다. 그 결과를 그림 17에 나타내었다. 개발된 CCD 카메라는 외부온도가 17°C 일때 -16°C 까지 냉각되었고, 13°C 일때 -20°C 까지 냉각되는 것으로 나타났으며, 최대 냉각 온도에 이르기까지는 약 850초가 걸렸다. 이 연구에서 개발한 CCD 카메라의 최대 냉각 능력 즉, 최대 온도 변화폭은 그림 17에서 보듯이 약 33°C 이었다. 개발된 카메라로 실제 운용하고자 하는 목표 설정 온도가 -10°C 인 점을 고려하면, 실제 사용하기에 무난하다. 한편, 소프트웨어에 의한 온도 제어는 약 0.4°C 의 정밀도로 이루어진다.

5.2 영상 시험

개발된 CCD 카메라의 영상 읽기잡음과 암잡음, 그리고 영상이득이 어느 정도인지를 시험하였다. KAF-0401E(768×512), KAF-1602E(1536×1024), KAF-3200E(2184×1472)의 세 종류의 CCD에 대하여, -10°C 로 냉각이 유지되는 상태에서, 각각 3회 얻어진 영점 영상들을 한 영상당 64구간으로 나누어서 영상의 표준편차값들을 얻고, 이를 평균하여 영상 읽기잡음 값을 구하였다. 세가지 종류의 모든 영상에서 평균 읽기잡음은 $\sim 6.0e^{-}$ 정도로 얻어졌다. 한편, 암잡음 측정을 위하여, 각

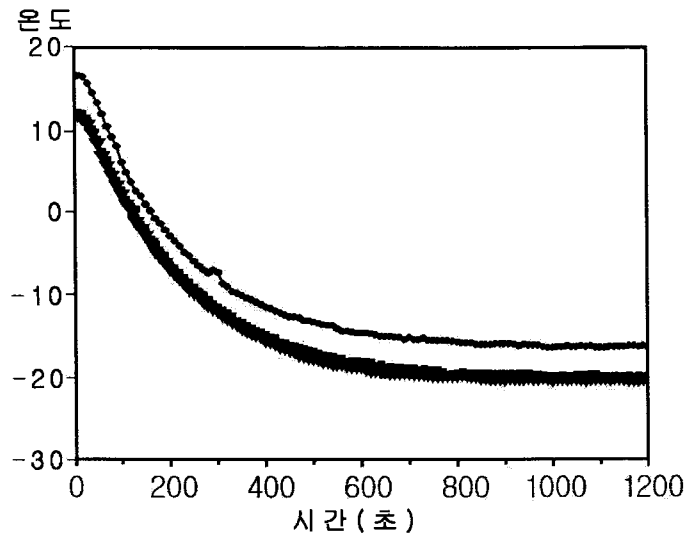
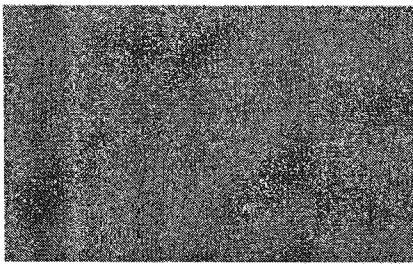
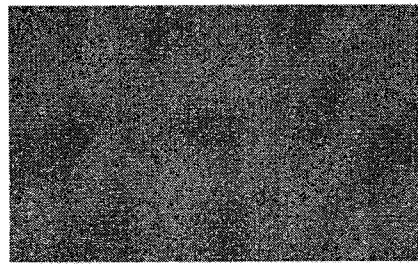


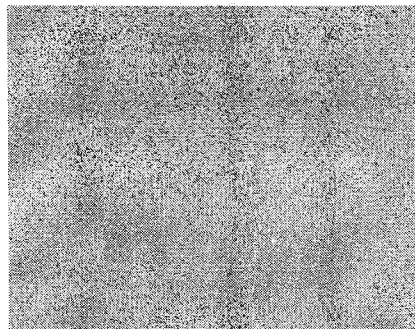
그림 17. 시간에 따른 CCD 카메라의 냉각 온도 특성.



(a) KAF-0401E(768×512)

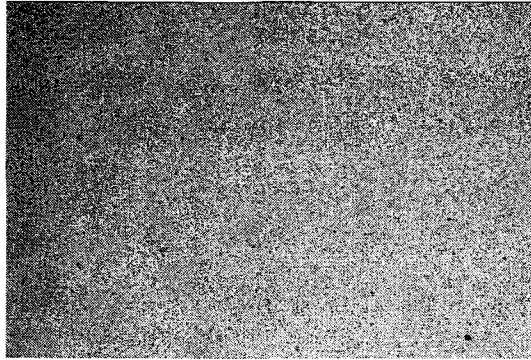


(b) KAF-1602E(1536×1024)

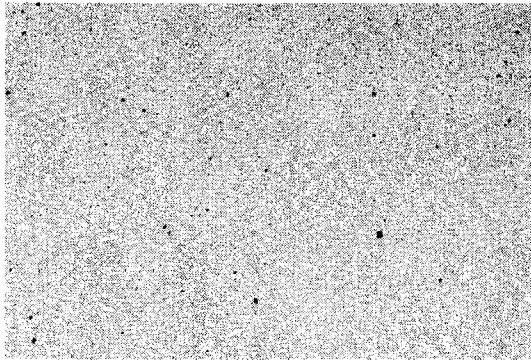


(c) KAF-3200E(2184×1472)

그림 18. 세가지 CCD들(KAF-0401E, KAF-1602E, KAF-3200E)의 영검 영상.



(a) ST-7: 노출 30초, 28mm 렌즈 사용, 냉각 온도 -10°C , 2004년 5월19일 21시 2분 촬영.



(b) skycam: 노출 30초, 28mm 렌즈 사용, 냉각 온도 -10°C , 2004년 5월 19일 21시 7분 촬영.

그림 19. 관측 영상 시험 비교.

1, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 200, 400, 600, 800, 1000초 노출한 암영상을 얻었고, 이들로부터 암잡음이 $0.14\text{ADU}/\text{sec}$ 로 구하여졌다. 그리고, 각 시간대별로 얻어진 여명의 하늘 영상(sky flat)의 화소값들의 각 평균값들과 표준편차들을 이용하여, 영상이득 $\sim 5e^{-}/\text{ADU}$ 를 얻었다. 이 작업들에는 IRAF/CCDREAD(Stetson 1991)의 imcombine, imstat 등의 작업자(task)를 사용하였다. 그림 18은 각각의 CCD들에서 얻어진 영점 영상이다. 여기에 나타낸 그림들은 실제 영상의 크기가 아니라 적당하게 비율이 조정된 것이다.

5.3 관측 시험

완성된 CCD 카메라로 천체를 대상으로 한 실제 관측 시험은 2004년 5월 19일에서 20일에 걸쳐 연세대학교 천문대 천안 탐사관측소에서 이루어졌다. 관측 시험에는 이 연구에서 개발된 CCD 카메라중 KAF-0401E(768×512)를 사용한 CCD 카메라와 같은 CCD를 사용하여 만든 SBIG사의 ST7-EX CCD 카메라를 동일한 하늘에 대하여 함께 비교 관측을 하였다. 두 대의 카메라 모두 같은 28mm 광각렌즈를 사용하였고, 같은 30초의 노출을 주었다. 이때 CCD 카메라의 냉각 온도는 두 대 모두 -10°C 로 하였다. 그림 19는 그 결과 영상들이다. 영상들은 IRAF/CCDREAD(Stetson 1991)의

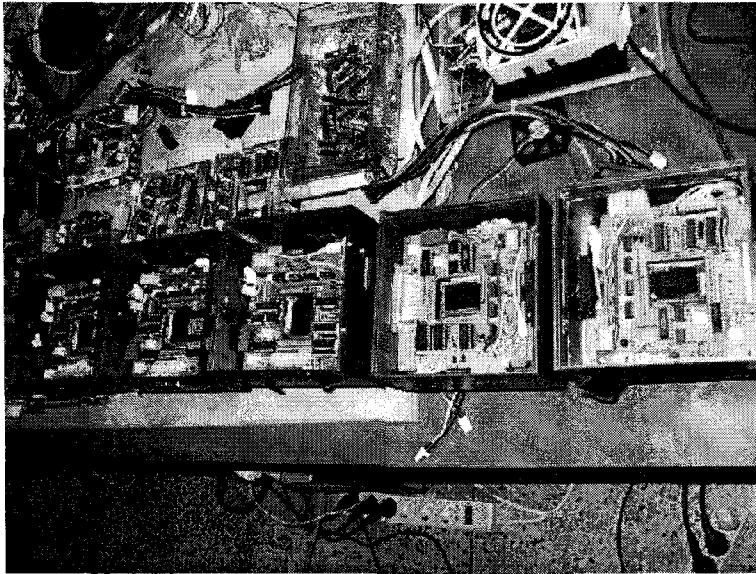


그림 20. 개발된 CCD 카메라들의 제작 과정 모습.

digiphot/phot를 사용하여 인식된 별들의 개수를 구하여 비교하였다. 개발된 CCD 카메라의 영상에서는 67개의 별들이 인식되었고, ST7-EX에서는 32개의 별들이 인식되었다. 개발된 CCD 카메라의 영상이 ST7-EX에 비하여 동등 이상의 영상을 보여준다.

6. 논의 및 결론

이 연구에서는 천체관측용 고효율 CCD 카메라 시스템과 제어 소프트웨어의 독자개발의 시도로 KODAK사의 KAF-0401E(768×512), KAF-1602E(1536×1024), KAF-3200E(2184×1472) 등 세 종류의 CCD를 바꾸어 가며 장착할 수 있는 범용 CCD 카메라시스템을 개발 완료하였다. 지금까지 모두 10대의 카메라가 만들어졌다. 그림 20은 CCD 카메라들의 제작 과정의 모습이다.

개발된 CCD 카메라의 영상 이득은 $5e^-/ADU$ 이고, 최대냉각능력은 상온대비 약 $\Delta 33^\circ C$ 이다. 냉각능력은 앞으로 실제 운용하고자 하는 목표 설정 온도가 $-10^\circ C$ 인 점을 고려하면, 실용에 적용하기에 무난하다. 한편, 소프트웨어에 의한 온도 제어는 약 $0.4^\circ C$ 의 정밀도로 이루어진다. 세 종류의 CCD를 사용한 각각의 영점 영상에서 이들의 평균 읽기잡음은 $\sim 6.0e^-$ 정도이다.

이 연구에서 수행된 성능 시험에서 목표한 성능을 보여 주고 있고, 앞으로 USB 포트를 이용한 데이터 전송이 추가로 이루어진다면 영상 읽기 속도가 상당히 줄어들 것이므로 보다 유연성 있는 관측이 가능할 것이다. 그림 21은 USB 모듈을 장착한 CCD 카메라의 모습이다.

이 연구에서 CCD 카메라가 자체 개발됨으로써, 전천 탐사를 위한 밤하늘 모니터용으로 필요한 소형 범용 CCD 카메라에 대한 많은 수요를 충족시키게 되었다. 나아가 동급에서 같거나 나은 성능을 가지면서 다루기 쉽고, 동시에 자체적으로 수리와 정비가 가능하게 되었다. 또한, 좀 더 개량하여

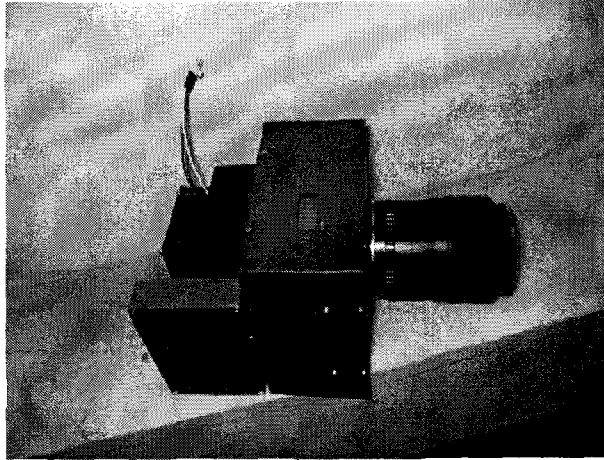


그림 21. USB 모듈이 장착된 CCD 카메라.

양산이 가능하게 된다면 소형·범용으로 사용되고 있는 CCD 카메라의 늘어나는 수요에 대하여 보다 저렴하게 공급이 가능하리라 기대된다. 이번 시스템 개발 경험이 보다 큰 CCD 시스템의 개발에 활용되었으면 한다.

감사의 글: 이 논문은 학술진흥재단(KRF-2002-070-C00045)의 지원에 의하여 연구되었습니다. CCD 카메라 제작에 도움을 주신 김효민 님과 에드텍의 정봉호 사장님, 관측시험에 도움을 주신 한국천문 연구원의 임홍서 박사님께 감사드립니다.

참고문헌

- 유영삼, 박수중, 김민진, 이성호, 변용익, 천무영, 한원용 2001, 한국천문학논총, 16, 1
진호, 한원용, 남옥원, 이재우, 이서구, 이우백 1997, 한국우주과학회지, 14, 259
차상목, 문봉근, 진호, 육인수, 남옥원, 이성호, 박영식, 조승현, 목승원, 김천휘 2006, 한국우주과학회지, 23, 425
Stetson, P. B. 1991, PASP, 102, 932