

보현산천문대 2K CCD 카메라의 특성 CHARACTERISTICS OF THE BOAO 2K CCD CAMERA

박병곤, 천무영, 육인수, 성현철
한국천문연구원

BYEONG-GON PARK, MOO-YOUNG CHUN, IN-SOO YUK, AND HYEON-CHEOL SEONG

Korea Astronomy Observatory

E-mail: bgpark@kao.re.kr

Received 2001 Nov. 10; Accepted: 2001 Nov. 14

ABSTRACT

We present the characteristics of the 2K CCD camera at the Bohyunsan Optical Astronomy Observatory of the Korea Astronomy Observatory at the time of its development. The purpose of this paper is to support the observers who may need detailed information on the characteristics of the camera and to provide helpful information on the optimization of a CCD camera for those who try to develop their own camera. The 2K CCD camera was optimized to have a gain of $1.8e^-/ADU$ and a read out noise of $7e^-$ from an experiment using radioactive ^{55}Fe X-ray source. The charge transfer efficiency was measured as 0.9999976 for serial and 0.9999942 for parallel direction, which means 0.5% charge loss along the serial direction and 1.2% along the parallel direction across the chip. The quantum efficiency of the camera was measured from an experiment using a homogeneous light source consisting of a halogen lamp and an integrating sphere with a monochromator. The resulting quantum efficiency of the camera peaked at the wavelength range 600-700 nm with the value of ~ 0.89 .

Keywords: instrumentation: detectors

I. 서 론

한국천문연구원 보현산천문대가 보유한 1.8 m 망원경의 영상관측장비는 2K CCD 카메라이다. 이 카메라는 과학기술처 특정연구과제(한인우 등 1996)의 일부로서 1995년부터 1997년까지 3개년에 걸쳐 개발되어 1997년 11월부터 현재까지 1.8 m 망원경의 주력관측기기로 사용되고 있다.

그러나 국내 대부분의 관측천문학자들에 의해 사용되고 있음에도 불구하고 이 카메라의 자세한 특성 정보는 한국천문연구원의 내부 자료로서만 존재하고 있을 뿐 관측자들이 참조할 수 있는 문서의 형태로는 제공되고 있지 않다.

한편, 오늘날 CCD 카메라는 가장 대중적으로 널리 사용되고 있는 천문관측용 카메라로 자리매김하고 있으며 대학 실험실에서도 제작이 가능할 정도로 보편화되어 있다. 그러나 제작된 CCD 카메라의 특성을 측정하거나 한발 더 나아가서 특성의 최적화를 위한 실험 방법에 대해서는 참고할 만한 자료가 부족한 실정이다.

이에 따라 본 논문에서는 한국천문연구원 보현산천문대가 보유한 2K CCD 카메라의 제작 당시 성능 측정 방법과 최적화 과정, 그리고 그 결과를 소개함으로써 국내의 CCD 카메라 개발자들에게 참고 자료가 되고 이 카메라를 이용하는 관측자들의 연구에 도움이 되고자 한다.

본 논문의 순서는, 먼저 2장에서 보현산천문대 2K CCD 카메라의 구성을 소개하고, 3장에서 CCD의 이득값(Gain)과 읽기잡음(readout noise) 측정 및 최적화 과정, 그리고 전하전달효율(CTE, Charge Transfer Efficiency)의 측정 결과를 보이며, 4장에서 양자효율의 측정법과 그 결과를 기술하고, 마지막으로 5장에서는 2K CCD 카메라의 특성에 대한 요약 및 토의가 이루어진다.

II. 보현산천문대 2K CCD 카메라의 구성

보현산천문대 2K CCD 카메라는 SITe Inc.의 SI424AB 후면조사방식(back-illuminated) CCD를 채택하고 있다. 이 소자는 한 픽셀의 크기가 $24 \mu m^2$ 인 정방형 CCD로서 2048×2048 개의 영상 영역으로 구성되며 영상영역의 안정을 위하여 CCD를 읽어내기 전에 20 픽셀의 전단계 읽기 영역(prescan pixels)을 가진다. CCD 자체는 네 군데의 모서리에서 각각 따로 읽을 수 있도록 설계되어 있기 때문에 2088×2048 개의 픽셀을 가지는 것과 같다(SITe 1995). 1.8 m 망원경에 부착하였을 경우 초점비 f/8일 때 관측 시야는 $11'.7 \times 11'.7$ 이며 하나의 픽셀은 $0''.34$ 에 해당한다.

보현산천문대에서 보유한 소자에 대해 제작사에서 측정된 특성들을 표 1에 보였다. 표 1로부터 네 개의 출력 앰프

표 1. SITe SI424AB CCD 소자의 제작사 사양

형식	2048 × 2048 pixels full frame	
픽셀 크기	24 μm × 24 μm	
이미지 영역	49 mm × 49 mm	
일련번호	1606BR03-01	
코팅	visual AR coating	
등급	Grade 2	
출력	4	
읽기잡음(e ⁻)	A	9.21
	B	10.55
	C	10.45
	D	7.99

중 D 앰프가 가장 읽기잡음이 작다는 사실을 알 수 있다. 제작사의 측정 자료는 천문관측에 최적화된 제어장치를 사용한 값이 아니므로 실제 천문관측용 제어기를 사용할 때의 결과와는 다르게 나올 수 있다. 따라서 표 1의 자료는 CCD 카메라를 제작할 때 참고할 수 있는 자료로서의 가치는 있으나 제작 이후의 최종 특성과는 다를 수 있음을 주의하여야 한다.

CCD 카메라를 제어하기 위한 제어장치는 San Diego Univ.(SDSU)에서 개발한 범용 CCD 제어장치(Gen-I SDSU Controller)를 사용한다. 이 제어장치는 광케이블을 통하여 호스트 컴퓨터와 통신할 수 있는, Motorola의 DSP56001을 채용한 타이밍 보드와, CCD의 제어에 필요한 클럭과 바이어스 전압을 공급하고 CCD의 비디오 신호를 수치로 변환하는 아날로그 보드, 그리고 필터휠 및 온도 제어에 사용되는 유틸리티 보드로 구성되어 있다. SDSU CCD 제어장치에 대해서는 Leach(1988) 또는 인터넷 홈페이지(<http://www.astro-cam.com>)에서 보다 상세한 정보를 얻을 수 있다.

III. 2K CCD 카메라의 성능 최적화

(a) 이득값과 읽기잡음

CCD 카메라의 성능 최적화는 CCD 카메라를 제어하는 각종 클럭의 길이와 전압의 크기, 바이어스 전압의 크기 등을 변화시킴으로써 가장 좋은 성능을 보이는 구성 요소를 찾아내는 과정으로 요약할 수 있다. CCD 성능의 요소는 이득값(Gain), 읽기 잡음(Read Out Noise; RON), 전하전달효율(Charge Transfer Efficiency; CTE) 등이며 이들 성능의 측정에는 철의 방사성 동위원소인 ⁵⁵Fe로부터 발생하는 X선을 이용하였다. 자세한 실험 방법은 박병곤 등(1995)과 과거처 특정연구 보고서 광학 적외선 천문관측 시스템 개발(한인우 등 1996)에 설명되어 있다.

표 1에 따르면 채택된 CCD 소자는 4개의 출력 앰프를 가지고 있으며 그 중 제작사 자체 시험 결과 읽기 잡음이 가장 작은 출력 앰프는 D 앰프이다. 따라서 다중 출력을 이용하지 않는 경우 D 출력을 사용하는 것이 최선의 선택이라 할 수 있다. 본 연구에서는 다중 출력을 이용하지 않

표 2. CCD의 출력 드레인 전압(V_{OD})에 대한 이득값과 읽기잡음의 관계

V_{OD}	Gain[e-/ADU]	Noise[e ⁻]
22.3	8.3	14.6
23.4	3.5	11.3
24.6	2.2	9.3
25.8	1.9	8.2
26.9	1.8	7.0
28.1	1.8	6.7

았는데 그 이유는 서로 다른 특성을 가지는 출력으로부터 읽어낸 영상을 합치는 과정에서 발생하는 오차와 읽기 시간의 단축으로 얻는 이득을 비교할 때 2K CCD 정도의 크기에서는 읽기 시간이 조금 더 걸리더라도 출력 영상 자료의 일관성을 유지하는 것이 더 중요하다고 판단하였기 때문이다.

CCD의 출력 앰프는 MOSFET(Metal Oxide Silicon Field Effect Transistor)으로 되어 있으며 MOSFET의 이득값(V/e^-)은 드레인 전압(drain voltage)의 크기에 비례하고 읽기 잡음은 반비례하는 경향을 보인다. 따라서 CCD의 출력 앰프가 허용하는 드레인 전압의 최소 및 최대 허용치 내에서 전압을 조절함으로써 이득값과 읽기잡음을 최적화시킬 수 있다. 한편 클럭 전압과 폭은 CCD의 최대전하저장량과 CTE에 영향을 미치므로 소자가 제공하는 최대의 전하저장량과 CTE를 확보하기 위하여 이들 역시 조정하여야 한다. 즉, 이득값과 읽기잡음의 최적화는 우선 클럭 전압과 폭, 그리고 기타 바이어스 전압 등을 오실로스코프를 이용하여 최적화하여 최대 전하저장량이 보장되는 클럭 전압과 길이를 확보한 상태에서 출력 드레인 전압을 변경하여야 한다.

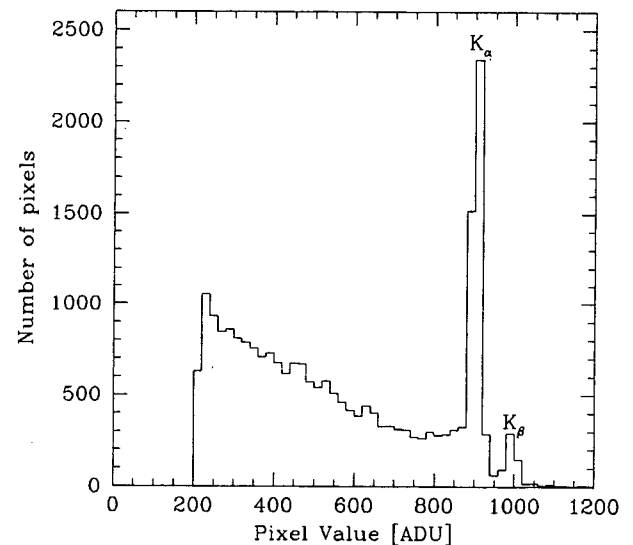


그림 1. K CCD의 최종 출력 드레인 전압에 대하여 X선 실험을 통해 이득값과 읽기잡음을 구하였다. 구한 이득값과 읽기잡음은 각각 $1.8e^-/ADU$ 와 $7e^-$ 이다.

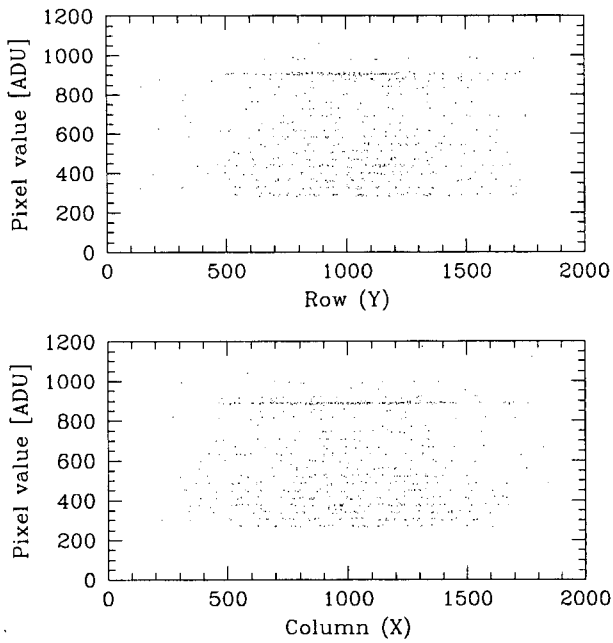


그림 2. X선 실험을 통한 2K CCD의 CTE 측정. 위의 그림은 세로축, 아래의 그림은 가로축에 대한 X선 전자의 CTE를 각각 나타낸다.

각각의 출력 드레인 전압에 대하여 X선 실험을 시행하고 이 때 얻은 영상으로부터 그림 1과 같은 히스토그램을 그려서 이득값과 읽기잡음을 구한다. 표 2에는 이러한 반복 실험의 결과를 정리하였다.

SI424 CCD 소자의 경우 28V 이상의 전압은 소자 자체에 무리를 가하게 되므로 더 이상 전압을 높일 수는 없다. 따라서 읽기 잡음이 최소가 되는 전압으로 약 27V를 적용하였다. 이것은 최소의 읽기 잡음을 목표로 했을 경우이므로 읽기 잡음이 조금 크더라도 더 낮은 이득값이 필요한 관측일 경우에는 드레인 전압을 변화시킴으로써 간단하게 특성을 변화시킬 수 있다.

(b) 전하전달효율

X선을 이용하면 실험에 사용되는 X선 광자의 에너지를 정확히 알 수 있으므로 이를 이용하여 CTE를 측정할 수 있다. 그림 2는 CTE를 나타내는 그림으로서 CCD의 X축과 Y축을 따라 X선 광자의 값을 그 위치에 따라 나열한 그래프이다. 대부분의 광자는 하나의 픽셀 위에 떨어지게 되므로 그래프에는 단일 픽셀에 떨어진 광자를 나타내는 밀집된 선으로 나타나는 영역이 보이게 된다. 그림 2에서 이러한 밀집된 영역은 두 군데에서 보인다. 위쪽의 비교적 성긴 밀집 영역(1000 ADU 부근)은 ^{55}Fe 의 X 선 광자 중 K_{β} 에 해당하고 아래쪽의 조밀한 영역(900 ADU 부근)은 K_{α} 에 해당한다. 이 중 실험에서 사용한 것은 K_{α} 영역이다. CTE가 100%가 아닌 경우 이 밀집 영역은 좌표값이 커짐에 따라 값이 점차 줄게되고 이렇게 줄어드는 양은 CTE의 척도가 된다.

X선 광자가 떨어진 단일 픽셀의 좌표를 (X,Y)라 하고 이 때의 ADU 값을 $Z(X,Y)$ 라 하면, 다음과 같은 식이 성립된다.

$$Z(X, Y) = Z_0 - \zeta X - \xi Y \tag{1}$$

여기서 Z_0 는 전하전달에 의한 손실이 없을 경우의 X선 픽셀값이며, ζ 와 ξ 는 각각 X방향과 Y방향의 전하손실률을 나타낸다. 식 1은 X선 광자가 떨어진 단일 픽셀들로 이루어진 평면의 방정식이므로 CCD 전체의 단일 픽셀들로부터 평면 방정식을 구하면 Z_0, ζ 및 ξ 를 구할 수 있다. CTE는 하나의 전자에 대한 전하전달률을 의미하므로 이렇게 구한 ζ 와 ξ 를 Z_0 로 정규화하면 전하손실률을 구할 수 있게 된다.

하나의 픽셀에 떨어지는 K_{α} 광자의 ADU값과 좌표 사이의 평면 방정식을 여러번의 반복으로 구한 결과 $Z_0 = 901.0, \zeta = 0.00218,$ 그리고 $\xi = 0.00523$ 을 얻을 수 있었다. 따라서 X축 방향의 CTE는 $1 - \zeta/Z_0 = 0.9999976,$ Y축 방향의 CTE는 $1 - \xi/Z_0 = 0.9999942$ 가 된다.

이 때 전하전달효율은 CTE로 나타내는 것보다 다음 식과 같이 손실률(Loss Factor; LF)로 나타내는 것이 더 알아보기 쉽다. 즉,

$$LF \equiv -\log(1 - CTE)$$

로 정의하면 표현하여야 할 유효숫자의 자리수가 줄어들어서 표현이 쉽게 되며, CCD의 한 변의 픽셀수를 n 이라 하면, 한 변 전체를 이동하는 전하의 총손실률은 $1 - (1 - 10^{-LF})^n$ 으로 표현할 수 있다. 지금까지 구한 CTE를 LF로 표시하면, LF는 X축의 경우 5.62/pixel, Y축의 경우 5.24/pixel이 된다. 이것은 전체 CCD 소자 영역(2048픽셀)에 걸친 손실률이 X축의 경우 약 0.5%, Y축의 경우 약 1.2%가 된다는 것을 의미한다.

IV. 양자 효율 측정

다른 수광 소자와 비교할 때 CCD의 가장 큰 장점 중 하나로 높은 양자 효율을 들 수 있다. CCD 제작사에서는 자사에서 제작하는 CCD의 모델에 따라 표준 양자 효율을 제시하고 있고 보통 제작사의 표준 양자 효율을 CCD의 효율로 삼고 있다. 그러나 제작사의 표준 양자 효율을 그대로 사용할 수는 없다. 왜냐하면 CCD 카메라는 반드시 CCD 소자의 앞에 윈도우를 부착하여야 하고 이 윈도우의 투과율과 CCD 소자 그 자체의 양자 효율이 결합되어야만 CCD 카메라의 실제 유효 양자 효율을 구할 수 있기 때문이다.

(a) 기본 방정식

양자 효율은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$q_{\lambda} = \frac{F_{\lambda}^o}{F_{\lambda}^i} \tag{2}$$

여기서

q_λ = 파장 λ 에서 양자 효율,
 F_λ^i = photons/cm²으로 나타낸 입사 광량,
 F_λ^o = CCD의 출력으로부터 얻은 출력 광량
 이다.

광다이오드는 입사광의 에너지에 비례하여 출력 전류가 발생하는 수광소자이므로 측정된 전압으로부터 다음 식과 같이 입사광의 플럭스를 구할 수 있다. 본 실험에서는 수광면적이 정확하게 1 cm²인 광다이오드를 사용하였으므로 식에서 광다이오드의 면적은 생략되었다.

$$F_\lambda^i = p \left(\frac{\Delta V}{g} \right) \left(\frac{1}{1.6 \times 10^{-19}} \right) \left(\frac{\lambda}{1240 \text{ nm}} \right) \left(\frac{1}{\eta_\lambda} \right) \quad (3)$$

여기서,

p = CCD와 광다이오드의 적분구로부터 떨어진 거리 차이에 따른 보정항. 포트비(port ratio)라 한다. 본 실험 장치의 포트비는 $p = 0.45$ 로 측정되었다.

ΔV = 광다이오드에서 측정된 전압 변화량.

g = 광다이오드 증폭기의 증배율, 본 실험에서는 $= 10^8 V/A$ 이다.

l = nm 단위로 나타낸 파장.

η_λ = 광다이오드의 양자효율, 제작사에 의하여 A/W 단위로 주어진다.

한편, CCD의 출력단에서 검출되는 전자의 개수 즉 출력 플럭스는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_\lambda^o = G \left(\frac{D}{\delta t} \right) \left(\frac{1}{S} \right) / Q_w \quad (4)$$

위 식에서,

G = X선 실험으로부터 얻은 CCD의 이득값, 본 실험에서는 $1.8 \text{ e}^-/\text{ADU}$ 이다.

D = CCD의 평균값 (ADU/pixel).

δt = 노출시간.

S = CCD의 픽셀 면적, $24 \mu\text{m}^2$ 픽셀의 경우 $S = 5.76 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$.

Q_w = 윈도우의 투과율. S1-UV Silica, BBAR 코팅의 경우 200 - 1100 nm에서 $Q_w = 0.92$ 로 일정하다.

(b) 측정 및 결과

CCD 카메라의 양자 효율을 측정하려면 정밀한 광원과 단파장 발생기(monochromator), 균일 광원을 만들기 위한 적분구(integrating sphere), 눈금 조정이 되어 있는 광다이오드(photodiode) 또는 광전자증배관(photomultiplier tube) 등이 필요한데 2K CCD 카메라의 양자 효율 측정에는 UDT (United Detector Technology, Inc.)사의 광다이오드를 비교 센서로, 할로겐 램프와 광케이블을 광원으로 사용하였다. 할로겐 램프의 전원 변동은 수시간에 걸쳐 눈에 띄지 않는 변화를 보이지 않았다. 이 실험에서 CCD의 온도는 -120°C 를 유지하였다.

실험의 과정은 다음과 같다. 전체 시스템의 전원을 켜 뒤 전원이 안정될 때까지 약 두 시간 정도 기다린다. 단파장 발생기를 이용하여 측정 파장을 결정한다. 본 측정에서는 350 nm~950 nm의 범위를 100 nm 단위로 나누어서 측정하였다. 셔터가 닫힌 상태에서 광다이오드에 연결된 전압계를 읽어서 기록하고 다시 셔터를 열고 전압을 측정하여 기록한다. 이 때의 전압 차이는 해당 파장의 입사 에너지에 비례하는 양이다. CCD를 여러번 읽어 내어서 표면에 쌓인 전하를 모두 제거한 다음 노출시키고 CCD 화면의 가운데 근처의 적당한 영역을 잡아 평균값과 표준 편차를 측정한다. 이 때 반드시 노출 시간을 함께 기록하여야 한다. 이러한 과정을 전체 파장 영역에 대하여 되풀이한다.

표 3. 양자효율 측정 결과. 처리하기 전의 자료

Run	Image	λ (nm)	V_1	V_2	Mean	S.D.	δt
1 (bias = 2840)	038	900	-0.048	0.127	13,400	163.1	1
	039	800	-0.048	0.135	16,090	192.0	1
	040	700	-0.048	0.130	17,230	162.7	1
	041	600	-0.048	0.127	17,750	167.3	1
	042	500	-0.048	0.134	17,360	166.3	1
	043	450	-0.048	0.120	15,690	148.9	1
	045	400	-0.048	0.027	23,250	225.3	4
	046	350	-0.048	-0.038	6,635	57.1	10
2 (bias = 2880)	047	350	-0.045	-0.036	9,820	91.1	20
	048	400	-0.045	0.029	17,430	181.1	3
	049	450	-0.045	0.126	15,200	190.1	1
	050	500	-0.045	0.126	15,820	168.2	1
	051	600	-0.045	0.114	15,570	173.3	1
	052	700	-0.045	0.116	15,790	177.0	1
	053	800	-0.045	0.121	14,570	162.5	1
	054	900	-0.045	0.124	12,580	138.5	1
	055	950	-0.045	0.086	23,330	283.0	3

표 4. 양자 효율 측정결과. 처리한 후의 자료

Run	Image	δr	$\lambda(\text{nm})$	ΔV	η	ADU	CCD		Q.E. \times Q_w
							F_λ^o	F_λ^i	
1	038	1	900	0.175	0.388	10,560	4.55×10^9	9.21×10^9	0.454
	039		800	0.183	0.478	13,250	4.47×10^9	6.95×10^9	0.724
	040	1	700	0.178	0.462	14,390	5.85×10^9	6.12×10^9	0.880
	041	1	600	0.175	0.387	14,910	6.03×10^9	6.15×10^9	0.902
	042	1	500	0.182	0.276	14,520	5.90×10^9	7.48×10^9	0.726
	043	1	450	0.168	0.218	12,850	5.33×10^9	7.87×10^9	0.623
	045	4	400	0.075	0.164	5,103	1.97×10^9	4.15×10^9	0.437
	046	10	350	0.010	0.136	380	2.25×10^8	5.84×10^8	0.354
2	047	20	350	0.009	0.136	347	1.67×10^8	5.25×10^8	0.293
	048	3	400	0.074	0.164	4,850	1.97×10^9	4.09×10^9	0.443
	049	1	450	0.171	0.218	12,320	5.16×10^9	8.01×10^9	0.592
	050	1	500	0.171	0.276	12,940	5.37×10^9	7.03×10^9	0.703
	051	1	600	0.159	0.387	12,690	5.29×10^9	5.59×10^9	0.870
	052	1	700	0.161	0.462	12,910	5.36×10^9	5.53×10^9	0.891
	053	1	800	0.166	0.478	11,690	4.95×10^9	6.30×10^9	0.723
	054	1	900	0.169	0.388	9,700	4.27×10^9	8.89×10^9	0.442
	055	3	950	0.131	0.289	6,817	2.64×10^9	9.77×10^9	0.248

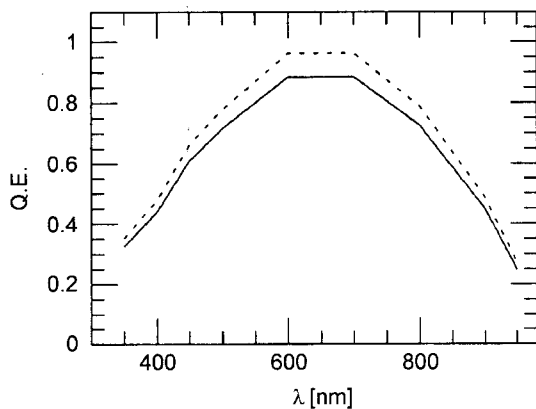


그림 3. 2K CCD의 양자 효율. 가로축은 입사광의 파장, 세로축은 양자 효율을 각각 나타낸다. 실선은 CCD 윈도우를 고려한 경우, 점선은 순수한 CCD만의 양자 효율을 각각 나타낸다. 2K CCD 카메라의 최대 양자 효율은 600 nm ~700 nm에서 약 89%를 보인다.

표 3은 측정을 2회 되풀이한 결과를 나타낸다. 파장이 짧은 영역에서는 양자 효율이 비교적 급히 변하므로 500 nm보다 짧은 파장에 대해서는 간격을 50 nm로 좁혔고 두 번째 측정에서는 950 nm에서 한 번 측정하여 장파장쪽의 양자효율을 좀 더 자세히 보고자 하였다. 2회의 측정에서 V_1 의 값이 서로 다른 이유는 두 측정 사이의 시간 간격이 하루 정도로 길고 그 사이 전원을 껐다가 다시 켜기 때문이다.

두 번의 측정에 대하여 양자 효율을 환산한 결과를 표 4에 보였다. 표 4의 양자 효율은 CCD 카메라의 윈도우에 의한 광손실을 고려한 양자 효율이다. 순수한 CCD 소자의 양자 효율은 표 4의 값을 Q_w 로 나누어 주면 얻을 수 있다.

최종 양자 효율은 두 번의 측정 결과를 평균하여 얻었으며 한 번의 측정 결과만 있는 경우에는 그 값을 그대로 적용하였다. 그림 3은 양자 효율 측정 결과를 그래프로 그린 것이다.

표 4와 그림 3으로부터 2K CCD의 양자 효율의 최대값은 600 nm~700 nm 사이에서 보이며 그 값은 89% 정도임을 알 수 있고, 400 nm 미만과 900 nm 근처에서는 급격히 줄어 들어 40% 미만이 됨을 알 수 있다.

V. 결론 및 토의

보현산천문대의 영상 관측용 CCD 카메라로 사용되는 2K CCD 카메라에 대하여 제작 당시 특성 결정 과정과 그 결과를 소개하였다. 2K CCD 카메라는 SDSU의 범용 제어기와 하와이 대학 IfA(Institute for Astronomy)의 모듈라 듀어를 채택하여 기존의 CCD 카메라와 호환성을 가질 수 있도록 설계하였다.

2K CCD 카메라는 주로 ^{55}Fe 방사성 원소의 K_α X선을 이용하여 CCD의 이득값과 읽기 잡음, 그리고 CTE를 측정하였고 CCD에 가해지는 바이어스 전압과 클럭 전압의 값과 펄스 지속시간 등을 조절하여 최적화하였다. X선을 이용한 성능 최적화의 경우 CCD의 윈도우를 광학 윈도우에서 X선을 위한 Be 윈도우로 바꾸어야 하는 등의 어려움이 있으나 입사광의 에너지를 정확하게 측정할 수 있다는 장점이 있으며, 균일한 가시광원을 이용하여 이득값과 읽기 잡음, CTE 등을 측정할 수도 있으나 이 경우 입사광의 시간과 공간에 따른 균일성이 결과에 미치는 영향이 매우 크고 균일성을 확보하기가 어렵다는 장단점이 있다.

성능 최적화 결과 2K CCD 카메라의 이득값과 읽기잡음은 각각 $1.8 \text{ e}^-/\text{ADU}$ 와 7 e^- 를 얻을 수 있었으며 이것은 실

험실에서 얻은 값이므로 실제 관측 환경에서는 이보다 조금 더 큰 읽기잡음이 나타날 것으로 예상된다.

CTE의 경우 읽기잡음을 최적화한 바이어스 전압 및 클럭에 대하여 가로축과 세로축 방향의 CTE는 각각 $LF(X) = 5.62$, $LF(Y) = 5.24$ 으로 나타났고 이것을 CCD 소자 전체에 걸친 전하손실로 계산하면 X축의 전하손실은 약 0.5%, Y축의 전하손실은 약 1.2%가 된다.

CCD의 양자 효율은 눈금 조정이 잘 된 광다이오드나 광전자증배관을 이용하여 측정할 수 있다. 엄밀히 말하면 광다이오드나 광전자증배관에서 측정되는 입사광의 단위는 광자 개수의 단위이고 CCD에서 측정되는 광량은 전자개수의 단위이므로 입사 광자 하나에 대하여 여러 개의 전자가 방출되는 고에너지 입사광에 대해서는 이러한 실험 방법이 성립되지 않는다. 그러나 본 실험에서는 가시광 영역에 대하여 양자 효율을 측정하므로 광자와 전자의 개수가 1:1이라는 가정이 대체로 성립된다. 장시간에 대해 안정적인 할로겐 광원을 적분구를 통과시켜 만든 시간적, 공간적으로 균일한 광원과 정밀하게 눈금 조정이 된 광다이오드를 이용한 양자 효율 측정으로부터 2K CCD의 양자 효율은 파장 범위 600 nm~700 nm에서 80%이상의 최대 효율, 400 nm 미만과 900 nm 이상에서는 40% 미만의 낮은 효율

을 가짐을 알 수 있었으며 단파장 영역에서 양자 효율이 급격히 감소됨을 알 수 있었다. 따라서 2K CCD는 UBV 측광계를 이용한 관측에서 U필터의 경우 400 nm 이하의 파장에서 보이는 급격한 양자 효율 감소로 인하여 매우 긴 노출시간이 필요함을 알 수 있다.

2K CCD 카메라 개발 과정에서 양자 효율 측정 장치를 활용할 수 있도록 지원해 준 하와이 대학교 IfA의 Gerard A. Luppino 교수께 감사드립니다.

참고문헌

- 박병곤, 천무영, 김승리 1995, 천문학 논총 10,11
 육인수, 박병곤 1996, 천문학 논총 11,147
 한인우, 오병렬, 심경진, 박영득, 천무영, 박병곤, 육인수, 김승리, 장정균, 성현철, 문용재, 장비호, 남육원, 김강민, 전영범, 경재만 1996, 광학 적외선 관측기술개발 (과학기술처 특정연구보고서), pp134-140
 Leach, R. 1988, PASP 100,1287
 Luppino, G. A., & Miller, K. 1992, PASP 104, 105
 Scientific Imaging Technologies, Inc. (SITE) 1995, LiT. No. SI-424A, version date 12/20/95(<http://www.site-inc.com>)