

BOES CCD 카메라 II. 카메라의 특성 THE BOES CCD CAMERA II. CHARACTERISTICS OF THE CCD

박병곤, 성현철, 장정균, 장비호, 이병철, 박운호, 김강민, 한인우
한국천문연구원

B.-G. PARK, H.-C. SEONG, J.-G. JANG, B.-H. JANG, B.-C. LEE, Y.-H. PARK, K.-M. KIM, AND I. HAN
Korea Astronomy Observatory

(Received: November 21, 2003; Accepted: December 22, 2003)

ABSTRACT

The characteristics of the BOES (Bohyunsan Observatory Echelle Spectrograph) CCD camera is presented. In order to get optimum gain and readout noise of the CCD, we examine the variation of the gain and readout noise by changing the value of output drain voltage of the CCD and measuring the gain using transfer curve, which is defined as the plot of variance versus mean exposure level of a homogeneous light onto the CCD surface. The gain and readout noises are optimised to be $0.5e^-/ADU$ and $3e^-$, which is good for highest signal-to-noise ratio and contrast for the low light level characteristics of the BOES. We also measure the dark count of the CCD by getting five dark images with 3600 seconds exposure time. The mean dark count from median stacked dark images is essentially zero. A table of positions of defected pixels is also presented.

Keywords: instruments, CCD, telescope

1. 서론

BOES CCD 카메라는 보현산천문대의 새로운 고분산 에셀 분광기에 설치되어 고분산의 스펙트럼 영상을 기록하는 전용 카메라이다. 이 카메라의 구성에 대한 상세한 내용은 박병곤 등(2003)에 잘 정리되어 있다.

BOES CCD 카메라는 BOES에서만 사용할 수 있는 전용 카메라이므로 보통의 천체 영상 관측용 CCD 카메라와는 다른 특징들이 있다. 예를 들면 망원경과 따로 떨어진 분광실에 설치되므로 카메라 본체에 장치하는 액체 질소 듀어 대신 연속 공급형 냉각장치를 채택하여 대형 액체 질소 탱크에 연결하여 사용한다. 따라서 한 장소에서 다른 곳으로 이동하기가 쉽지 않다. 또 분광기 광학계의 일부로 작동하기 때문에 카메라 앞면에 평면 윈도우 대신 렌즈를 장착하고 있어서 망원경에 직접 부착한다 하더라도 영상의 초점이 맺히지 않는다.

BOES CCD 카메라는 분광 전용의 카메라이므로 CCD의 반응 특성 역시 범용의 CCD 카메라와는 달리 분광기를 거친 광원의 특성에 맞도록 설정할 필요가 있다. 즉, 분광기는 많은 광학계를 거치기 때문에 밝은 천체라 하더라도 최종 수광기에 도달하는 빛은 매우 어둡다. 특히 BOES의 경우 짧은 파장 영역의 분광선을 제대로 식별하기 위해서는 CCD의 이득값을 낮추어 주어 약한 빛에도 큰 값의 영상을 얻을 수 있도록 조절하여야 한다. 또한 대부분의 관측이 긴 노출시간을 필요로 하므로 낮은 암잡음은 필

수적이다. 암잡음의 경우 조절 가능한 CCD의 특성이 아니지만 그 특성을 정확히 파악하는 일은 매우 중요하다.

본 연구에서는 BOES CCD의 이득값과 읽기 잡음을 조정하여 BOES 고분산 분광관측에 적합하도록 조절하였으며 최종적인 이득값과 읽기 잡음을 제시하였다. 그리고 BOES CCD의 암잡음을 측정하여 관측자들이 비교 자료로 활용할 수 있도록 하였고, 손상된 픽셀의 위치를 파악하여 자료 분석에 활용할 수 있도록 하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 BOES CCD의 이득값과 읽기 잡음을 결정하는 방법과 그 과정을 기술하였고 3장에서는 암잡음 측정과 손상된 픽셀 위치의 파악에 대하여 다루었다. 마지막으로 4장은 연구 결과에 대한 요약과 결론을 정리하였다.

2. 이득값과 읽기 잡음

주어진 CCD 소자의 고유 이득값은 CCD 소자 자체에 있는 출력 앰프의 이득값에 의하여 결정된다. 이것은 출력 앰프에서 하나의 전자가 생성하는 전압의 크기를 말한다. 그러나 관측자의 관점에서 볼 때 이득값은 CCD 소자 고유의 이득값만이 아니라 CCD 제어기의 특성도 포함하여야 한다. 즉, 전압 대신 아날로그 디지털 변환기(ADC)에 의하여 변환되어 나오는 숫자로 영상의 밝기를 표현하기 때문에 천문학에서는 CCD의 이득값을 숫자 1에 해당하는 전자의 개수로 표현하는 것이 일반적이다.

이 이득값을 구하는 방법은 크게 두가지로 나눌 수 있는데 첫번째 방법은 에너지를 정확히 알고 있는 광자, 즉 ^{55}Fe 방사성 원소와 같은 방사선 생성 물질을 이용하여 측정하는 방법이다. 이 방법을 이용하면 이득값과 읽기 잡음 뿐 아니라 전하 전달 효율도 측정할 수 있다. ^{55}Fe 에서 방출되는 X선을 이용한 CCD의 이득값과 읽기 잡음 측정에 대해서는 박병곤 등(2001)에 자세히 기술되어 있다. 두번째 방법은 공간적으로 균일한 광원을 이용하는 방법이다. 이 방법은 사용하는 광원이 시간적으로도 균일한 경우에는 CCD의 선형도를 측정할 수 있으나 장시간 밝기를 균일하게 유지하려면 특별한 광원 장치를 사용하여야 하므로 쉽게 측정하기 힘들다.

보현산천문대에서는 영상관측용 카메라의 이득값과 읽기 잡음, 전하 전달 효율 등을 측정하기 위하여 X선원을 사용하였다(박병곤 등 2001). 그러나 이 X선원의 반감기가 몇번 경과하면서 출력 강도가 지나치게 약해져서 사용할 수 없게 되었다. 따라서 BOES CCD의 이득값과 읽기 잡음을 결정하는 데에는 균일한 광원을 사용하였다.

2.1. 전달 곡선

전달 곡선은 균일한 광원에 의하여 만들어진 영상의 평균값과 분산을 그래프로 나타낸 것으로 CCD의 이득값(gain)을 구하는 데에 이용된다. 전달곡선의 정의는 다음과 같다.

포화되지 않은 CCD 영상에서 읽어낸 광전자 분포의 총 잡음은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\sigma_e^2 = \sigma_p^2 + \sigma_{ron}^2 \quad (1)$$

여기서 σ_e 는 읽어낸 CCD 영상의 총잡음을 전자 갯수의 단위로 나타낸 것이며 σ_p 는 입사광의 광잡음, 그리고 σ_{ron} 은 CCD를 읽어내는 과정에서 발생하는 읽기 잡음으로 전자 갯수의 단위이다.

입사광의 광자 분포가 포아송 분포를 따르는 경우 σ_p^2 는 입사광의 세기(= I_p)와 같다. 가시광선과 같은 저에너지 광자의 경우 CCD의 실리콘에서 발생하는 광전자와 입사된 광자 사이에는 1:1의 관계가 있으므로 입사광의 세기는 전자 갯수의 단위로 표현하여도 무방하다. 즉, $I_p = I_e$ 이다. 여기서 CCD의 이득값을 g ($\equiv e^-/ADU$)라고 하면, ADU 단위로 표시되는 입사광의 세기 I_A 와 I_e 사이에는,

$$I_e = gI_A \quad (2)$$

의 관계가 성립하며, ADU 단위의 총잡음과 전자 갯수 단위의 총잡음 사이에도,

$$\sigma_{ron} = g\sigma_A \quad (3)$$

의 관계가 성립한다. 식 (2)와 (3)으로부터 식 (1)은,

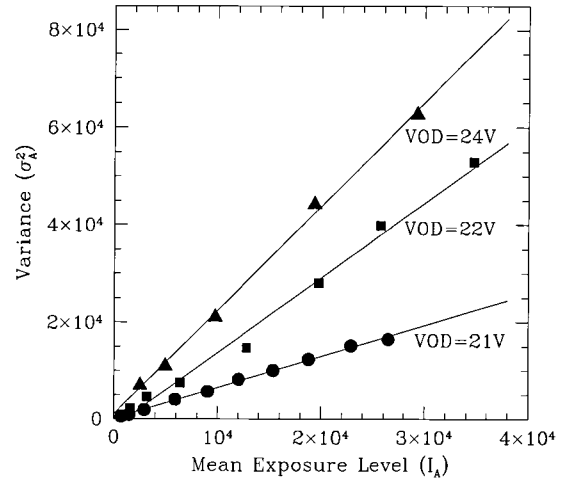


그림 1.— 출력 드레인 전압을 변화시키며 얻은 전하 전달 곡선. 선형 회귀 분석으로부터 얻은 이득값과 읽기 잡음은 표 1에 정리하였다. 자료는 2003년 4월 16일 얻은 것이다.

$$g^2\sigma_A^2 = gI_A + \sigma_{ron}^2 \quad (4)$$

가 되며, 식 (4)의 양변을 g^2 로 나누면,

$$\sigma_A^2 = \frac{1}{g}I_A + \left(\frac{\sigma_{ron}}{g}\right)^2 \quad (5)$$

이 된다.

따라서 측정된 영상으로부터 픽셀값의 평균을 가로축에, 분산을 세로축에 나타낸 그림에서 기울기는 이득값의 역수가 되고 세로축과 만나는 점은 읽기 잡음을 이득값으로 나눈 값의 제곱이 된다. 이 때 가로축에 밝기의 평균값, 세로축에 분산을 나타낸 그래프를 전달 곡선 (transfer curve)라 한다. 이 전달 곡선은 저조도나 평균 광량의 영상에 대해서는 평균값과 분산이 비례하는 직선으로 나타난다. 그러나 광량이 지나치게 많아서 CCD가 포화 상태가 되면 평균값이 증가하더라도 분산이 줄어들게 되어 곡선이 되므로 CCD의 반응 영역을 판단하는 기준이 될 수 있다.

2.2. 이득값의 결정

CCD의 이득값은 출력 암프에 직접 연결되는 출력 드레인 전압에 따라 변한다. BOES CCD의 경우 제작사에서 제시하는 CCD 44-82의 적정 출력 드레인 전압(VOD)은 30V이다. 그러나 제어기의 전압 한계에 맞추기 위하여 전체 전압을 -6V 낮추었기 때문에(박병곤 등 2003) 실제 인가한 전압을 기준으로 할 때 적정 전압은 24V이다.

적정 이득값의 결정을 위하여 출력 드레인 전압의 값을 21V, 22V, 24V로 바꾸어 가면서 전달 곡선을 구하였다. 이 때 사용한 광원은 밝기가 안정되는 발광 다이오드를 이

표 1.— 출력 드레인 전압에 따른 이득값과 읽기 잡음

전압(V)	이득값(e^-/ADU)	읽기 잡음(e^-)
21	1.6	10
22	0.7	6
24	0.5	4

용하였으며 공간적 균일성을 얻기 위하여 분광기 카메라 앞에서 초점이 맞지 않도록 거리를 조정하여 설치하였다. 이때 균일한 영역은 전체 CCD 면적의 일부분이므로 CCD 화면 가운데의 균일한 부분을 따로 떼어 부분 영상의 통계 자료를 사용하였다. 발광 다이오드의 경우 인가하는 직류 전원의 전압이 장시간 안정되기를 기대할 수 없기 때문에 선형성 평가 자료로 사용하기에는 부적합하다.

그림 1과 표 1은 출력 드레인 전압을 변화시키며 얻은 전달 곡선으로부터 얻은 이득값과 읽기 잡음의 변화를 나타낸 것이다. 이 실험은 2003년 4월 16일 BOES CCD 카메라가 분광실에 설치된 상태에서 분광기 카메라의 대물렌즈 부근에 발광 다이오드와 간유리를 설치하여 얻은 실험 결과이다. 출력 드레인 전압의 증가에 따라 읽기 잡음이 감소하는 양상을 보인다. 이것은 보현산천문대의 2k CCD 카메라에 대한 실험 결과 (박병곤 등 (2001)의 표 2)와 같은 결과이다.

서론에서 밝힌 바와 같이 BOES의 경우 광량이 적고 미세한 분광선의 변화를 감지하여야 하기 때문에 입사광의 밝기에 보다 민감하게 반응하는 것이 바람직하다. 또한 약한 광량을 측정하여야 하므로 읽기 잡음 역시 작은 값이어야 한다. 따라서 그림 1과 표 1로부터 이득값 $0.5e^-/ADU$, 읽기 잡음 $4e^-$ 인 VOD=24V를 선택하였다.

그림 1의 전달 곡선은 전체적인 자료의 분포는 선형이지만 몇 개의 측정치가 선형에서 벗어나 있어서 그리 정밀한 측정이라고 볼 수 없다. 이것은 측정에 사용한 발광 다이오드의 영상이 충분히 균일하지 않기 때문에 생긴 현상으로, 표 1의 이득값과 읽기 잡음은 확정적인 값이라기보다는 근사치에 가까운 값으로 생각할 수 있다.

일단 출력 드레인 전압을 결정한 후 보다 정밀한 전달 곡선으로부터 이득값과 읽기 잡음을 측정하기 위하여 광원을 바꾸었다. 즉, 두번째 실험은 전압을 바꾸어가며 이득값을 결정 한 첫번째 실험과 달리 이미 결정 한 이득값을 보다 정밀하게 측정하기 위한 목적에서 실시한 것이다. 발광 다이오드의 단점을 극복하기 위하여 BOES에서 사용하는 가장 굵은 광섬유인 지름 $300\mu m$ 의 광섬유를 이용하였다. 광섬유의 초점을 일부러 흐리게 만들고 광섬유의 인입구로 분광기의 비교 광원을 입사하였다. 이 실험은 2003년 11월 6일 실시하였다. 그림 2의 전달 곡선에서 알 수 있듯이 광섬유를 이용했음에도 불구하고 발광 다이오드를 사용했을 때보다 눈에 띄는 개선이 이루어지지 않았음을 알 수 있다. 다만 이 날의 실험 결과는 현재 설정된 이득값과 읽기 잡

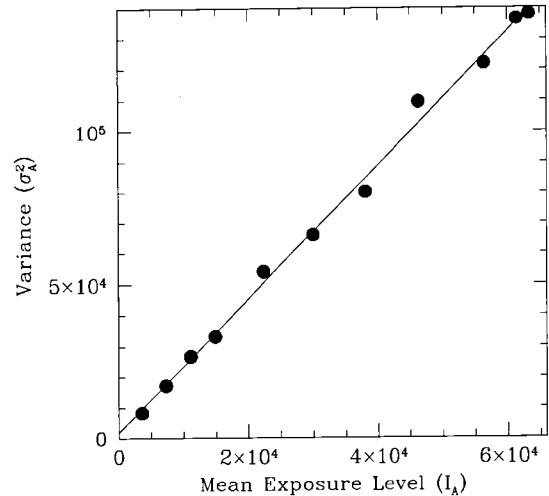


그림 2.— BOES CCD의 최종 전달 곡선. 이 자료는 2003년 11월 6일의 실험으로 얻은 것이다.

음을 다시 확인했다는 데에 의의가 있다고 할 것이다. 그림 2의 전달 곡선으로부터 얻은 BOES CCD의 이득값은 $0.46e^-/ADU$ 이며, 이 때의 읽기 잡음은 평균 5.4 ADU였으므로 약 $2.5e^-$ 이다. 그러나 읽기 잡음은 관측 당시의 환경에 따라 달라질 수 있으므로 이 논문에서 제시하는 값은 단지 참고 자료로 이용할 수 있을 뿐이다. 또 CCD의 이득값은 일반적으로 소수점 첫째자리까지 사용하므로 BOES CCD 카메라의 이득값은 약 $0.5e^-/ADU$, 읽기잡음은 약 $3e^-$ 로 보는 것이 타당하다.

한편 BOES CCD의 제어기인 SDSU Gen-I CCD 제어기는 제어기 내부의 소프트웨어 스위치에 의하여 이득값을 두 배로 변화시킬 수 있다. 즉, 선택 가능한 이득값은 $0.5e^-/ADU$ 와 $1.0e^-/ADU$ 의 두 가지가 되며 이 두 경우에 실제로 바이어스 전압이 바뀌는 것은 아니기 때문에 읽기 잡음은 모두 같은 값인 $3e^-$ 이 된다.

3. 암잡음과 손상된 픽셀

3.1. 암잡음

BOES는 1.8m 망원경에서 집광된 빛이 광섬유와 BOES의 다양한 광학계를 거치면서 많은 손실을 겪기 때문에 최종적으로 CCD 카메라에 입사되는 빛의 세기는 매우 약하다. 따라서 충분한 신호대 잡음비를 얻기 위하여 대부분의 관측에서 긴 노출 시간을 사용하게 된다. 노출 시간이 긴 관측에서는 CCD 자체의 열전자 방출이 있을 경우 노출 시간에 비례하는 체계적 잡음을 유발하게 된다. 즉, 열전자는 그 자체가 잡음이므로 CCD를 충분히 저온으로 생각하여 열전자 발생을 최소한으로 억제하여야 한다. 하지만 통계적으로 의미있을 만큼 많은 열전자 방출이 있을 경우 반드시 이를 보정해 주기 위하여 긴 노출 시간의 암화면을 할

표 2.— BOES CCD 카메라의 손상 픽셀 정보. x_1 과 x_2 는 가로축의 시작점과 끝점이며 y_1 과 y_2 는 세로축에 대한 것이다. Type에서 괄호속의 숫자는 해당 픽셀의 갯수이다 (-100°C 에서 측정).

Type	x_1	x_2	y_1	y_2
point	772	772	1928	1928
point	1728	1728	133	133
point	1970	1970	3557	3557
group(2)	427	427	328	329
group(3)	483	483	150	152
column(68)	1912	1912	3599	3666
column(547)	1969	1969	3556	4102

영해 두어야 한다. 한편 긴 노출의 영상에 대하여 열전자와 비슷한 영향을 미칠 수 있는 요인으로 분광실 내의 약한 산란광을 들 수 있다. 산란광에 의한 잡음은 열전자처럼 체계적이지 않으므로 훨씬 보정하기가 어렵다. 따라서 분광실내의 산란광은 철저히 제거하여야 한다.

BOES CCD의 암잡음 측정을 위하여 2003년 11월 18일 3600초 노출의 암화면 다섯 장과 바이어스 화면 다섯 장을 얻었다. 이 때 CCD의 온도는 -97°C 로 자료를 얻는 동안 일정하였다. 자료의 분석은 IRAF의 CCDRED 패키지를 이용하였으며 오버스캔 보정과 영점 보정을 실시한 다음 암화면 영상의 중간값과 표준 편차를 계산하였다. 평균 바이어스값은 약 902 ADU 정도였으며 표준 편차, 즉 읽기잡음은 약 6ADU였다. 암화면 영상의 표준값을 계산할 때에는 매우 많은 우주선을 제외하기 위하여 영점 보정된 영상 다섯장의 중간값을 취하여 합친 영상을 만든 후, 이 영상의 중간값과 표준 편차를 구하였다. 그 결과 합쳐진 암화면의 평균값은 $-0.9 \pm 4.1\text{ADU}$ 를 구할 수 있었다. 통계 처리 과정의 오차를 감안한다면 한 시간의 노출시간동안 누적된 열전자의 갯수는 거의 없음을 알 수 있다. 참고로 BOES CCD 카메라에 부착된 CCD 44-82의 제작사 시험 자료에 따르면 암잡음의 양은 -85°C 에서 $0.394e^-/\text{pix}/\text{hr}$ 로서 본 실험 결과와 부합한다. 따라서 충분히 냉각된 상태의 BOES CCD에서는 열전자가 거의 방출되지 않으며 분광실 안의 산란광원도 없음을 확인하였다.

3.2. 손상된 픽셀

CCD 소자의 손상된 픽셀은 여러 종류로 나눌 수 있다. 예를 들면 아예 빛에 반응하지 않으면서 검게 나타나는 픽셀이 있고, 반대로 빛을 받지 않더라도 늘 포화 상태인 픽셀도 있다. 한 개의 픽셀만 문제가 되는 경우도 있고, 그 픽셀로부터 한 줄이 모두 사용할 수 없는 경우도 있다. 손상된 픽셀에 담긴 정보는 쓸모없는 것이 되므로 자료 처리 과정에서 손상된 픽셀에 인접한 픽셀값을 이용하여 손상된 픽셀을 제거하여야 한다.

BOES CCD의 제작사 자료에 나오는 손상 픽셀(-85°C 에서 측정)은 박병곤 등(2003)의 표 2에 정리하였다. 그러나 제작사의 자료는 참고 자료로서의 의미는 있지만, 실제 활용할 때에는 손상된 픽셀의 위치 정보를 다시 자세히 작성하여야 할 필요가 있다. 따라서 바이어스 화면과 균일한 광원에 의한 영상으로부터 손상 픽셀 위치 정보를 확인하여 표 2에 정리하였다. 참고로 BOES CCD의 영상형식은 2200×4102 이다. 여기서 가로축 2200은 프리스캔 20픽셀과 영상 영역 2048 픽셀, 물리적 오버스캔 20픽셀과 소프트웨어적인 오버스캔 132 픽셀을 더한 값이며, 세로축 4102는 실제 CCD의 물리적 픽셀이지만 마지막 6 픽셀은 자료로서의 신뢰성이 떨어지므로 4096픽셀만 사용한다. 이 정보는 관측자가 분광 영상 자료를 처리하는 데에 유용하게 쓰일 수 있을 것이다.

4. 결론

보현산천문대 고분산 에셀 분광기 BOES에 부착된 CCD 카메라의 이득값 및 읽기 잡음을 결정하였다. 이득값과 읽기 잡음의 변화를 알아보기 위하여 균일한 광원으로부터 얻은 영상을 얻었으며, 이 영상의 평균값과 분산의 관계를 나타내는 전달 곡선을 이용하여 이득값을 계산하였다. CCD의 출력 드레인 전압을 21V, 22V, 24V로 변화시키면서 각 전압에 따른 이득값과 읽기 잡음을 구하여 서로 비교하였다. 본 연구의 결과 BOES 영상의 특성에 가장 맞는 이득값과 읽기 잡음으로 24V인 경우에 얻은 이득값 약 $0.5e^-/\text{ADU}$ 와 읽기잡음 약 $3e^-$ 를 결정하였다. BOES CCD 카메라는 소프트웨어에서 이득값을 두 배로 변화시킬 수 있기 때문에 선택할 수 있는 이득값은 $0.5e^-/\text{ADU}$ 와 $1.0e^-/\text{ADU}$ 의 두 가지 값이 된다. 두 경우 모두 읽기 잡음은 $3e^-$ 로 같다.

입사광의 세기가 약하므로 장시간 노출이 불가피한 BOES의 경우 암잡음은 매우 중요한 잡음 요소가 된다. -97°C 에서 얻은 다섯 장의 한시간 노출 암화면으로부터 구한 BOES CCD의 열전자 갯수는 무시할 만한 수준이었다. 따라서 충분히 냉각된 상태에서는 열전자의 방출이 거의 없으며 분광실내의 산란광도 없음을 알 수 있었다. 본 연구에서는 또 손상된 픽셀의 위치 정보도 함께 제시하여 관측자의 영상 분석에 도움이 되고자 하였다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 과학기술부 국책연구개발사업 “천체분광관측연구사업 (M1-0222-00-0005)”의 연구비 지원으로 이루어졌다.

본 연구에서 암잡음 측정을 위한 암화면을 얻어준 연세대학교 천문학과 변용익 교수 관측팀께 감사드립니다.

참고문헌

- 박병근, 천무영, 육인수, 성현철 2001, “보현산천문대 2K
CCD 카메라의 특성”, 천문학 논총 16, 31
박병근, 장정균, 성현철, 장비호, 김강민, 한인우 2003,
“BOES CCD 카메라 I. 카메라 구성”, 천문학 논총,
18, 69