

우즈베키스탄 Maidanak 천문대 Fairchild 486 CCD의 기본적인 특성
CHARACTERISTICS OF THE FAIRCHILD 486 CCD AT MAIDANAK ASTRONOMICAL
OBSERVATORY IN UZBEKISTAN

임범두¹, 성환경¹, R. Karimov², M. Ibrahimov²

¹세종대학교 천문우주학과, ²Ulugh Beg Astronomical Institute

BEOM-DU LIM¹, HWANKYUNG SUNG¹, R. KARIMOV², AND M. IBRAHIMOV²

¹ Department of Astronomy & Space Science, Sejong University, 98, Kunja-dong, Kwangjin-gu,
Seoul 143-747, Korea

² Ulugh Beg Astronomical Institute, 33 Astronomical Street, Tashkent 700052, Uzbekistan

E-mail: bdlim1210@empal.com

(Received May 18, 2008; Accepted April 24, 2008)

ABSTRACT

Understanding of the basic characteristics of an astronomical instrument is a prerequisite to obtaining reliable data from the instrument. We have analyzed more than 1,000 calibration images from the Fairchild 486 CCD (hereafter the Maidanak 4k CCD system) attached to the AZT-22 1.5m telescope at Maidanak Astronomical Observatory in Uzbekistan. The Maidanak 4k CCD system supports three readout modes through 1, 2, or 4 amplifiers. In most cases observers use 4-amplifier readout mode to save time.

We have tested the stability and seasonal variation of zero levels and confirm that two quadrants of the images (Amp 1 & 2) show no appreciable seasonal variation, but the other two quadrants (Amp 3 & Amp 4) show an evident seasonal variation in the bias level. The Cryo Tiger, the cooling system used at the Maidanak 4k CCD system, maintains the CCD temperature at -108°C, and effectively suppresses the dark electrons. The mean value versus the variance plot of the flat images does not show the expected relation for an ideal Poisson noise distribution and this is attributed to the large variation in quantum efficiency between different pixels. In addition, we confirm that there is no appreciable difference in gain between readout amplifiers, but there is a large variation in quantum efficiency across CCD chip especially in *U*. Due to the finite length of shutter opening and closing time, the effective exposure time varies across the science images. We introduce two parameters to quantify the effect of this uneven illumination and present a method to remove these effects. We also present a method to remove the interference patterns appearing in the images obtained with longer wavelength filters and investigate the spatial variation of the point spread function.

Key Words: CCD - Pre-processings, CCD - characteristics

1. 서 론

CCD (Charge-Coupled Device)는 1979년 천체관측에 처음 사용된 이후, 천체의 정보를 기록하는 가장 중요한 광 검출기로 확고한 위치를 구축하였다. CCD는 사진전관과 같이 2차원 영상관측을 수행할 뿐만 아니라 광증배관과 동일하게 광전효과를 이용하므로 입사광량에 비례하는 특성을 갖고 있다. 특히 CCD는 광증배관보다 매우 높은 양자효율을 가지고 있기 때문에 어두운 천체에 대한 관측에서 매우 유용하다.

CCD는 1970년 Bell 연구소에서 정보 기억 소자와

유사한 전자소자를 만드는 과정에서 처음 출현하였으며 (Boyle & Smith, 1970; Amelio, Tompsett, & Smith, 1970), 미국의 대표적인 제조회사인 RCA (현재의 SITE), Fairchild, Texas Instrument (TI)에 의해서 크게 발전하였다. 초기 CCD는 Surface - Channel 방식으로써 interface trap에 신호 전하가 포획되어 전하 전달 효율을 떨어뜨리거나, 밝은 천체를 관측할 때 잔존영상으로 남는다는 취약점이 있었다 (Jin 2005). 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 n형 불순물을 반도체의 표면에 첨가함으로써, 신호 전하가 표면에 포획

표 1. Fairchild 4k CCD의 사양

	Full Well Cap	Gain	Read out noise
Port 1	143 Ke ⁻	1.45e ⁻ /ADU	4.67e ⁻
Port 2	129 Ke ⁻	1.45e ⁻ /ADU	4.72e ⁻
Port 3	106 Ke ⁻	1.46e ⁻ /ADU	4.76e ⁻
Port 4	127 Ke ⁻	1.45e ⁻ /ADU	4.60e ⁻

되는 것을 방지하여 전하 전달 효율을 높이게 되었다.

Fairchild 사에서는 이러한 buried-channel 방식을 개발하는 데 선구자적인 역할을 했다. 반면 RCA 사에서는 양자효율을 높이기 위해서 후면 조사 (backside-illuminated) CCD를 개발하였다. 그러나 CCD의 기반이 surface-channel 방식을 채택하였기 때문에 위에서 언급한 단점으로 인해 Fairchild 사의 CCD보다 전하 전달 효율과 읽기 잡음이 좋지 못했다. 그 이후 Jet Propulsion Laboratory와 TI사의 협력에 의해, 후면 조사 방식, buried-channel, full frame 전달방식과 같은 CCD가 가질 수 있는 좋은 특징만을 조합함으로써, 현재 사용되는 과학용 고성능 CCD로 발전하는 계기가 되었다.

CCD를 사용하여 얻은 관측 자료는 천체의 신호뿐만 아니라 CCD 자체에서 발생하는 기기적인 특성도 함께 포함되어 있다. 따라서 천체의 신호만 검출하기 위해서 기기적인 효과를 제거하는 전처리 과정을 반드시 거쳐야 한다. 이 과정은 CCD가 가진 특성을 잘 이해해야 정밀한 보정이 이루어지며, 이는 곧 자료의 신뢰성으로 이어진다.

본 연구에서는 CCD를 과학적인 목적으로 사용하기 전에, CCD가 가지고 있는 기기적인 특성을 조사하였다. 우즈베키스탄 Maidanak 천문대 AZT-22 1.5m 망원경의 Fairchild 486 CCD 측광관측시스템은 2006년 7월에 장착되어 관측에 사용되고 있으며, 이 연구에서는 2006년 8월부터 약 1년간 관측에서 얻을 자료를 바탕으로 기기적 특성을 조사하였다. 분석에 사용한 자료는 영점 영상, 바닥고르기 영상, 암전자 영상, 셔터 효과 영상, 간섭무늬 영상으로 구성되어 있으며, 자료 분석에 사용한 도구는 IRAF/CCDRED이다. 각 영상에 대한 분석내용은 2장에 자세히 다루었다. 3장에서는 모든 분석에 대한 요약과 결론을 제시하였다.

2. Maidanak 천문대 관측 시스템

Maidanak 천문대에서 사용하고 있는 주된 관측 장

비는 AZT-22 1.5m ($f/7.74$) 망원경과 Fairchild사의 486 CCD이다. CCD 측광시스템은 서울대학교 천문우주학과에서 제공하였으며, 관측에 사용된 필터는 세종대학교 우주구조와 진화 연구센터 및 SDSS KSG (Korea Scientist Group)이 구입하였다. CCD 듀어와 냉각시스템을 제작한 Spectral instruments사에서 제공한 CCD 칩의 시험측정결과를 표 1에 제시하였다. 관측에는 Bessell (1990)이 설계한 $UBVRI$ 필터와 협대역 $H\alpha$ 필터 ($\lambda_0 = 6563 \text{ \AA}$, $\Delta\lambda = 50 \text{ \AA}$)를 사용하였다.

본 연구에서는 관측에서 얻은 여러 영상들을 사용하여 Maidanak 천문대 AZT-22 1.5m 망원경의 CCD 측광시스템 (이하 Maidanak 4k CCD라고 표시함)의 기기적 특성을 조사하였다. 이 조사를 위해 692장의 영점영상 (bias images = zero images), 92장의 암전자영상 (dark images) 및 357장의 바닥고르기영상 (flat images)을 사용하였으며, 셔터에 의한 불균일한 노출을 조사하기 위해 다양한 노출시간의 101장의 셔터영상을 사용하였다. 그리고 I 필터의 간섭무늬 영상을 얻기 위해 서울대학교 천문학과에서 황도북극을 관측한 긴 노출 I 필터 영상 718장을 사용하였다.

2.1 영점 영상

Maidanak 천문대 4k CCD는 사용의 필요에 따라서 1, 2, 4 개의 증폭기 (Amplifier, 이하 Amp)로 나누어서 사용할 수 있도록 설계되어 있으며, CCD 자료를 읽는 시간을 단축하기 위해 대부분의 관측에서는 4개의 Amp를 모두 사용한다. CCD 자료를 읽을 때 서로 다른 Amp를 사용하므로, CCD 영상의 각 사분면은 약간의 영점 차이를 보인다. 본 연구에서는 CCD 측광시스템이 설치된 2006년 7월 이후 약 1년간 얻었던 영점 영상을 조사하여, 시간에 따른 각 Amp의 영점변화를 조사하였다. 각 Amp의 영점의 평균값은 표 2에 제시하였다.

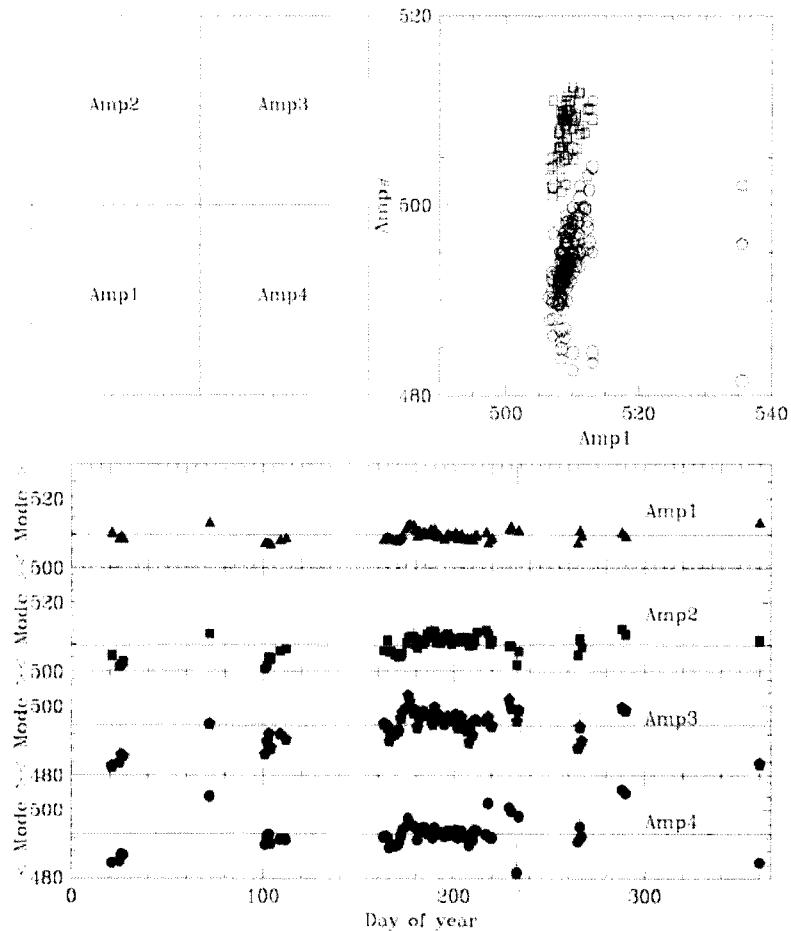


그림 1. Maidanak 4K CCD가 보이는 영점영상의 특징. 좌측 상단의 그림은 Amp의 번호를 제시했으며, 우측의 그림은 Amp 1번의 영점값에 대한 Amp #번 ($\# = 2, 3, 4$) 영점값의 분포를 보여주고 있다. 삼각형, 사각형, 오각형, 원형의 점은 각각 Amp 1, Amp 2, Amp 3, Amp 4를 나타낸다. 맨 아래 그래프는 각 Amp에 대한 시간에 따른 변화를 보여준다.

자료처리의 편의를 위해, 서로 다른 Amp로 읽은 CCD 영상의 각 사분면에 번호를 부여하였으며, 각 영역의 명칭은 그림 1의 왼쪽 상단에 제시하였다. (여기에서 사용하는 Amp의 번호와 표1의 Port 번호는 동일하지 않다.) 그림 1에서 볼 수 있듯이, Amp 1, 2와 3, 4번은 각각 비슷한 화소값을 가진다. 그림 1의 오른쪽 상단에는 Amp 1의 영점에 대한 다른 Amp의 영점을 비교한 것이며, 아래 4개의 그림은 계절에 따른 영점의 변화를 본 것이다. 1, 2에서는 시간에 따른 뚜렷한 변화를 볼 수 없는 반면, Amp 3과 4에서는 화소값의 최대와 최소의 차이가 각각의 표준편차의 4.6배와 5.7배로, 계절에 따라 변화한 것을 볼 수 있다. 계절에 따른 변화 이외에 주의해야 할 사항으로는 Maidanak 4k CCD는 초과읽기 (overscan) 영역을 지원하지 않기 때문에 시간에 따른 영점의 변화를 완벽하게 보정하지

못하므로, 관측 기간 동안 충분한 수의 영점 영상을 얻는 것이 중요하다. 또한 Amp 1번과 2번 사이, Amp 3번과 4번 사이에 기기적인 문제에 의해서 그림 2와 같이 화소값이 급격하게 증가하는 현상이 종종 발생한다. 이러한 현상은 *U* 필터와 같이 하늘의 밝기가 어둡게 측정되는 천체영상에서 두드러지게 나타나는 반면, 하늘이 밝은 다른 필터의 천체영상에서는 이러한 이상 신호가 묻혀버리기 때문에 구분하기가 어렵다. 이러한 이유로 인해 천체영상에서 발생하는 빈도를 추정하기는 쉽지 않다. 이 현상은 영점영상을 얻을 때에도 발생하는데, 천체영상과 같이 발생빈도는 불규칙하지만 영상을 얻을 때 쉽게 발견할 수 있으며, 한 번 발생하면 연속적으로 발생하는 특징이 있다. 따라서 관측을 수행할 때 주의가 필요하며, 영점 영상을 처리하기 전에 각각의 영점영상들을 확인할 필요가 있다.

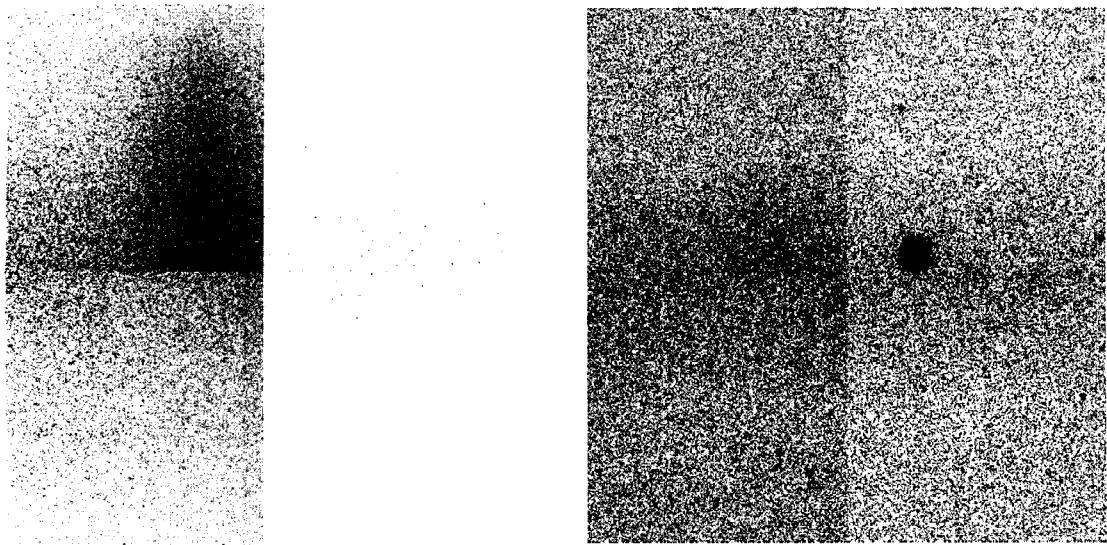


그림 2. 영점영상에서의 이상신호 (좌)와 천체영상에서의 이상신호 (우). 관측을 수행하는 도중에 네 개의 사분면이 만나는 경계면 부근에서 화소값이 갑자기 증가하는 현상이 발생한다.

표 2. 각 Amp의 영점 평균과 암전자 생성율

	영점영상		암전자 생성율
	평균	표준편차	평균
Amp1	509.64 ADU	3.51 ADU	$-0.03e^-/10\text{min}$
Amp2	507.81 ADU	2.83 ADU	$-0.12e^-/10\text{min}$
Amp3	494.54 ADU	4.46 ADU	$-1.17e^-/10\text{min}$
Amp4	493.05 ADU	4.30 ADU	$-0.39e^-/10\text{min}$

2.2 암전자영상

반도체는 상온에서 반도체 내 전자들의 열적운동에 의해 암전자 (dark electron)를 발생시킨다. 천문 관측에 사용하는 CCD 또한 예외일 수 없다. 천문 관측용 CCD의 경우, 관측 중 발생하는 암전자의 생성을 억제하기 위해 일반적으로 두 가지의 냉각방법을 사용하고 있다. 첫 번째는 액체 질소를 사용하여 -100°C 정도의 온도를 유지시킴으로써 암전자의 생성을 억제하는 방식이며, 두 번째로 특정 반도체에 열을 가하면 전기를 발생시키는 열전효과를 이용한 열전냉각 방식이 있다. 후자의 경우 무시하지 못할 정도의 암전자를 생성시키기도 한다. Maidanak 천문대의 4k CCD 측광계는 'Cryo Tiger'라는 Spectral Instruments 사의 독특한 냉각방식을 사용하고 있다. 이 냉각 방식은 특수한 압축기체를 순환시키는 방식으로 CCD를 -108°C 를 유지시켜 주므로 암전자의 생성을 효과적으로 막아줄 것으로 예상된다.

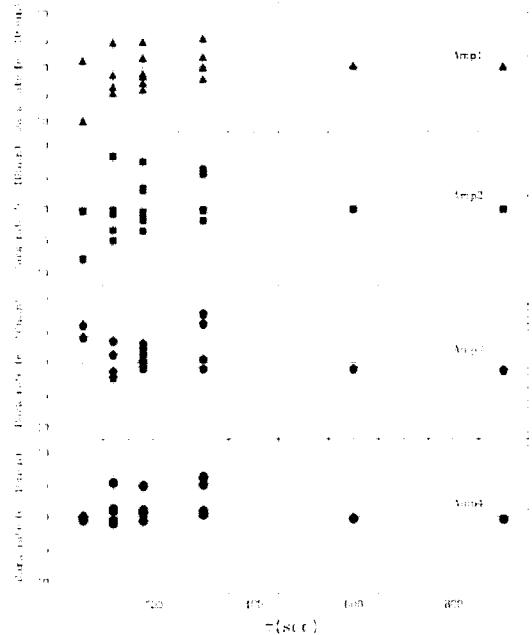
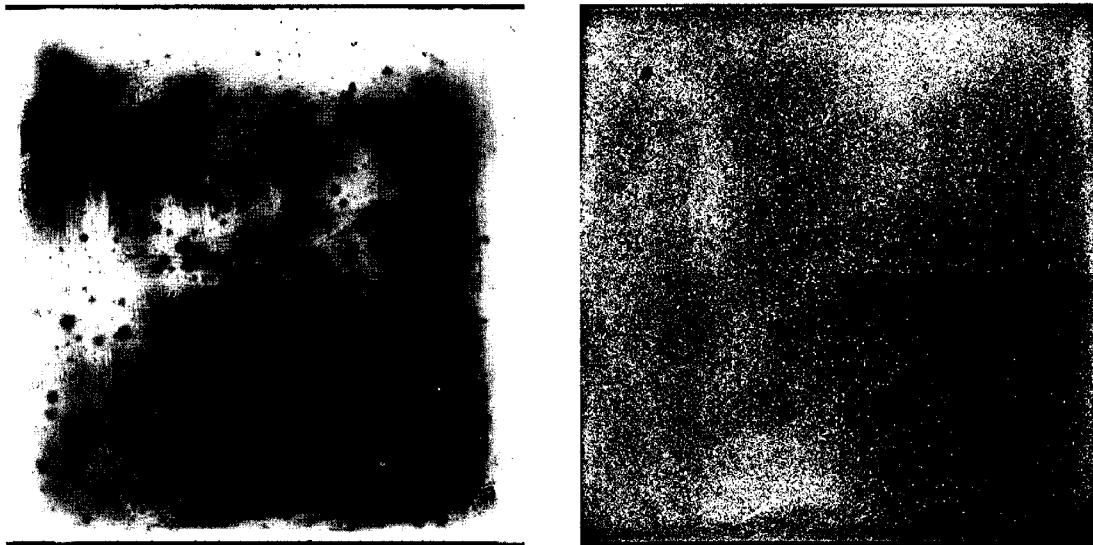


그림 3. 노출 시간별 암전자 생성율. 암전자 생성율은 읽기잡음에 비해 무시할 정도로 작다.

로 예상된다. 실제 관측기간 동안 얻은 암전자 영상을 각각 Amp 별 암전자 생성율을 계산하여 표 2에 제시하였다.

그림 2는 각 Amp별 노출시간에 따른 암전자 생성율을 제시한 것이다. 노출시간이 짧을수록 암전자의 생

그림 4. *U* 필터의 바닥고르기영상 (좌), *I* 필터의 바닥고르기영상 (우).

성율이 상대적으로 높으며, 같은 노출시간 내에서 큰 분산을 보인다. 이는 짧은 노출시간에 비해 상대적으로 큰 읽기잡음과 초과읽기영역이 없어 완벽하게 보정을 할 수 없는 영점의 변동에 의한 영향으로, 실제 암전자 생성율은 무시할 수 있을 정도로 낮을 것으로 추정이 된다. 이러한 효과는 노출시간이 길수록 암전자 생성율이 “0”에 가까워지는 현상으로 확인할 수 있다. CCD로 얻은 대부분의 관측자료의 경우 암전자 생성율을 보정할 필요가 없음을 나타낸다.

2.3 바닥고르기 영상

CCD칩의 화소는 마치 하나의 광증배관과 같은 역할을 하므로, 모든 화소가 동일한 양자효율을 보이지는 않는다. 따라서 관측기간 동안 저녁 및 새벽의 박명하늘과 같은 비교적 균일한 광원을 관측하여 각 화소의 양자효율 차이를 보정하여야 한다. 그림 4는 *U* 필터와 *I* 필터의 바닥고르기 영상이다. *I* 필터의 경우 전체적으로 균일한 양자효율을 갖지만 *U* 필터의 경우 위치에 따른 양자효율의 차이가 매우 크게 나타났다. 관측기간 동안 얻은 영상을 통해서 CCD의 선형도 조사 및 Amp 사이의 양자효율의 차이를 조사하였다.

2.3.1 선형도 조사

광자는 Poisson 통계를 따르므로, 광전효과를 이용하여 광량을 측정하는 CCD자료의 잡음도 이상적으로는 Poisson 분포를 따를 것으로 예상할 수 있다. 따라서 균일한 광원에 노출을 준 바닥고르기영상의 경우, 양자효율의 차이가 없다면 표준편차가 신호의 제곱근에

비례하는 형태가 될 것이다. 즉, 식 (1)과 같이 표현할 수 있으며 (Massey & Jacoby, 1992), 잡음 (표준편차)의 로그값과 평균값의 로그값은 1/2의 기울기를 가져야한다.

$$\sigma_{ADU} = \frac{\sqrt{F_{ADU} \times gain}}{gain} \quad (1)$$

CCD의 선형도를 조사하기 위해서는 별이 없고, 균일한 광원을 관측한 바닥고르기 영상을 조사해야 한다. 또한 양자효율의 차이에 의한 효과를 최소화하기 위해 바닥고르기영상의 공간적인변화가 적은 영역을 선정하여야만 하지만 통계적으로 의미가 있는 화소수를 포함하여야 한다. 본 연구에서는 바닥고르기영상의 각 Amp에서 비교적 편평한 $100pix \times 100pix$ 영역을 선정하고, 각 영역에서 별상이나 우주선 현상의 유무를 조사한 후, 바닥고르기영상의 평균과 표준편차를 얻었다. 모든 바닥고르기영상에서 각 Amp와 필터별로 통계조사를 수행한 결과를 그림 5에 제시하였다. 그리고 Amp 1의 그림에는 Spectral Instruments 사에서 Port 1에 대해 시험 측정한 결과 그림을 바탕으로 얻은 평균과 표준편차의 관계이다. test 1은 Gain 값이 $5.38e^-/ADU$ 일 때 발생한 전하의 평균값과 분산을 그림에서 직접 측정하여 얻은 결과이다. test 2 또한 비슷한 방법으로 Gain과 읽기잡음의 값을 변화해가며 얻은 시험결과 중에서 현재의 설정 환경과 동일한 Gain 값이 $1.45e^-/ADU$ 일 때의 화소값과 편차를 그림에서 측정하여 얻은 결과이다.

그림 5에서 볼 수 있는 바와 같이 모든 Amp와 필터에서 평균과 표준편차는 이상적인 기울기인 1/2보다

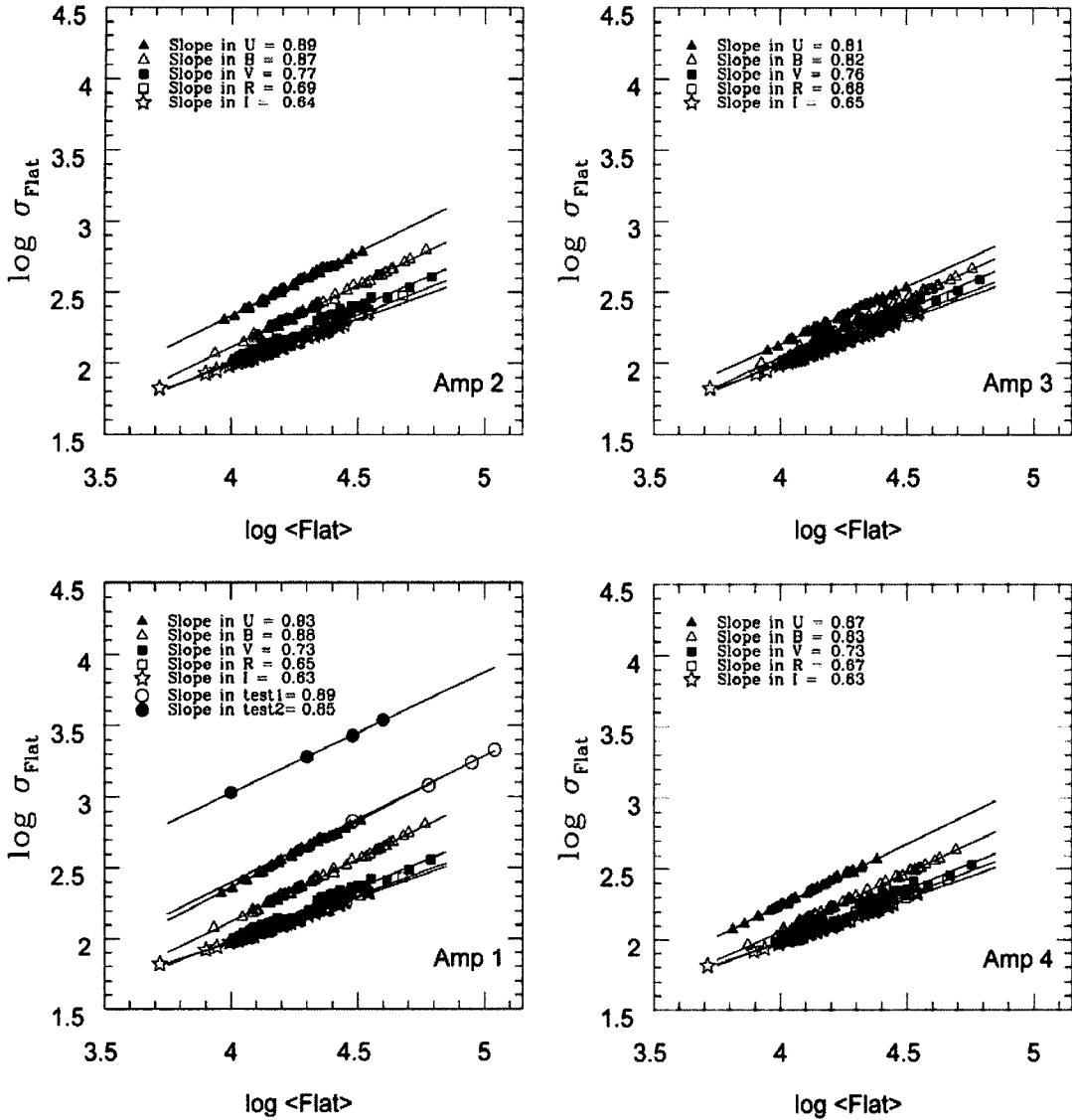


그림 5. 박명하들의 바닥고르기 영상을 사용한 각 Amp에 따른 선형도 조사. 닫힌 삼각형, 열린 삼각형, 닫힌 사각형, 열린 사각형, 별 모양의 점은 각각 U 필터, B 필터, V 필터, R 필터, I 필터에 해당한다. Amp 1에서 닫힌 원과 열린 원은 Spectral Instruments사에서 Port 1에 대한 실험결과이다. test 1은 Gain 값이 $5.38e^-/\text{ADU}$ 인 경우이며, test 2는 Gain 값이 $1.45e^-/\text{ADU}$ 인 경우이다.

매우 큰 값을 보인다. 이러한 현상은 Spectral Instruments 사의 자체 실험결과에서도 볼 수 있다. 그리고 파장이 짧을수록 기울기가 증가하는 현상을 보이지만, Amp에 따른 기울기의 뚜렷한 차이는 보이지 않는다. 다른 천문관측용 CCD에서도 동일한 현상이 나타나는지를 보기 위해 호주 Siding Spring 천문대 (SSO) 1m 망원경에서 1996년부터 2001년까지 사용한 SITe 2048 × 2048 CCD (SSO 2k CCD)의 바닥고르기

영상을 조사하여, 그 결과를 그림 6에 제시하였다. SSO 2k CCD의 경우에도 이상적인 기울기인 1/2에서 벗어난 0.62~0.65의 값을 보인다.

I 필터의 경우 두 개의 계열이 존재하는데, 선형회귀선을 기준으로 아래 존재하는 계열은 1997년도 자료이며, 위에 존재하는 계열은 2000년도 자료이다. 이러한 차이를 보이는 이유는 2000년도 자료의 경우 광학계의 영향을 받았기 때문이다.

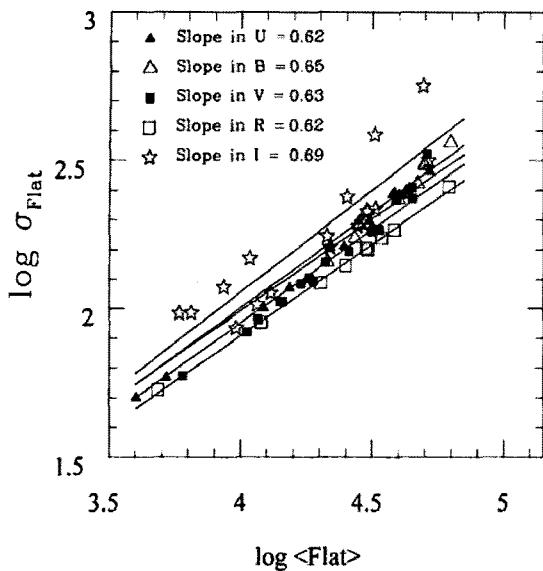


그림 6. Siding Spring 천문대 SITe 2k CCD의 선형도. 각 점에 대한 설명은 그림 5와 동일하다.

SSO 2k CCD의 경우에는 대부분의 필터에서 유사한 기울기를 보이는 반면, Maidanak 4k CCD의 경우 필터에 따라 다른 기울기를 갖고 있으며, 그림 5를 보면 U 필터의 경우 양자효율의 차이가 매우 큼을 볼 수 있다. 따라서 바닥고르기영상의 화소의 평균값과 표준 편차의 관계가 이상적인 기울기인 $1/2$ 에서 벗어나는 정도는 각 화소들의 양자효율의 차이에 의해 결정되었다고 추정할 수 있다.

2.3.2 Amp에 따른 양자효율의 차이

영점의 차이 및 암전자의 효과를 제거한 바닥고르기영상은 양자효율 및 Gain (이득)의 차이에 의해 화소 값의 차이가 발생한다. 양자효율 또는 Gain의 차이를 조사하기 위해 상대적인 편평도 (flatness - 성환경 1995)를 조사하였다. 편평도는 각 Amp의 최빈값 (mode value)을 Amp 1의 최빈값으로 나눈 값으로 정의하였다.

$$f_{\text{flat}}^i \equiv \frac{F_{\text{mode}}^{\text{Amp } i}}{F_{\text{mode}}^{\text{Amp } 1}}, \quad i = 2, 3, 4 \quad (2)$$

각 Amp별, 각 필터별 편평도를 그림 7에 제시하였다. I 필터 (별 모양의 점)의 경우 Amp에 따른 차이가 거의 나타나지 않았다. 그러나 U 필터의 경우, 주어진 Amp에서도 매우 큰 차이를 보일 뿐만 아니라 Amp에 따른 차이도 매우 크게 나타났다 ($f_{\text{flat}}(U) = 0.75 \sim 1.62$).

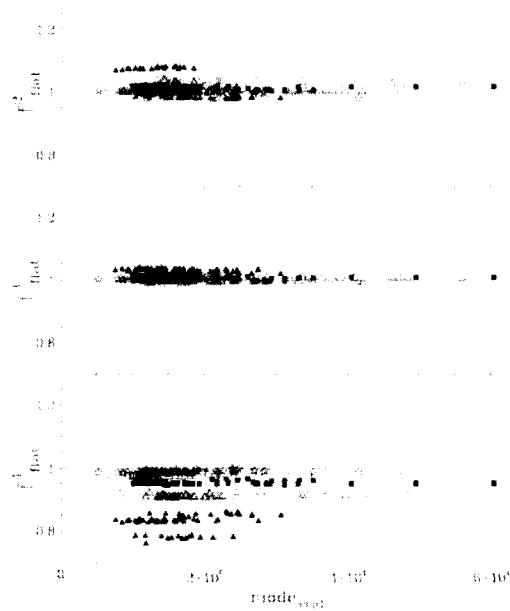


그림 7. Amp 1번에 대한 다른 Amp의 양자효율 차이 또는 Gain의 차이. Amp 4번에서 가장 큰 차이를 보이며, 필터에 따른 차이도 뚜렷하다. Amp에 따른 차이는 I 필터에서 가장 적으며, U 필터에서 가장 크다. 각 점에 대한 설명은 그림 5와 동일하다.

1.07). 이와 같이 필터에 따른 차이는 두드러지게 보이지만 Amp에 따른 차이는 거의 볼 수 없다는 것은 Spectral Instruments 사의 실험결과에서 제시된 바와 같이 각 Amp의 Gain은 거의 차이가 없음을 나타낸다. 그러나 U 필터에서의 큰 차이는 그림 5에서 볼 수 있는 바와 같이 U 필터의 양자효율의 차이가 매우 큼을 나타내는 것이다. 또한 Amp 4번에서 3개의 계열로 나뉘는데, I 필터와 같은 선상에 있는 점은 필터 훨의 기기적인 문제로 인해 명령한 U 필터가 아닌 I 필터로 관측을 수행한 결과로, 모든 Amp에서 나타난다. 나머지 두 계열은 서로 다른 관측기간에 얻은 자료에서의 차이를 보이고 있다. 대부분의 관측기간 동안 얻은 자료는 $f_{\text{flat}}(U) = 0.82 \sim 0.85$ 이지만, 2006년 9월에 관측한 자료에서는 $0.77 \sim 0.78$ 이 많았고, 일부는 0.84를 보였다. 2007년 1월 25일과 27일의 자료 중 한 영상씩은 각각 0.76, 1.62와 같은 이상한 수치를 보였다. 이러한 현상은 특히 U 필터로 관측한 자료에서 Amp 4번이 다른 Amp에 비해 불안정하다고 추정할 수 있다.

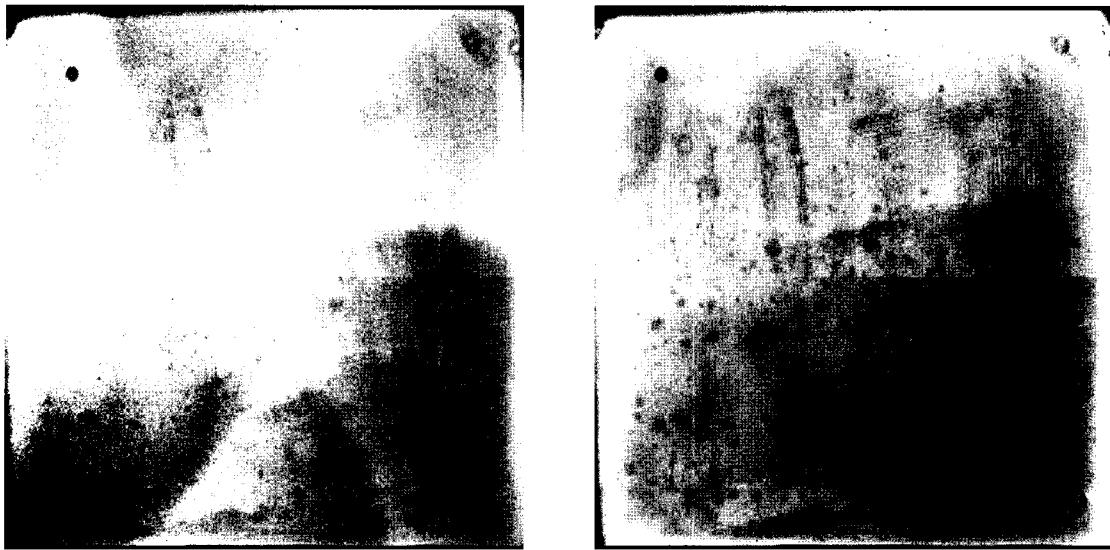


그림 8. 노출시간 1초인 영상에 대한 셔터효과 (좌)와 보정 후 (우)의 모습.

2.4 노출시간의 공간적 차이

Maidanak 4k CCD는 넓은 시야를 관측할 수 있지만, 조리개식의 셔터가 장착되어 있고, 셔터의 열고 닫는 시간이 유한하여, 광원에 노출되는 부분의 유효노출시간이 공간적으로 달라질 수 있다. 만일 셔터를 여닫는 시간이 노출시간에 비해 무시할 수 없을 때, 이 효과를 보정해 주어야만 정밀한 측광을 수행할 수 있다. 셔터에 의한 효과는 두 가지로 나타날 수 있다. 첫 번째는 실제 노출시간이 명령한 노출시간과 다른 경우가 있을 수 있으며, 두 번째는 공간적으로 노출시간이 균일하지 않은 경우이다. 이를 두 가지 효과를 규정하는 인자로 Δ_τ , σ_τ 를 다음과 같이 정의한다. 셔터의 효과는 필터의 영향을 받지는 않지만 동일 필터를 사용하여야 하며, 광원의 밝기가 변하지 않아야 한다. 영점과 임전자 효과를 보정한 영상을 서로 나누면 양자효율의 차이도 제거 된다.

$$\Delta_\tau \equiv mode\left[\frac{F_{mode}(\tau)}{F_{mode}(\tau=20s)} \cdot \frac{20s}{\tau}\right] - 1 \quad (3)$$

위의 인자는 실제 노출시간과 명령한 노출시간의 차이를 나타내는 인자로, 동일한 조건의 대상에 대해 서로 다른 노출시간을 준 영상을 나누고 노출시간의 차이를 곱한 영상의 최빈값 (mode)이 1에서 벗어난 정도를 나타낸다. 이상적인 경우 $\Delta_\tau = 0$ 이다. 노출시간이 20초인 경우에는 실제 노출시간과 명령한 노출시간의 차이가 없으며, 공간적 차이도 무시할 수 있다고 가정하였다.

$$\sigma_\tau(\%) \equiv \frac{\max - \min}{mode} \times 100 \quad (4)$$

σ_τ 는 CCD의 표면에 빛이 얼마나 균일하게 입사하였는지를 나타내는 인자로, 화소값 분포 (이상적인 경우에는 가우스 함수 형태로 분포하지만, 실제 영상의 경우 가우스 함수의 형태에서 벗어난다.)에서 최대값과 최소값의 차이를 최빈값으로 나눈 값이다. 만일 셔터에 의한 효과가 없다면 긴 노출을 준 영상이나 짧은 노출을 준 영상 모두 동일한 값을 갖게 될 것이다.

명령한 노출시간에 따른 위의 두 인자들의 변화를 그림 8에 제시하였다. 노출시간이 10초 이하인 경우에는 실제 노출시간이 체계적으로 짧게 나타났다. 입력한 노출시간이 1초인 경우 실제 노출시간은 0.78초 정도가 됨을 나타낸다. 그림 8의 하단에는 노출시간에 따른 σ_τ 의 변화를 본 것으로, 노출시간이 10초 이하인 경우 셔터에 의해 발생한 노출시간의 공간적 불균일성이 증가됨을 볼 수 있다. 그림 9는 최빈값으로 규격화한 영상으로 나누어, 공간적으로 노출시간이 일정하지 않은 현상을 보정한 영상이다.

그러나 실제 천체 (표준별)를 관측한 영상의 경우 노출시간의 차이가 보이는 경우와 차이가 없는 경우가 함께 있었다. 그러므로 노출시간이 짧은 경우에는 노출시간에 따른 공간적 차이만 보정하고 측광을 수행하며, 실제 노출시간의 차이가 있는 경우에만 등급의 차이로 보정하는 방법을 선택하는 것이 바람직하다.

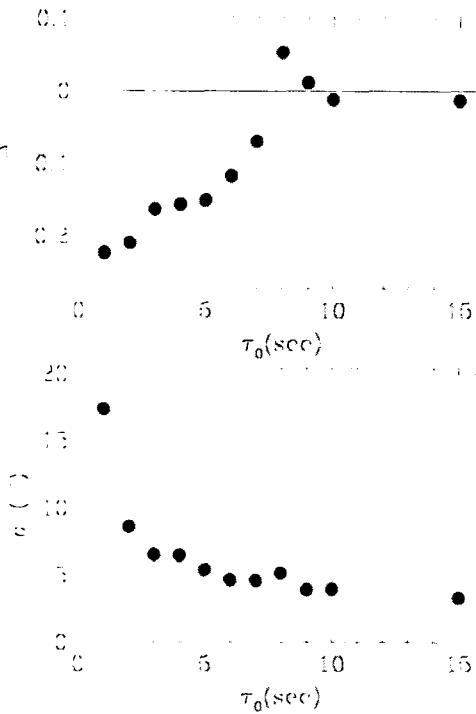


그림 9. 입력한 노출시간과 실제 노출시간의 차이 (상)와 셔터 여닫이 시간의 유한성에 의한 불균일한 노출로 발생한 공간적 불균 일성 (하).

2.5 간섭무늬

현재 널리 보급되고 있는 CCD는 양자효율을 높이기 위해서 CCD의 전면이 아닌 후면에 빛을 입사시키는 동시에, 자외선 파장 영역대의 반응도를 높이기 위한 목적으로 CCD의 표면을 얇게 가공하는 thinned-CCD 방식을 채택하고 있다. 그러나 표면을 얇게 가공하는 과정에서 공간적으로 완전히 편평하지 않으면, 관측에서 얻은 자료 중 장파장 영역에서 그림 11에서와 같이 간섭효과를 일으킨다.

이러한 효과를 보정하기 위해 서울대학교에서 수행하고 있는 연구 과제인 North Ecliptic Pole (NEP)에 대한 관측자료 중 간섭무늬효과가 두드러지게 나타나는, 노출시간이 60초 이상인 1 필터 영상만 수집하였다. NEP 지역은 밝은 별의 수가 비교적 적으며, 겹치지 않으면서도 많은 영역을 관측하였으므로, 간섭무늬 보정영상을 만들기에 더없이 좋은 자료가 될 수 있다. 모든 전처리과정을 수행한 후 중간값으로 합치면, 별은 제거가 되지만 간섭무늬는 남게 된다. 이 영상을 최빈값으로 나누면 간섭무늬 효과의 공간적인 비율만 남게 된다. 이 과정으로 얻은 간섭무늬 영상을 그림 10에 제

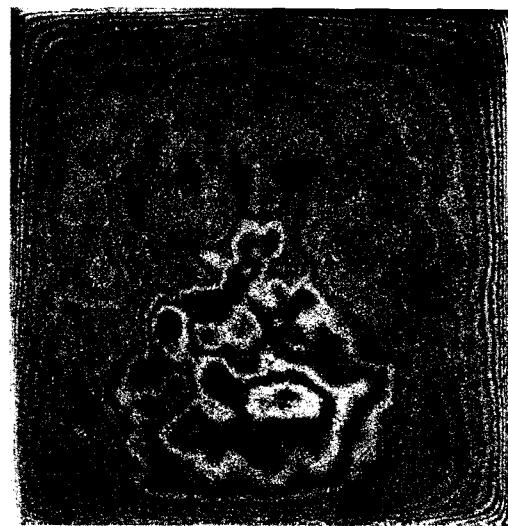


그림 10. 간섭무늬 보정영상. CCD표면을 얇게 가공하면서 공간적으로 편평하지 않을 때 생기며, 장파장 필터에서 두드러지게 나타난다.

시하였으며, 이 영상을 적용하기 전과 적용한 이후의 영상을 그림 11에 제시하였다. 그림에서 간섭무늬 보정을 수행한 후의 천체 영상을 보면, 보정 전에 비해서 간섭무늬의 큰 구조는 잘 제거가 되었다는 것을 볼 수 있다. 그러나 관측일이 다르거나 노출시간이 다른 몇몇 영상에서는 간섭무늬가 완전히 제거되지 않는다. Magnier & Cuillandre (2004)에 의하면 간섭무늬는 공간적으로 독립적인 높은 주파수의 형태와 낮은 주파수의 형태로 나뉜다. 후자의 경우는 직접적으로 간섭현상을 일으키는 광원과 달빛에 의한 산란, 빛의 입사각도에 따른 필터의 반응도, 박명하늘과 밤하늘의 방출선 세기의 차이와 같은 원인에 의해 변화한다. 이러한 현상 때문에 하나의 보정 영상을 통해서 모든 관측일의 영상을 완전히 보정할 수 없다. 다행히 PSF 측광을 수행하는 경우에는 간섭무늬가 측광오차에 기여하는 정도가 미미하기 때문에 측광 결과에는 큰 영향을 미치지 않는다.

2.6 PSF의 공간적 변화

Fairchild 486 4k CCD는 약 $18' \times 18'$ 정도의 넓은 시야를 관측할 수 있다. 그러나 CCD의 가장자리로 갈 수록 초점면이 공간적으로 휘어있는 영향을 많이 받게 된다. 이러한 효과는 PSF 측광을 수행할 때, 최종 PSF의 형태와 눈으로 분해할 수 없는 측광쌍성을 구분하는데 영향을 미친다. 정밀한 PSF 측광을 수행하기 위해

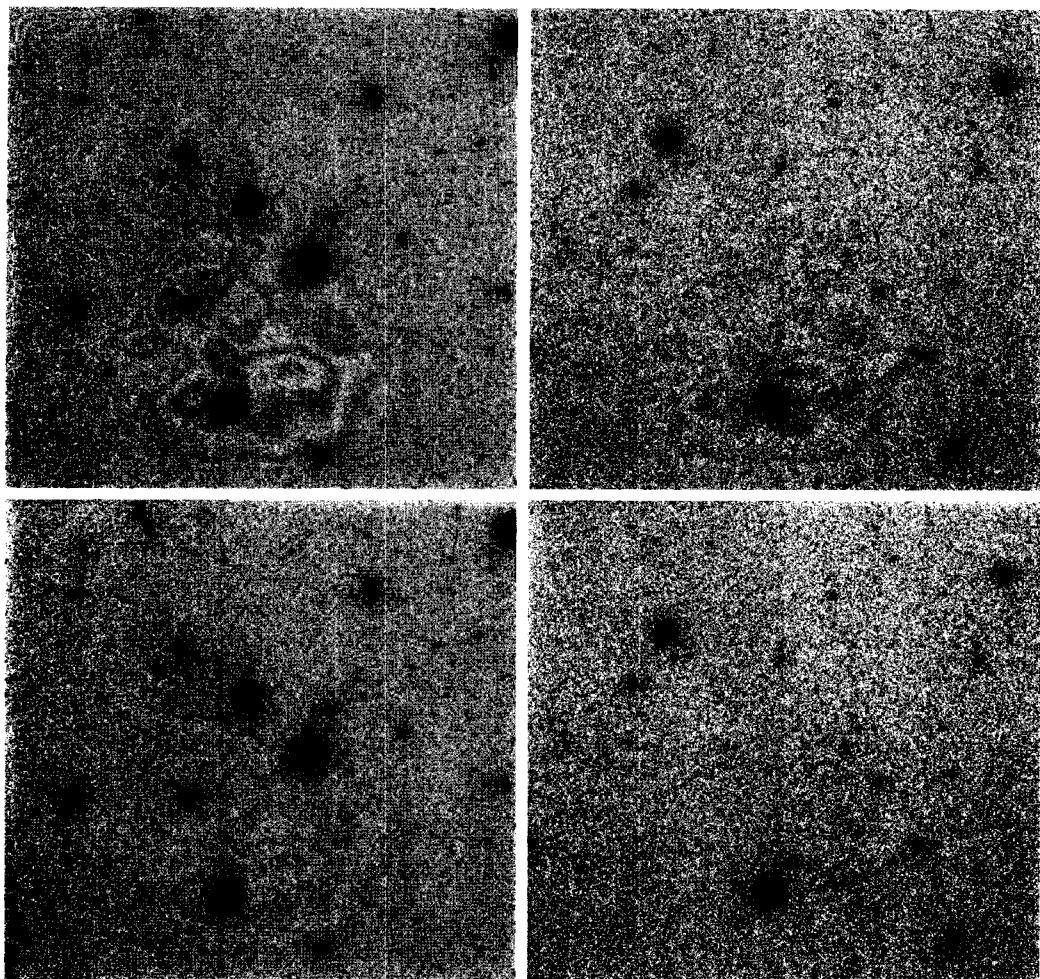


그림 11. 간섭무늬 효과 (상)와 보정 후의 모습 (하). 간섭무늬 보정을 수행하면 간섭무늬의 큰 구조는 비교적 잘 제거되지만, 몇몇 영상에 대해서는 완전히 제거가 되지 않고 흔적이 남는다.

서는 PSF의 공간적인 형태의 변화를 숙지하고 있어야 한다.

포화되지 않은 모든 별에 대해 PSF 측광을 수행한 영상을 그림 12에 제시하였다. 이 그림에서는 PSF 측광으로 남은 잔해의 형태와 분포를 보여주고 있으며, 이를 통해서 PSF 형태의 공간적인 변화를 알 수 있다. CCD의 중심부에 있는 별의 잔해는 원형 대칭으로 잘 제거가 된 반면에 가장자리로 갈수록 휘어있는 초점면의 영향을 받아서 잘 제거되지 않은 밝은 부분이 CCD의 중심 방향을 향하고 있는 것을 볼 수 있다.

3. 요약 및 결론

CCD를 사용하여 천체를 관측한 후, 천체로부터 오는 신호만을 검출하기 위해서는 CCD 자체에서 발생하는 기기적인 신호를 제거해야 한다. 기기적인 특성을

제거하기 위해서는 사용하고 있는 CCD가 가지고 있는 특징을 정확히 파악하고 있어야 한다. 2006년 7월 우즈베키스탄의 Maidanak 천문대 AZT 1.5m 망원경에 새로 설치한 Fairchild 486 4k CCD를 사용하여 약 1년 동안 얻은 관측 자료를 통해서 이 CCD가 가지고 있는 특징을 조사하였다. 조사 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 영점 영상: 영상을 읽어 들이는 Amp의 개수를 필요에 따라서 1, 2, 4개로 설정하여 사용할 수 있다. 본 연구에서는 4개의 Amp를 사용하였고, 이에 따라서 각 Amp에 따라 영점의 차이를 보이고 있다. 각 Amp의 영점은 비교적 거의 일정한 값을 가지며, 3번과 4번 Amp에서 약간의 계절변화가 보인다. 초과 읽기 영역이 존재하지 않으므로 관측기간 동안 충분

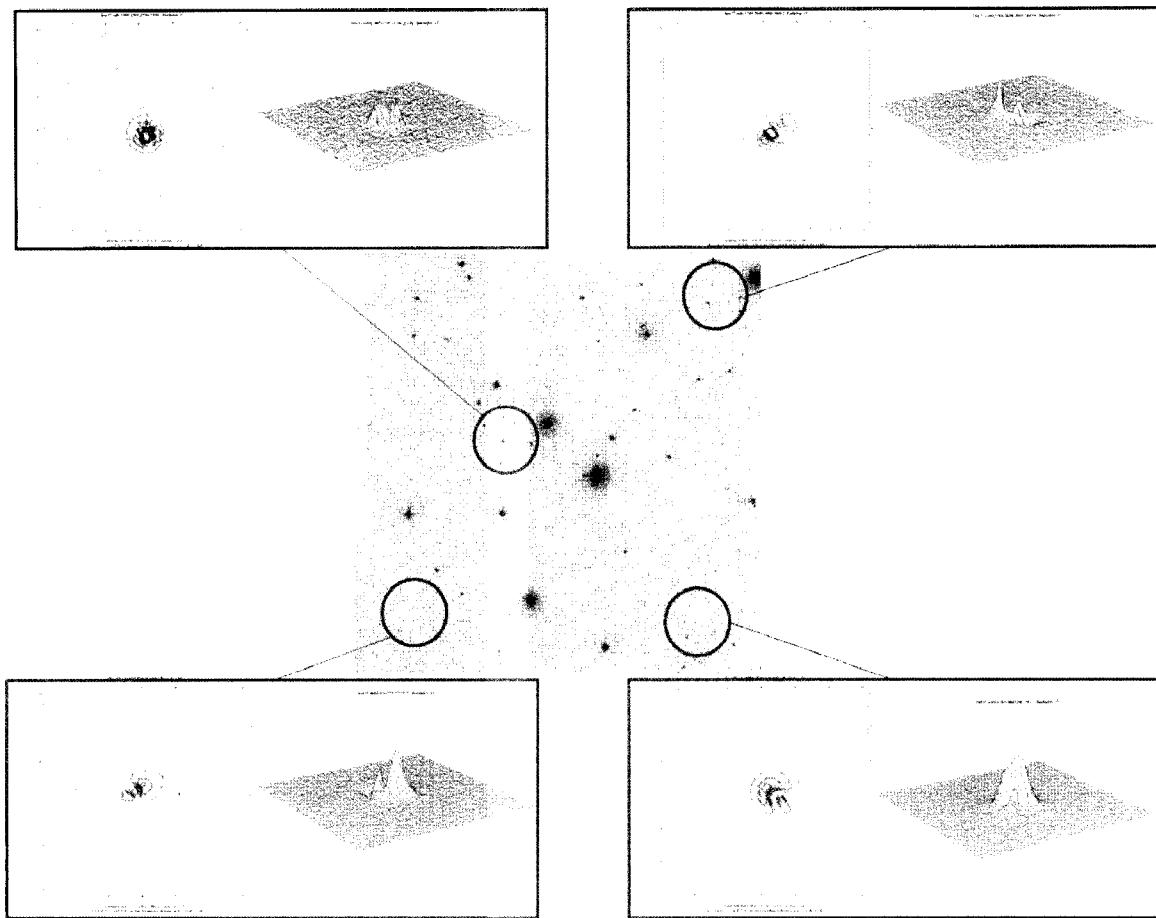


그림 12. PSF 측광을 수행한 후에 남은 잔해영상. 잔해의 형태와 분포를 통해서 초점면이 공간적으로 휘어있는 정도를 인지할 수 있다.

히 많은 영점영상을 얻어야 하며, Amp 1번과 2번 사이와 Amp 3번과 4번 사이에 기계적인 문제에 의해서 경계면에서의 화소값이 갑자기 증가하는 경우가 종종 발생한다.

- 2) 암전자 영상: Cryo Tiger 냉각방식을 사용하여 CCD의 온도를 -108°C 로 유지시키고 있으며, 암전자를 거의 발생시키지 않는다.
- 3) 바닥고르기 영상: 바닥고르기 영상을 통하여 CCD의 선형도와 양자효율 및 Gain의 차이를 조사하였다. 선형도 조사의 경우 모든 필터와 Amp에서 신호 대 잡음의 기울기가 $1/2$ 를 크게 벗어남으로써 Poisson 잡음의 분포와 잘 일치하지 않는 것을 발견하였다. 이 결과는 화소들 사이의 큰 양자효율의 차이에서 기인한 것으로 추정된다. 각 Amp에 대한 양자효율의 차이는 파장에 의존하는 반면 Gain의 차이는 작다.

4) 노출시간의 공간적인 차이: 조리개식 셔터를 사용하는 경우, 셔터의 여닫는 시간의 유한한 크기에 의해 CCD 영상에서 위치에 따라 입사광량의 차이가 발생하며, 따라서 유효 노출시간의 차이가 발생한다. 이러한 효과의 크기를 정량화하기 위해서 두 가지 인자를 정의하고 조사하였으며, 노출시간의 차이를 보정하는 영상을 만들었다.

- 5) 간섭무늬 영상 조사: 노출시간이 15초 이상인 I 필터 영상에서 간섭무늬가 보이는데, 이 효과를 보정하기 위해서 서울대학교의 연구과제인 NEP 관측 자료를 사용하여 보정영상을 만들었다. 그러나 대기 상층부의 방출선 세기가 시간에 따라 변하기 때문에 간섭무늬를 완전히 제거하기는 어렵다.
- 6) PSF의 공간 변화: CCD의 넓은 시야각으로 인해 초점면이 휘어있는 효과가 가장자리로 갈수록 크게 나타난다. 이러한 효과를 살펴보기 위해 하나의 천체영상에 대하여 PSF 측광을 수행한 후에 그 잔해를 조

사하였다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 과학기술부 및 한국과학재단 지정 우수 연구센터인 세종대학교 우주구조와 진화 연구센터의 지원으로 이루어진 것입니다. 그리고 황도북극 관측자료를 제공하여 주신 서울대학교 물리천문학부 천문전공 임명신 교수께 감사드립니다.

참고 문헌

- 성환경, 1995, 8개 짧은 산개성단의 *UBV* CCD 측광
박사학위논문, 서울대학교
- Amelio, G., Tompsett, M., & Smith, G., 1970, Bell Systems Technical Journal, 49, 593
- Bessell, M. S., 1990, *UBVRI* passbands, PASP, 102, 1181
- Boyle, W. & Smith, G., 1970, Bell Systems Technical Journal, 49, 587.
- Jin, H. 2005, CCD 잔존영상 분석, J. Astr. Sp. Sci. 22, 483
- Janesick, James R. & Elliott, T., 1992, History and Advancements of Large Area Scientific CCD Images, in Astronomical CCD Observing And Reduction Techniques, ed. S. B. Howell, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco, ASP Conf. Ser. 23, page 1.
- Magnier, E. & Cuillandre, J.-C., 2004, The Elixir System: Data Characterization and Calibration at the Canada-France- Hawaii Telescope, PASP, 116, 449
- Massey, P. & Jacoby, G. H., 1992, CCD Data: The Good, The Bad, And The Ugly, in Astronomical CCD Observing and Reduction Techniques, ed. S. B. Howell, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco, ASP Conf. Ser. 23, page 240.