

KMTNet 모자이크 CCD 영상의 크로스톡 보정 CROSSTALK CORRECTION OF THE KMTNet MOSAIC CCD IMAGE

김승리^{1,2}, 차상목^{1,3}, 이충욱^{1,2}, 김동진¹, 박병곤^{1,2}, 이용석^{1,3}, 박홍수^{1,2}, 경재만¹, 천무영¹
¹한국천문연구원, ²과학기술연합대학원대학교, ³경희대학교 우주탐사학과

SEUNG-LEE KIM^{1,2}, SANG-MOK CHA^{1,3}, CHUNG-UK LEE^{1,2}, DONG-JIN KIM¹, BYEONG-GON PARK^{1,2},
YONGSEOK LEE^{1,3}, HONG SOO PARK^{1,2}, JAEMANN KYEONG¹, AND MOO-YOUNG CHUN¹

¹Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 34055, Korea

²Korea University of Science and Technology, Daejeon 34113, Korea

³School of Space Research, Kyung Hee University, Yongin 17104, Korea

E-mail: slkim@kasi.re.kr

(Received May 11, 2016; Revised June 13, 2016; Accepted June 16, 2016)

ABSTRACT

We have constructed a wide-field photometric survey system called as the Korea Microlensing Telescope Network (KMTNet) in 2015. It consists of three 1.6 m optical telescopes equipped with mosaic CCD cameras. Four 9k CCDs were installed on the focal plane of each telescope. In this paper, we present the crosstalk analysis of the KMTNet mosaic CCD images. The crosstalk victims caused by bright sources were visible at eight sub-images obtained through different readout ports of each CCD. The crosstalk coefficients were estimated to be several tens of 10^{-4} in maximum, differing from sub-image to sub-image, and the non-linearity effect certainly appeared at the victims made from saturated sources. We developed software functions to correct the crosstalk effect of the KMTNet CCD images. The software functions showed satisfying results to remove clearly most of the crosstalk victims and have been implemented in the KMTNet image processing pipeline since 2015 September.

Key words: instrumentation: detectors (CCD), methods: data analysis (crosstalk), telescopes: KMTNet

1. 서론

천체관측연구에 사용하는 CCD 카메라는 점점 대형화되고 있다. 국내 최초로 소백산천문대에 CCD 카메라가 도입된 1990년대 초에는 25만 픽셀(Park 1993; Kim et al., 1993)에 불과했었는데, 보현산천문대 1.8 m 망원경이 설치된 1990년대 중반에는 1백만 픽셀의 1k CCD 카메라(Park et al., 1995)를 사용하다가, 2000년대에는 4백만 픽셀의 2k CCD 카메라(Park et al., 2001; Kim et al., 2001)로 변경되었고, 2010년대에는 16백만 픽셀을 가진 4k CCD 카메라(Sung et al., 2012)를 국내에서 많이 사용하고 있다.

외계행성이나 변광성, 초신성, 소행성, 혜성 탐색과 같이 새로운 천체를 발견하기 위해서는 넓은 시야를 관측할 수 있는 대형 CCD가 필수적이다. 현재 가동 중인 세계 최대급의 광시야 관측 장비로는 PanSTARRS 1.8 m 광시야 망원경에서 사용하는 14억 픽셀의 CCD 카메라

(Tonry et al., 2008), Subaru 8 m 망원경에서 사용하는 9.7억 픽셀의 Hyper Suprime-Cam(HSC; Kamata et al., 2010), Blanco 4 m 망원경에 설치한 5.2억 픽셀의 Dark Energy Camera(DECAM; Estrada et al., 2010), CFHT 3.6 m 망원경에 장착한 3.4억 픽셀의 MegaCam(Aune et al., 2003) 등이 대표적이다. 한국천문연구원에서는 지구형 외계행성 탐색을 위한 광시야 광학관측시스템 KMTNet을 남반구 3개 천문대(칠레의 CTIO, 남아공의 SAAO, 호주의 SSO)에 설치하고 2015년 10월부터 과학연구를 수행 중이다. KMTNet에서 사용하는 카메라는 3.4억 픽셀의 CCD를 장착하고 있는데, 영국의 e2v사에서 제작한 9216 x 9232 픽셀의 CCD 290-99 모델을 4개 모자이크한 것이다(Kim et al., 2016).

CCD 픽셀 개수가 증가하면 관측한 영상을 읽어내고(readout) 저장하는데 걸리는 시간이 길어진다. 영상을 읽어내는 동안에는 천체의 빛을 누적하는 관측을 진행할 수 없어서 관측시간의 손실을 초래하기 때문에 읽기

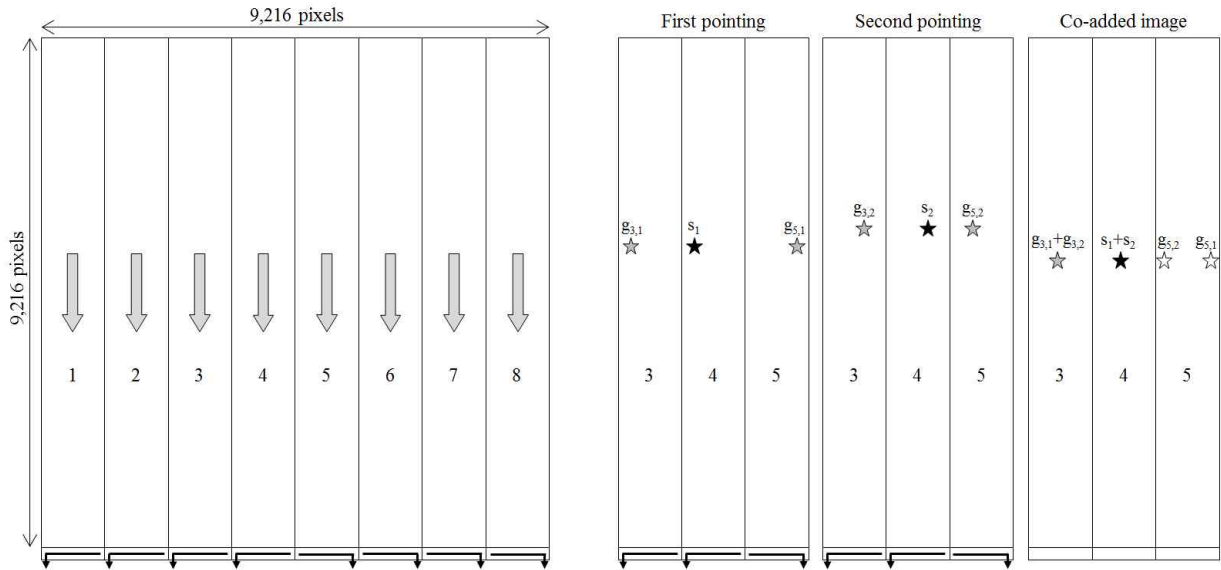


Figure 1. (Left) Readout geometry of a single 9k KMTNet CCD with eight readout ports. (Right) Crosstalk effect when coadding two images with different pointing. The characters ‘s’ and ‘g’ represent the crosstalk source and victim (i.e. ghost), respectively.

시간을 최대한 줄여야 한다. 카메라 전자제어부에서 조정할 수 있는 영상 읽기 속도를 증가시키면 읽기 잡음이 커지기 때문에 읽기 속도의 증가에 한계가 있다. 그러므로 읽기 속도와 읽기 잡음을 서로 적절히 조정해서 최적화시켜야 한다. 읽기 속도를 증가시키지 않고 읽기 시간을 줄일 수 있는 방법은 영상을 나눠서 읽는 것이다. KMTNet을 포함한 모든 대형 CCD 카메라는 초점면에 여러 개의 CCD를 모자이크해서 사용하고 있는데, 모자이크된 각각의 CCD는 독립적인 전자제어부와 연결되어 있어서 읽기 시간을 줄일 수 있으며, 1개의 CCD도 여러 개의 포트(port)로 나눠서 읽을 수 있도록 제작하여 영상을 읽는데 소요되는 시간을 최대한 줄이고 있다.

여러 개의 읽기 포트를 사용하면 읽기 시간이 줄어드는 대신에, 영상을 여러 포트에서 동시에 읽는 동안에 전자회로들끼리 영향을 줄 수 있다. 어떤 전자회로에서 신호가 전달될 때, 다른 전자회로의 신호에 예상치 못한 영향을 주는 것을 크로스톡(crosstalk)이라고 부르며, 여러 개의 읽기 포트를 사용하는 대형 CCD 카메라에서는 대부분 이런 현상이 나타난다(예를 들어, DECam 영상에서는 약 1%의 크로스톡이 나타남; Mohr et al., 2012). 이런 전기적 간섭 효과는 영상 분석을 통한 과학연구에 큰 지장을 주기 때문에, 크로스톡 효과가 최소화되도록 카메라의 전자제어부를 설계하고 제작해야 한다.

이 논문에서는 KMTNet 모자이크 CCD 카메라의 영상에서 나타나는 크로스톡 현상에 대해 분석하고 소프

트웨어적인 방법을 통하여 이 효과를 보정한 결과를 제시하였다.

2. KMTNet CCD 영상의 크로스톡 현상

KMTNet CCD 카메라는 4개의 CCD가 모자이크되어 있으며, 이들은 완전히 독립적으로 제어되기 때문에 CCD 사이의 크로스톡 현상은 나타나지 않는다. 1개의 CCD 영상은 8개의 포트에 나눠져서 읽히며, 500 kHz의 속도로 읽었을 때 걸리는 시간은 약 25초이다. 8개의 읽기 포트 중에서 4개씩 서로 읽는 방향이 다르다. 즉, CCD를 절반으로 나눠서, 왼쪽에 있는 4개의 포트는 왼쪽 방향으로 영상을 읽고, 오른쪽에 있는 4개는 오른쪽으로 읽는다(Figure 1 왼쪽). 서로 읽는 방향이 같은 영상들(예를 들면, 3번과 4번) 사이에서 크로스톡 현상이 생겼을 때 망원경 위치가 약간 변경된 2개의 관측영상을 동일한 별을 기준으로 합치면 크로스톡 영상이 1개로 나타나지만, 서로 읽는 방향이 반대인 영상들(예를 들어, 4번과 5번)에서 크로스톡이 생기는 경우에 2개의 관측영상을 합치면 크로스톡 영상은 2개로 나타난다(Figure 1 오른쪽은 4번 영상에 크로스톡 Source가 있고 3번과 5번 영상에 Victim이 발생한 경우의 예제임; O'Connor, 2015의 Figure 10 참고). KMTNet 모자이크 CCD 카메라는 읽기 방향이 같은 것과 반대의 경우가 절반씩 존재하기 때문에, 위치가 서로 약간씩 다른 n개 영상을 합치면 읽기 방향의 차이에 따라 크로스톡 영상이 1개 또는 n개로 나타난다.

크로스톡 현상은 같은 포트에 읽은 영상에서 전체적

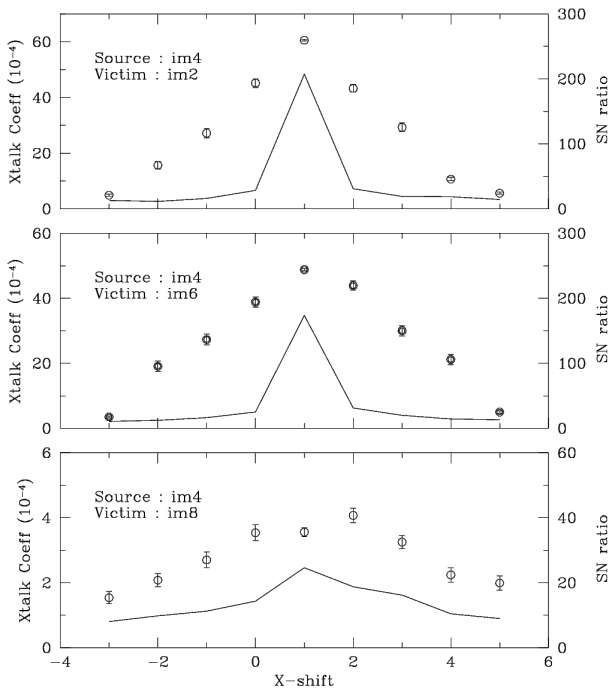


Figure 2. Crosstalk coefficient samples of the KMTNet mosaic CCD image, varying as the victim position shifts in X-axis. Open circles are the coefficients and the solid lines are their Signal to Noise ratios. The values were calculated by using the IRAF.

으로 동일한 값을 가지며, 강한 빛에 의한 크로스톡 효과는 강하게 나타난다. 그러므로 크로스톡 효과의 선형성을 가정하면, 다음과 같은 간단한 수식으로 크로스톡 계수를 정의할 수 있다(Freyhammer et al., 2001).

$$\text{선형계수} = (\text{Victim} - V_{BG}) / (\text{Source} - S_{BG})$$

여기에서 Source는 크로스톡을 만드는 강한 빛(원인)의 양이고, Victim은 Source에 의해 크로스톡 현상이 나타난 결과 값이다. S_{BG} 와 V_{BG} 는 각각 Source와 Victim에 포함되어 있는 배경(background) 값이다.

천문관측 자료처리에 많이 사용하는 IRAF를 이용하여 KMTNet 영상에서 나타나는 크로스톡 현상을 조사하였다. 왼쪽부터 4번째 포트에서 읽은 영상에 강한 빛의 Source가 있는 경우에, 2번과 6번, 8번 영상에서 크로스톡 현상이 잘 보였다. 즉, 2개 간격의 영상에서 크로스톡이 강하게 나타났다. 반면에 나머지 1, 3, 5, 7번 영상에서는 약했다. 밝은 별의 Source와 이로 인해 크로스톡이 나타난 Victim의 중심위치를 확인해보니, Y-축 위치는 ± 0.2 픽셀의 오차범위에서 같은 반면에, X-축 위치는 약 $1.0(\pm 0.2)$ 픽셀의 차이를 보이고 있었다. IRAF의 MSCRED 패키지에 포함된 크로스톡 보정 루틴(Valdes, 2002)을 이용하여 X-축 위치 변화에 따른 크로

스톡 계수를 계산한 결과(Figure 2), Source의 위치에서 +1 픽셀에 Victim이 있다고 설정하고 계산했을 때 신호 대잡음비가 가장 높게 나왔다. Subaru 망원경에서 사용했던 Suprime-Cam의 크로스톡 현상을 분석한 Yagi (2012)의 결과와 같이, Source와 Victim이 정확히 같은 위치, 즉, $\Delta X = 0$ 에서 크로스톡이 강하게 나오는 것이 일반적이다. KMTNet CCD 영상의 크로스톡이 $\Delta X = +1$ 에서 가장 강하게 나오는 것은 매우 이례적이고 특이한 현상이며, 카메라 제작사에서 전자제어부를 점검하고 있지만 아직까지 정확한 원인을 파악하지 못하고 있다.

KMTNet CCD 카메라와 같이 16비트로 저장되는 관측영상은 최대 65,535 ADU까지 표현되며, 크로스톡 계수가 1×10^{-4} 이라면 Victim의 최대값이 약 6 ADU로써 읽기잡음과 비슷한 수준이 된다. 그러므로 크로스톡 계수는 1×10^{-4} 이하로 작을수록 좋으며, 1.5×10^{-5} 이하의 계수는 정수로 표현할 수 없는 1 ADU 이하의 Victim에 해당하기 때문에 크로스톡이 없다는 것을 의미한다(Yagi, 2012). Figure 2에서 예제로 보여주는 것과 같이 KMTNet 모자이크 CCD 영상의 크로스톡 계수는 약 60×10^{-4} 까지 비교적 크게 나타나고 있으며, 과학연구에 활용하기 위해서는 이 효과를 반드시 보정해야 한다.

KMTNet 모자이크 CCD 카메라 영상의 절반은 읽기 방향이 반대이고, 크로스톡 현상의 Source와 Victim 위치가 X-축 방향으로 약 1 픽셀의 차이를 보이고 있기 때문에, IRAF-MSCREED 패키지의 크로스톡 보정 루틴만으로는 간단히 보정할 수 없었다. 이러한 KMTNet CCD 영상의 특수성에 맞춰서 크로스톡 현상을 보정하는 IRAF 스크립트(script)를 만들었으며, 이를 이용하여 시험해본 결과 2가지 문제점이 나타났다. 첫 번째는 읽기 방향이 다른 절반의 영상을 뒤집거나 X-축의 픽셀 차이를 고려하기 위해 파일을 만들고 지우는 몇 번의 과정을 수행하기 때문에, 컴퓨팅 시간이 많이 소요된다는 것이다. KMTNet 영상처리용 컴퓨터(Kim et al., 2015)를 사용할 경우, 모자이크 CCD 영상 1개에 대해 바이어스(bias)나 플랫(flat) 보정과 같은 전처리 과정을 수행하는데 약 2분이 소요되는데, 크로스톡 보정을 포함시키면 약 10분 정도가 늘어났다. 매일 수백 장의 CCD 영상을 처리해야하기 때문에 1개 영상당 10분의 추가되면 관측 당일에 전처리 과정을 끝낼 수가 없다. 두 번째 문제는 포화된(saturated) 별빛의 경우에 크로스톡 보정 후에도 약 100 ADU 정도의 잔상이 남는다는 것이다. 포화되지 않은 Source에 의한 크로스톡 현상은 선형성이 있지만, 포화된 Source의 크로스톡은 선형성에서 벗어나기 때문이다(3절 참조). IRAF의 크로스톡 보정 루틴을 사용해서는 크로스톡의 비선형성을 보정할 수 없다.

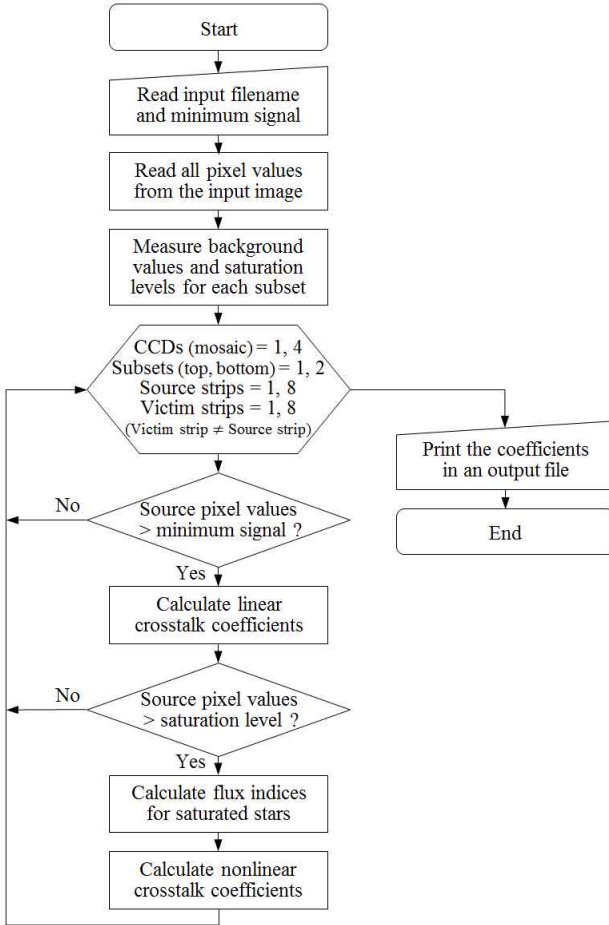


Figure 3. Flow chart of our program to calculate the crosstalk coefficients.

3. KMTNet CCD 영상의 크로스톡 보정 프로그램 개발

KMTNet 모자이크 CCD 영상에서 나타나는 크로스톡 현상은 IRAF를 사용하여 보정하는데 한계가 있었기 때문에, KMTNet CCD 영상에 최적화된 크로스톡 보정 프로그램을 C-언어를 이용하여 개발하였다. Figure 3에 크로스톡 계수를 구하는 프로그램의 순서도를 개략적으로 나타내었다. 보정 계수를 이용하여 크로스톡 효과를 영상에서 제거하는 프로그램도 이와 비슷하다.

먼저 KMTNet CCD 영상의 크로스톡 현상에 대한 선형성을 자세하게 조사하였다. Figure 4에서 볼 수 있듯이, Source가 포화되기 전인 약 65,500 ADU까지는 Source의 세기에 비례해서 Victim이 선형적으로 증가하는 반면, Source가 포화되면 Victim이 크게 분산되는 것으로 나타났다(오른쪽 위 그림). 포화된 Source는 약 10 ADU의 차이로 거의 같은 값이지만 Victim은 약 200 ADU 이상 분산되었으며, 포화되기 전의 분산보다 2배 정도 크게 나타났다. Victim의 분포를 조사한 결과, 포

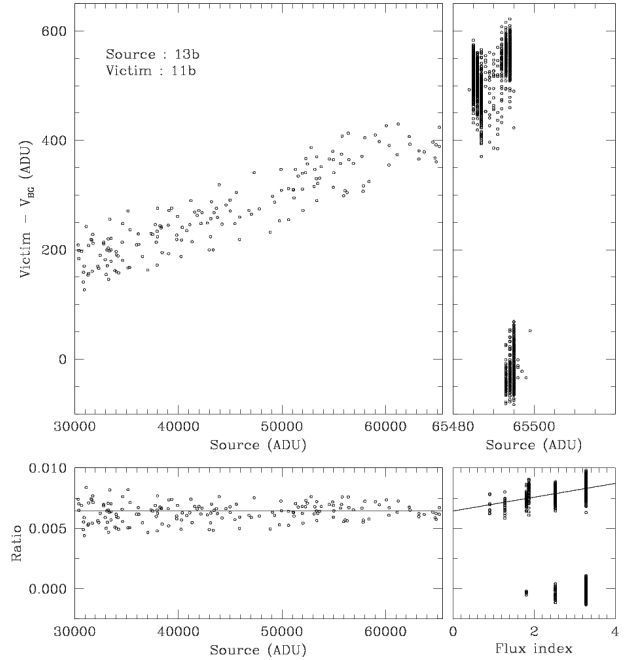


Figure 4. (Left) Linearity of the crosstalk effect of the KMTNet CCD image. (Right) The saturated sources show the non-linearity that the linear ratio increases as the stellar brightness defined as the flux index.

화된 별들은 Source가 거의 비슷함에도 불구하고, 별이 밝을수록 Victim이 커진다는 것, 즉, 오른쪽 아래 그림처럼 선형계수가 증가하는 것을 발견하였다. 별이 밝을수록 포화된 픽셀 수가 많기 때문에, 별빛의 세기는 포화된 픽셀의 개수에 상용로그 함수를 적용하여 지표로 삼았고, 이를 Flux index라고 정의하였다. 포화되지 않은 픽셀은 Flux index가 0이며, 어떤 별의 포화된 픽셀 개수가 100개이면 그 별의 포화 픽셀들은 모두 Flux index가 2이다. 이렇게 정의하면, KMTNet 모자이크 영상의 크로스톡 계수는 다음과 같이 표현되는 것으로 나타났다.

$$\text{계수} = \text{선형계수} + \text{비선형계수} \times \text{Flux index}$$

여기에서 선형계수는 Figure 4의 왼쪽 아래 그림에서 평탄한 실선으로 표시된 것처럼 Source와 Victim의 비율(ratio)이며, 비선형계수는 오른쪽 아래 그림에서 실선으로 표시된 것처럼 Flux index에 따라 이 비율이 증가하는 정도, 즉, 기울기를 의미한다.

아주 강한 별빛의 경우에는 Source가 65,500 ADU 정도로 매우 큼에도 불구하고, Victim이 배경 값과 거의 같은 픽셀이 일부 존재하였다. Figure 4의 오른쪽 위와 아래에서 Y-축 값이 0 근처인 픽셀들이 이것이다. 이렇게 일부 특이한 픽셀(대략 5% 미만)은 크로스톡 계수를 구하는 과정에서 제외하였다.

KMTNet 모자이크 CCD 카메라는 4개의 CCD를 가

Table 1. Samples of the KMTNet crosstalk coefficients.

Vic	Sou	Coeff_1	Stddev_1	Num1	Satur	Coeff_2	Stddev_2	Num2
2a	1a	-0.000023	0.000024	32	65510	0.000019	0.000012	33
2b	1b	-0.000010	0.000027	28	65510	0.000008	0.000018	30
3a	1a	0.005433	0.000098	22	65510	0.000403	0.000044	26
3b	1b	0.005362	0.000024	26	65510	0.000248	0.000039	31
4a	1a	-0.000086	0.000024	30	65510	0.000018	0.000014	30
4b	1b	-0.000077	0.000024	32	65510	0.000008	0.000017	32
5a	1a	0.000513	0.000028	24	65510	0.000060	0.000015	31
5b	1b	0.000493	0.000022	27	65510	0.000055	0.000022	32
6a	1a	-0.000088	0.000030	33	65510	0.000009	0.000015	32
6b	1b	-0.000101	0.000022	27	65510	0.000008	0.000019	29
7a	1a	0.000032	0.000030	30	65510	0.000034	0.000016	30
7b	1b	0.000052	0.000039	29	65510	0.000040	0.000023	30
8a	1a	-0.000115	0.000025	30	65510	0.000007	0.000012	30
8b	1b	-0.000112	0.000026	28	65510	0.000032	0.000026	28
1a	2a	-0.000056	0.000022	28	65510	0.000008	0.000011	29
1b	2b	-0.000045	0.000018	26	65510	0.000019	0.000009	26
3a	2a	-0.000086	0.000020	24	65510	0.000019	0.000009	27
3b	2b	-0.000094	0.000025	27	65510	0.000020	0.000010	29
4a	2a	0.004494	0.000047	27	65510	0.000468	0.000081	34
4b	2b	0.004362	0.000084	27	65510	0.000374	0.000034	26
5a	2a	-0.000109	0.000023	29	65510	0.000017	0.000008	33
5b	2b	-0.000101	0.000021	26	65510	0.000011	0.000011	30
6a	2a	0.000479	0.000025	26	65510	0.000111	0.000045	23
6b	2b	0.000490	0.000024	28	65510	0.000058	0.000014	33
7a	2a	-0.000181	0.000019	32	65510	0.000022	0.000006	27
7b	2b	-0.000166	0.000029	28	65510	0.000009	0.000013	26
8a	2a	0.000001	0.000028	27	65510	0.000043	0.000014	26
8b	2b	-0.000033	0.000018	23	65510	0.000032	0.000013	27
1a	3a	0.005899	0.000033	27	65490	0.000416	0.000047	27
1b	3b	0.005845	0.000023	29	65490	0.000270	0.000023	27
2a	3a	-0.000084	0.000027	26	65490	0.000009	0.000011	30
2b	3b	-0.000130	0.000010	29	65490	0.000008	0.000007	27

지고 있고, 각 CCD는 8개의 읽기 포트를 가지고 있다. 4개의 CCD는 독립적인 전자제어부를 가지고 있어서 서로 크로스톡 현상을 일으키지 않지만, 1개 CCD를 나눠서 읽어낸 8개 영상은 서로 크로스톡 현상을 일으킬 수 있다. 즉, 1번 영상에 있는 Source는 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8번의 총 7개 영상에 Victim을 만들 수 있으며, 이들 각각에 대해 크로스톡 계수를 구하고 보정해야한다. 총 32개의 포트에서 읽은 각각의 영상들은 크로스톡 계수가 서로 다르다.

앞에서 언급한대로, 포화된 Source에 의한 크로스톡 현상은 비선형으로 나타났다. KMTNet 카메라의 제작 업체가 제공한 자료에 의하면, 1개 CCD 칩의 위아래로 절반씩 나눠서 최대 전자포획 양(Full Well Capacity)이 서로 다르다. 이것은 각각의 영상마다 위쪽의 포화 값과 아래쪽의 포화 값이 서로 다를 수 있다는 것을 의미한다. 이런 이유로 각각의 영상은 위아래 2등분(subset; a, b로 표기)해서 크로스톡 계수를 구하였다.

각각의 CCD 영상에 대해 크로스톡 계수를 구해서 개별적으로 보정할 수도 있지만, 그렇지 못한 영상들도 있다. 크로스톡 현상은 전자제어부에서 발생하기 때문에, 천체관측영상 뿐만 아니라 바이어스나 플랫 등과 같이 모든 CCD 영상에 나타나는데, 바이어스와 플랫 영상은 Source나 Victim이 배경 값과 거의 비슷하므로 크로스톡 계수를 구하기가 어렵다. 또한 우리은하 별지(bulge)와 같이 별이 밀집한 영역을 관측한 영상은 Victim이 인접한 다른 별빛에 의해 영향을 받을 가능성(중첩 효과)이 매우 높고 배경 값의 오차도 커서 크로스톡 계수의 신뢰도가 낮다. 때문에 크로스톡 계수 결정에 좋은 영상들을 수십 장 골라서 크로스톡 계수를

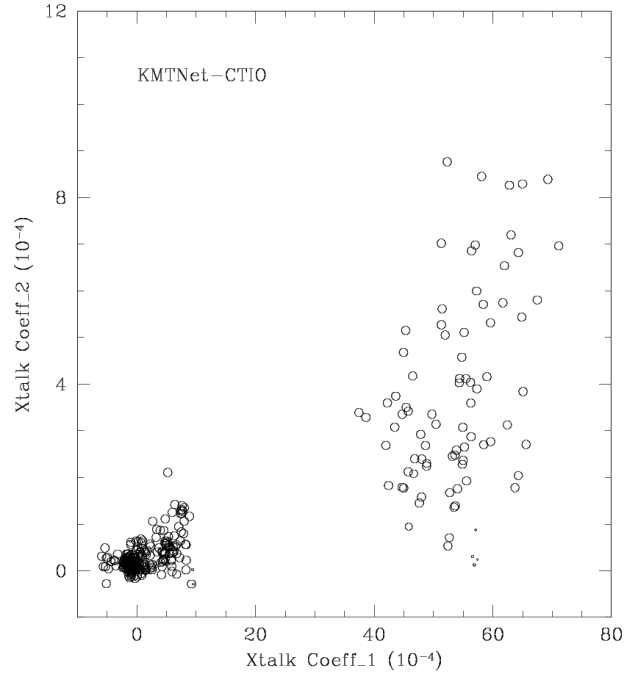


Figure 5. Distribution of the crosstalk coefficients for the KMTNet-CTIO CCD images. The Coeff_1 and Coeff_2 are linear and non-linear coefficients, respectively.

정밀하게 계산한 다음, 모든 CCD 영상의 첫 번째 전처리 과정으로 크로스톡 현상을 보정하였다. 크로스톡 계수의 정밀도를 높이려면 총 64개(1a, 1b, ... 32a, 32b) 영역 전체에 걸쳐 밝은 별들이 많이 찍힌 영상을 선택하는 것이 가장 중요하며, 달빛의 영향이 없어서 배경 값에 의한 오차가 적은 영상을 사용하는 것이 좋다.

Table 1에 KMTNet 모자이크 CCD 영상의 크로스톡 보정 계수를 일부 예제로 제시하였다. Coeff_1이 선형 계수이고, Coeff_2가 비선형계수이다. 1번 영상의 아랫부분인 1a 영역이 Source일 때 2a부터 8a 영역까지 7개의 Victim에 대한 크로스톡 계수를 계산하였고, 윗부분인 1b 영역도 동일하게 2b부터 8b까지 7개 계수를 가지고 있다. Num1과 Num2는 각각 Coeff_1과 Coeff_2를 구하는데 사용한 CCD 영상 개수이며, Satur은 각 Source 영상의 포화 값이다.

KMTNet-CTIO(칠레)에서 관측한 CCD 영상을 사용하여 크로스톡 계수들의 분포를 조사하였다(Figure 5). 선형계수(Coeff_1)은 $(40 - 70) \times 10^{-4}$ 에 뭉쳐있고, $(3 - 10) \times 10^{-4}$ 과 0 근처에도 많이 모여 있다. Table 1을 보면, Source 1a와 Victim 3a 또는 Source 3b와 Victim 5b 등과 같이 2개 간격의 영상에서 크로스톡 계수가 가장 큰 것을 알 수 있다. 선형계수 값이 $(40 - 70) \times 10^{-4}$ 인 자료는 모두 2개 간격의 영상에서 발생하는 것들이다. 그 다음으로 큰 것은 4개 간격의 영상, 즉, Source 1b와 Victim 5b 또는 Source 2a와 Victim 6a 등에서 나타나는

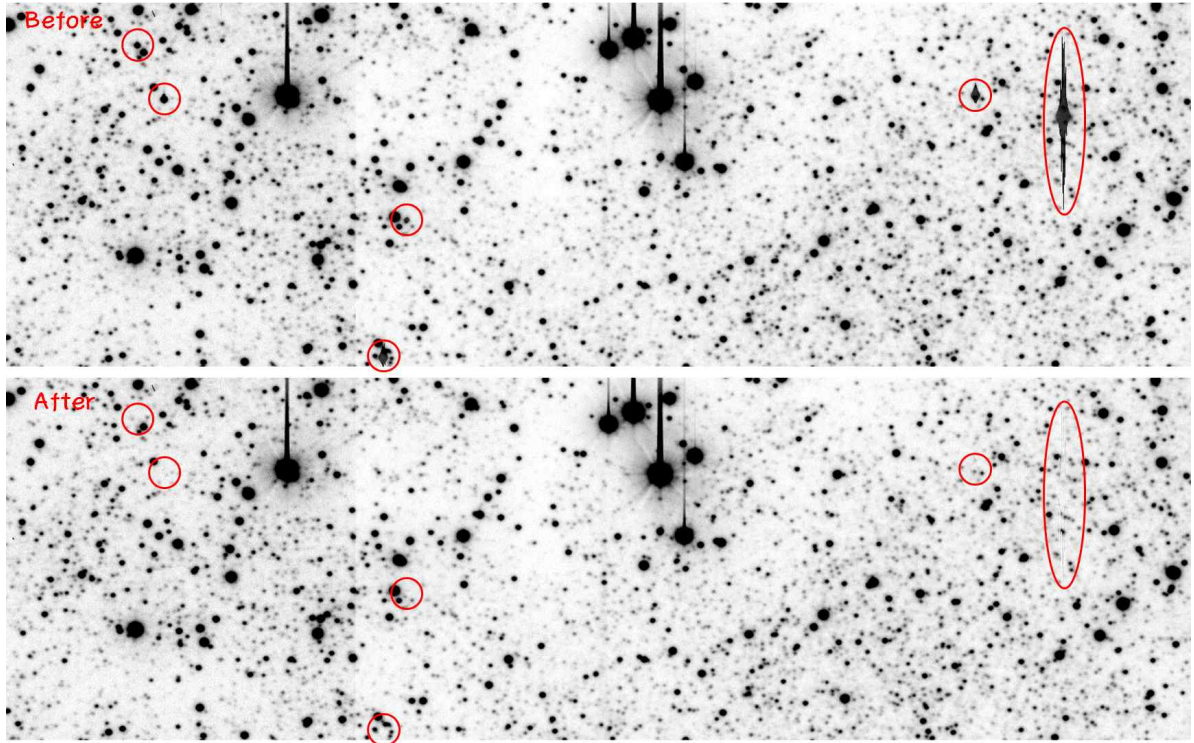


Figure 6. Sample CCD images before (upper) and after (lower) the crosstalk correction by using the new program we developed. It is a part of the Galactic bulge field and was taken at the KMTNet-CTIO site. Several dominant correction features are marked as circles for comparison.

것으로 $(3 - 10) \times 10^{-4}$ 정도이다. 선형계수의 값이 클수록(즉, 크로스톡 현상이 강할수록) 비선형계수(Coeff_2)도 같이 커지는 경향을 보이고 있다.

KMTNet 모자이크 CCD 영상의 크로스톡 보정 결과를 Figure 6에 나타내었다. 새롭게 개발한 프로그램에서는 크로스톡의 비선형성까지도 보정했기 때문에, 그림과 같이 상당히 만족스럽게 제거된 것을 알 수 있다. 그림에서는 비교적 두드러지게 크로스톡 현상이 보정된 것들을 원으로 표시했으며, 보정되어 깨끗이 제거되었지만 어두워서 잘 구분이 안 되는 것들도 많이 있다.

32개의 개별 영상에서 각 영상의 가장자리에 걸린 별은 실제보다 포화 픽셀수가 적게 추정되는 문제가 있기 때문에 크로스톡의 비선형성이 제대로 보정되지 않고 잔상이 남을 수 있다. 또한 앞에서 언급한 것처럼, 아주 강한 Source에서는 일부 Victim이 배경 값과 거의 같은 경우가 있는데, 이런 픽셀들도 보정할 수 없어서 잔상이 남는다.

크로스톡 보정 프로그램을 사용하여 보정계수를 구하고 영상을 보정하는데 걸리는 시간은 1개 CCD 영상당 약 3분 정도였으며, IRAF 스크립트를 이용했을 때 소요되는 약 10분과 비교하면 속도가 상당히 빨라졌음을 알 수 있다. 크로스톡 계수는 별도의 천체관측영상을

을 사용하여 결정하고, 전처리 과정에서는 이미 확보한 계수를 이용하여 모든 CCD 영상에 대해 크로스톡 보정을 수행하므로 1개 영상당 약 1분 정도만 추가된다.

앞에서는 KMTNet-CTIO(칠레) 관측영상에 대한 결과를 제시했으며, KMTNet-SAAO(남아공)과 KMTNet-SSO(호주) 관측영상에 대한 결과도 계수 값에서 약간의 차이만 보일뿐, 크로스톡 현상 자체는 같은 형태로 나타났다. 따라서 우리가 개발한 보정 프로그램을 KMTNet 3개 관측소의 영상에 동일하게 사용하고 있다.

4. 요약 및 결론

외계행성 탐색을 위해 남반구 3개 관측소에 설치한 KMTNet 시스템은 9216×9232 픽셀의 CCD를 4장 모자이크한 카메라를 사용하고 있다. 각각의 CCD는 8개의 포트를 이용하여 나뉜 영상으로 읽어내고 있으며, 이들 8개 영상 사이에는 전자제어부에서 발생하는 크로스톡 현상이 나타나고 있었다. 달빛 영향이 거의 없는 날에 밝은 별이 많이 관측된 영상을 이용하여 크로스톡 현상을 분석한 결과, 크로스톡 계수는 최대 수십 $\times 10^{-4}$ 정도로서 다른 모자이크 CCD 카메라에서 나타나는 일반적인 값($\sim 2 \times 10^{-4}$)보다 20배 이상 큰 값이었다. 또한 포화된 픽셀에서는 비선형성이 뚜렷하게 나타났다.

우리는 KMTNet 모자이크 CCD 영상의 크로스톡 특성에 최적화한 보정 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램은 IRAF 패키지에 포함된 루틴보다 약 3배의 빠른 처리 속도를 보여주었고, IRAF로는 불가능한 비선형성 보정도 처리할 수 있었으며, Figure 6에서 볼 수 있듯이 크로스톡 현상이 깨끗하게 보정되었다. 우리가 개발한 프로그램은 2015년 9월부터 KMTNet 자료처리 파이프라인에 포함되었으며, 모든 CCD 영상의 첫 번째 전처리 과정으로 크로스톡 보정이 이루어지고 있다.

크로스톡 계수는 수일의 짧은 시간동안 오차범위에서 거의 일정하게 유지되었지만, 수개월이 지나면 약간 변하는 것으로 나타났다. 미국 Kitt Peak 천문대에서 관측한 모자이크 CCD 영상에서도 시간적 변화가 보고되었다(<http://www2.lowell.edu/users/massey/lgsurvey/xtalk.html>). 때문에 대략 6개월에 한번 정도는 크로스톡 계수를 확인해서 갱신할 계획이다. 또한 카메라의 전자 제어부가 변경된 경우에는 크로스톡 보정이 잘 이루어지는지 반드시 확인해야 하며, 크로스톡 보정 후 잔상이 전체적으로 읽기잡음 수준보다 큰 10 ADU 이상으로 나타나면 크로스톡 계수를 새로 얻어서 사용해야 한다.

감사의 글

이 연구는 한국천문연구원에서 남반구의 칠레, 남아공화국, 호주 천문대에 설치한 KMTNet 시스템으로 얻은 관측영상을 활용하였습니다. 남반구 천문대 현지에서 2015년에 관측을 수행했던 고승원, 김민준, 박희광, 허승진, 조정우, 김동훈, 권민경, 김부진, 임상규님께 감사드립니다.

REFERENCES

- Aune, S., Boulade, O., Charlot, X., et al., 2003, The CFHT MegaCam 40 CCDs Camera: Cryogenic Design and CCD Integration, *Proceedings of the SPIE*, 4841, 513
- Estrada, J., Alvarez, R., Abbott, T., et al., 2010, Focal Plane Detectors for Dark Energy Camera (DECam), *Proceedings of the SPIE*, 7735-1R
- Freyhammer, L. M., Andersen, M. I., Arentoft, T., Sterken, C., & Norregaard, P., 2001, On Cross-talk Correction of Images from Multiple-port CCDs, *Experimental Astronomy*, 12, 147
- Kamata, Y., Miyazaki, S., Nakaya, H., Suzuki, H., Miyazaki, Y., & Muramatsu, M., 2010, Characterization and Performance of Hyper Suprime-Cam CCD, *Proceedings of the SPIE*, 7742-29
- Kim, D. -J., Lee, C. -U., & Kim, S. -L., 2015, Data Transfer Test for KMTNet Data, *PKAS*, 30, 31
- Kim, S. -L., Park, N. -K., Pyo, T. -S., Sung, H., & Lee, S. -W., 1993, Development of the Real-time CCD Photometric Program, *PKAS*, 8, 67
- Kim, S. -L., Kyeong, J., Kwon, S. -G., & Youn, J. -H., 2001, An Observation Program for the SOAO 2K CCD Camera, *PKAS*, 16, 37
- Kim, S. -L., Lee, C. -U., Park, B. -G., et al., 2016, KMTNet: A Network of 1.6m Wide-Field Optical Telescopes Installed at Three Southern Observatories, *JKAS*, 49, 37
- Mohr, J. J., Armstrong, R., Bertin, E., et al., 2012, The Dark Energy Survey Data Processing and Calibration System, *Proceedings of the SPIE*, 8451-0D
- O'Connor, P., 2015, Crosstalk in Multi-output CCDs for LSST, *Journal of Instrumentation*, 10, C05010
- Park, B. -G., Chun, M. -Y., & Kim, S. -L., 1995, Laboratory Test of CCD #1 in BOAO, *PKAS*, 10, 67
- Park, B. -G., Chun, M. -Y., Yuk, I., & Seong, H. -C., 2001, Characteristics of the BOAO 2K CCD camera, *PKAS*, 16, 31
- Park, N. -K., 1993, Development of an Automatized Differential Photometry System for the 61cm Reflector of Sobaeksan Observatory, *PKAS*, 8, 185
- Sung, H. -I., Park, Y. -H., Lee, S. -M., Lee, B. -C., Seong, H. -C., & Oh, H. -I., 2012, The Status and Improvement Plan of the 1.8m Telescope Control System at BOAO, *PKAS*, 27, 95
- Tonry, J. L., Burke, B. E., Isani, S., Onaka, P. M., & Cooper, M. J., 2008, Results from the Pan-STARRS Orthogonal Transfer Array (OTA), *Proceedings of the SPIE*, 7021-05
- Valdes, F. G., 2002, The Reduction of CCD Mosaic Data, in *Automated Data Analysis in Astronomy* (edited by R., Gupta, H. P., Singh, C. A. L., Bailer-Jones; Narosa Publishing House), 309
- Yagi, M., 2012, Crosstalk Analysis of Suprime-Cam FDCCDs Using Cosmic Rays in Dark Frames, *PASP*, 124, 1347