

KASINICS 광학계의 고스트 분석 GHOST ANALYSIS FOR THE OPTICS SYSTEM OF THE KASINICS

이성호¹, 육인수¹, 진호¹, 박수종¹, 한정열^{1,2}, 이대희¹, 공경남¹, 조승현¹, 박영식¹, 박장현¹, 한원용¹
¹한국천문연구원

²과학기술연합대학원대학교

SUNGHO LEE¹, IN-SOO YUK¹, HO JIN¹, SOOJONG PAK¹, JEONG-YEOL HAN^{1,2}, DAE-HEE LEE¹, KYUNG-NAM KONG¹,
SEUNG-HYUN CHO¹, YOUNGSIK PARK¹, JANG-HYUN PARK¹, AND WONYONG HAN¹

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

E-mail: leesh@kasi.re.kr

²Major of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology

(Received November 15, 2005; Accepted December 9, 2005)

ABSTRACT

The re-imaging optics of the KASINICS (KASI Near Infrared Camera System) includes many transparent components like an entrance window, band-pass filters, and blocking filters. As observational targets or in-field background objects, bright stars may cause optical ghosts that can significantly degrade the system performance of the KASINICS. We estimated analytically the relative brightness of ghost components with respect to a point source and examined the effects of tilting optical components as a method of suppressing ghosts. We also performed numerical ray tracings including all the optical components and found the results are consistent with those of the analytic estimations. We conclude that the KASINICS will not suffer from significant ghost effects with appropriate anti-reflection coatings and tiltings for the optical components.

Key words: instrument, optics, infrared, imaging, ghost

1. 서론

한국천문연구원에서는 2004년부터 3년의 계획으로 지상 망원경용 근적외선 카메라 KASINICS (KASI Near Infrared Camera System)를 개발하고 있다. KASINICS는 소백산 천문대의 61 cm 망원경에 장착되어 J, H, Ks, L 밴드의 파장대에서 목성형 행성의 대기, 장주기 변광성, 변광 AGN 등의 천체 관측에 사용될 예정이다. 광학 망원경에 적외선 카메라를 장착하기 위해 KASINICS는 1:1 Offner 릴레이를 사용한 2차 광학계를 포함하고 있다 (육인수 외 2005). KASINICS의 광학계에는 입사창, 밴드 투과 필터, PK50 차단 필터 (blocking filter) 등 다수의 투과성 광학부품들이 포함되어 있는데, 이러한 부품들은 KASINICS의 관측 대상 중 MIRA 변광성 등 밝은 별들에 대해 고스트 현상을 유발할 가능성이 있으므로 그 효과를 검토할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 KASINICS 광학계에서 발생할 수 있는 고스트의 종류와 강도를 예측하고 해결방안을 검토한다.

고스트 현상은 일반적으로 밝은 광원의 영상 주변에

실제로는 존재하지 않는 원형의 상이 촬영되는 것을 말하며, 광학계의 성능을 저하시키는 주된 요인 중 하나이다. 고스트 현상은 카메라 광학계의 투과성 광학부품의 표면에서 빛이 완전히 투과되지 못하고 부분 반사되어 발생한다. 부분 반사는 투과면 양쪽의 굴절률 차이에서 비롯되며, 주로 광학부품 자체의 두 면 사이나 인접한 다른 광학부품과의 표면 사이에서 부분 반사된 빛들이 초점면에서 고스트 영상을 형성한다 (그림 1).

고스트 현상이 촬영된 상에 미치는 영향을 예측하는 것은 광학계 성능 결정에서 중요한 부분을 차지한다. 또한, 광학부품 각각이 고스트 현상 유발에 기여하는 정도를 분석하면 고스트 효과의 억제 방법을 도출할 수 있다. 고스트 영상은 대상체 영상의 초점이 맞지 않은 복사판이라고 말할 수 있다. 이 때, 초점에서 벗어난 정도는 부분 반사 과정에서 연장된 광경로에 따라 달라지므로 고스트 현상을 발생시킨 광학 부품에 따라 다르게 된다.

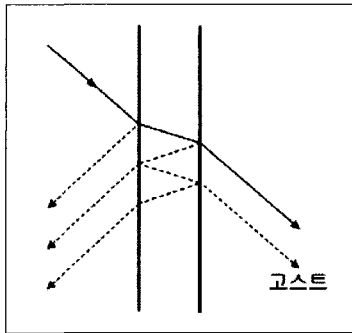


그림 1. 고스트 현상의 원리. 두 개의 평행면 사이에서 부분 반사된 빛들 중 검출기 쪽으로 향하는 빛이 고스트가 된다.

점광원의 경우, 광경로가 길어질수록 고스트 영상의 직경은 커지고 세기는 감소한다. 두 개의 인접한 평행면 사이에서 발생하는 고스트 영상의 밝기 I_G 와 점광원 영상의 밝기 I_P 의 비는 다음 식으로 표현할 수 있다 (Jacoby et al. 1998).

$$\frac{I_G}{I_P} = R_1 \cdot R_2 \cdot \left(\frac{D_p}{d/f} \right)^2 \quad (1)$$

이 때, R_1 과 R_2 는 각 면의 반사율, D_p 는 점광원 영상의 크기, d 는 두 면 사이의 거리, f 는 입사광의 f-ratio이다. 그러나 퍼진광원의 경우에는 광원의 각 지점에서 유래된 고스트 효과들이 중첩되므로 고스트 영상의 세기가 광경로에 무관하고 광학 부품 표면의 반사율에 비례한다.

고스트 현상의 억제에는 광학부품 표면에 대한 무반사 코팅, 광학부품의 기울임 (tilting), 췌기형 (wedge) 광학부품 사용 등의 방법들이 주로 이용된다. 이러한 억제 방법을 사용하면 광학부품 표면의 반사율을 낮추거나 고스트 영상을 퍼지게 해서 고스트 효과의 세기를 허용 수준으로 감소시킬 수 있다. 그러나 경우에 따라서는 고스트 효과에 대한 허용 수준에 도달하기 위해 광학계 설계 자체를 변경해야 할 수도 있다. 한편, 기울임 방법을 사용하면 고스트를 유발하는 광학부품에 따라 고스트 영상의 성분을 초점면 상의 서로 다른 지점으로 분리하여 구분할 수도 있다. 이 때, 기울임에 의해 발생하는 분광학적 분산 효과는 췌기형 광학부품의 사용으로 보상할 수 있다.

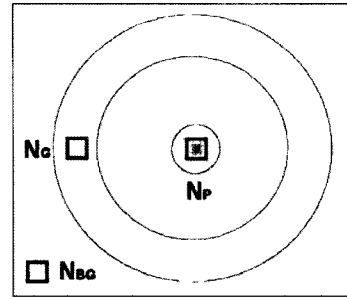


그림 2. 점광원 관측시의 고스트 영상 모식도. 중앙의 원반이 점광원, 둘레의 고리형 영상이 고스트에 해당하며 사각형들은 센서의 픽셀을 나타낸 것이다. N_P , N_G , N_{BG} 는 각각 점광원 중심, 고스트 영상의 최고점, 배경복사 영역에서의 검출 전자 개수를 의미한다.

2. 고스트 효과 측정의 기준

어떤 별 (점광원)을 관측할 때, 그로 인해 발생하는 고스트 영상의 최고점 밝기가 적외선 센서의 노이즈보다 작아서 검출되지 않는다면 고스트 효과를 무시할 수 있다. 이 조건은 적외선 센서의 노이즈 중 배경 복사에 의한 성분이 지배적이라고 가정하면 다음 식으로 표현된다.

$$N_G = N_P \times \frac{I_G}{I_P} < \sqrt{N_{BG}}$$

$$\frac{I_G}{I_P} < \frac{\sqrt{N_{BG}}}{N_P} \quad (2)$$

여기서 N_G 는 고스트 영상의 최고점에서의 픽셀당 검출 전자 개수, N_P 는 정상 (별 영상)의 중심에서의 픽셀당 검출 전자 개수, I_G/I_P 는 별과 고스트의 밝기의 비, N_{BG} 는 배경복사의 픽셀당 검출 전자 개수를 의미한다 (그림 2 참조). 밝은 별일수록 (N_P 가 클수록) 고스트 효과가 강해지며 더욱 엄격한 I_G/I_P 조건을 요구하게 된다. 경우에 따라서는 1장에서 소개한 방법들을 이용하여 I_G/I_P 를 낮추어야 한다.

그러면 KASINICS 광학계의 고스트 특성을 검토하기에 앞서 고스트 효과 측정의 기준을 마련하기 위해, KASINICS를 사용하여 0등급 별 (Vega)을 관측하는 경우에 고스트가 검출되지 않을 I_G/I_P 조건을 도출해 보자. 물론 실제로는 0등급의 매우 밝은 별을 관측할 가능

표 1. KASINICS 고스트 계산에 필요한 인자들

Parameters	J	H	Ks	L	Reference
D_t	0.61 m				강지나 외 2004
D_h	0.19 m				
A	0.26 m ²				
픽셀 각크기	0.676 arcsec				
QE	0.9				
TE	0.49	0.49	0.48	0.37	문봉곤 외 2004
N_{ph} (개/sec/m ²)	3.23×10^9	2.77×10^9	1.49×10^9	7.02×10^8	Cox 2000
PSF 크기 (FWZL)	2.94"	2.83"	2.74"	2.76"	
$R_{pixel/total}$	0.48	0.51	0.53	0.52	
N_{BG} (개/sec, 겨울)	400	700	400	200,000	강지나 외 2004

성은 없지만 밝기의 기준으로서 의미가 있다. 먼저 N_P 는 다음의 식으로부터 계산된다.

$$N_P = N_{ph} \cdot TE \cdot QE \cdot A \cdot t \cdot R_{pixel/total}$$

$$A = \frac{\pi}{4} (D_t^2 - D_h^2) \quad (3)$$

이 때, N_{ph} 는 Vega로부터 들어오는 광자 flux (단위는 개/sec/m²), TE 는 KASINICS와 소백산 61 cm 망원경을 포함한 전체 광학계의 전달효율, QE 는 적외선 센서의 양자효율, t 는 노출시간, $R_{pixel/total}$ 는 별의 전체 flux 중에서 중심 픽셀에 들어오는 flux의 비, A 는 망원경의 집광 면적, D_t 는 망원경 주경의 직경, D_h 는 카세그레인 hole의 직경이다. 각 인자들에 대한 실제 값들은 표 1에 나타내었다.

$R_{pixel/total}$ 는 2차원 가우시안 PSF를 가정하여 계산하며, 이 때 PSF의 크기는 소백산 망원경의 시상(seeing) 효과와 회절 효과가 결합된 것으로 가정하고 다음과 같이 계산한다. KASINICS 카메라의 광학계에 의한 상의 퍼짐은 망원경 회절 효과에 비해 충분히 작아서 무시될 수 있도록 설계되었기 때문에 고려하지 않는다. 시상의 반치폭 (Full Width at Half Maximum: FWHM)은 V 밴드 (중심 파장 0.56 μm)에서 측정된 값 (2.0 arcsec; 문봉곤 외 2004)과 $\lambda^{-0.2}$ 관계식 (Glass 1999)을 이용하여 추정하고 이로부터 영치폭 (Full Width at

Zero Level) $FWZL \approx \frac{4 \cdot FWHM}{2.354}$ 을 계산한다. 회절 효과에 의한 Airy 디스크의 FWZL 크기는 $1.22 \times \frac{D_t}{\lambda}$ (Zeilik & Gregory 1998)로부터 계산하며, 시상 효과와 회절 효과의 결합은 가우시안 중첩적분 (convolution)을 가정하여

$$\sqrt{FWZL_{seeing}^2 + FWZL_{diffraction}^2}$$

으로 계산한다. 그림 3에 관측 파장에 따른 계산 결과를 나타내었다. 그림에서 굵은 파선은 적외선 센서 픽셀의 각크기를 나타낸 것인데 Nyquist 샘플링 조건을 충분히 만족함을 알 수 있다.

고스트가 검출되지 않을 조건을 구하는 식 (2)에서 필요한 다른 하나의 인자인 N_{BG} 는 강지나 외 (2004)에서 추정된 값을 사용한다. 이 때, 관측 조건은 겨울철을 가정하는데 이는 배경복사량이 가장 적은 상황이므로 고스트 조건이 가장 엄격한 경우이다.

그림 4는 고스트 효과 측정의 기준으로서 KASINICS를 사용하여 0등급 별을 관측하는 가정 하에 고스트가 검출되지 않을 I_G/I_P 조건의 계산결과를 나타낸 것이다. 노출시간이 길어질수록 고스트 허용 조건이 엄격해지며, 배경복사가 강한 L 밴드에 비해 J, H, Ks 밴드의 고스트 허용 조건이 약 100배 정도 더 엄격함을 알 수 있다.

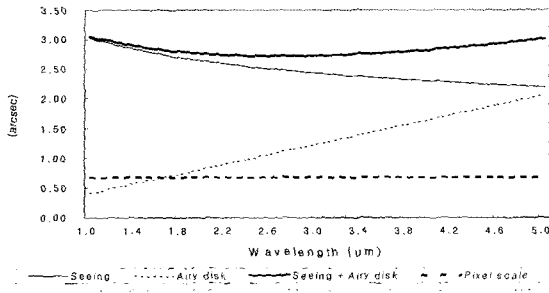


그림 3. 근적외선 파장대에서의 소백산 61cm 망원경의 PSF 크기와 KASINICS 픽셀 각크기.

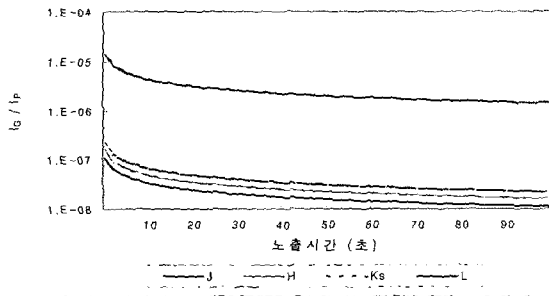


그림 4. KASINICS 고스트 효과 측정의 기준. 0등급 별에 대해 고스트 영상이 검출되지 않을 I_G/I_P (고스트와 별의 밝기의 비) 조건이다.

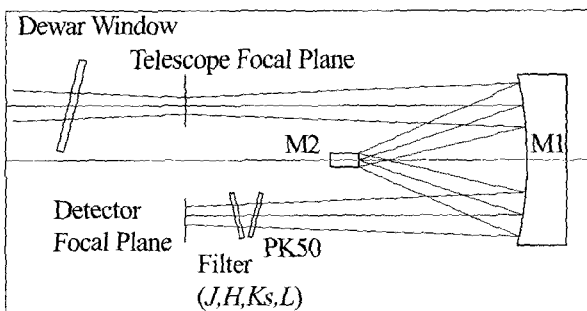


그림 5. KASINICS 광학계 구성도. M1, M2는 각각 1:1 Offner 릴레이의 주경과 부경이다.

3. KASINICS 광학계의 고스트 특성

고스트 현상은 주로 인접한 두 개의 광학면 사이에서 발생한다. KASINICS 광학계 (그림 5)에서 고스트가 발생할 수 있는 구간은 적외선 센서와 필터 사이, 필터의 내부, PK50 차광필터의 내부, J 또는 H 밴드 관측시 필터와 PK50 사이, 입사창 내부의 총 5가지 경우이며, 필터 내부의 경우에는 필터의 두께와 굴절률에 따라 다시 J/H/Ks 밴드와 L 밴드의 2가지로 구분된다. 이 절에서는 각각의 경우에 대해 점광원과 고스트의 밝기의 비 (I_G/I_P), 고스트 영상의 크기 (D_G)를 추정한다. 이 때, 그림 5에서와 달리 입사창과 필터들은 기울임 없이 광축에 수직으로 장착되어 있다고 가정한다. 광학부품들의 기울임에 대한 효과는 다음 절에서 검토한다.

먼저, 점광원과 고스트의 밝기의 비 I_G/I_P 는 식 (1)을 이용하여 계산할 수 있다. 여기서는 별의 중심 픽셀로의 입사광과 고스트 최고점 픽셀로의 입사광의 비를 구하는 것이 목적이므로 D_p 는 픽셀 각크기 (0.676 arcsec)를 사용한다.

위에서 소개한 KASINICS에서 고스트가 발생하는 경우는 광학계의 배치 관계 및 광경로에 따라 크게 3가지로 분류되는데 그림 6, 7, 8은 각각의 경우에 대해 고스트 영상을 형성하는 빛의 경로에 대한 모식도를 나타낸 것이다. 그림 6에서 적외선 센서-필터 사이의 경우에는 고스트 영상의 크기가 다음의 식에 의해 계산되는 것을 쉽게 알 수 있다.

$$D_G = 2 \cdot d \cdot (2i) = 2 \cdot d \cdot \frac{1}{f} = \frac{2d}{f} \quad (4)$$

그 외의 경우에는 그림 9로부터 다음의 식으로 계산되는 것을 알 수 있다.

$$D_G = 2 \cdot 2di' \quad (5)$$

스넬의 법칙 $\sin i' = \frac{\sin i}{n}$ 에서 i 가 작은 경우

$i' = \frac{i}{n}$ 로 근사되므로 (n 은 굴절),

$$D_G = \frac{4di}{n} = \frac{2d}{nf} \quad (6)$$

물그런데, 앞서 살펴본 식 (4)의 적외선 센서-필터 사이의 경우도 식 (6)에서 $n = 1$ 인 경우와 마찬가지로 고스트 영상의 크기는 다음 식으로 정리된다.

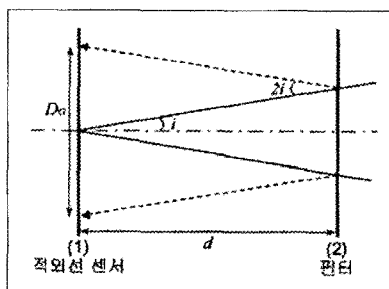


그림 6. 적외선 센서와 필터 사이 고스트의 광경로

$$D_G = \frac{2d}{nf} \quad (7)$$

표 2에 고스트 발생 구간의 간격 (d), 굴절률 (n), 반사율 (R_1, R_2 ; 숫자는 그림 6, 7, 8, 9에 표시된 반사면의 번호)과 이 값들을 이용하여 식 (1), 식 (7)로부터 계산한 고스트 영상의 강도 (I_G/I_P) 및 직경 (D_G)를 나타내었다 (이 때, $f = 13.5$). 그림 10은 실제 관측시 예상되는 적외선 센서 상에서의 고스트 영상의 상대적인 크기를 비교한 것이다.

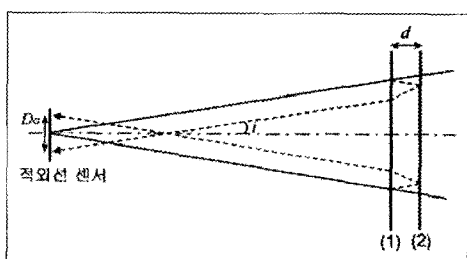


그림 7. 필터 내부, 차광필터 PK50의 내부, 필터와PK50 사이에서 발생하는 고스트의 광경로

표 3은 여러 관측기기들의 고스트 허용 조건 (I_G/I_P)을 정리한 것이다. 여기에 비추어 볼 때, $I_G/I_P = 10^{-8} \sim 10^{-6}$ 인 KASINICS의 고스트 효과는 충분히 낮은 수준이라고 할 수 있다. 그림 10에서 가장 큰 고스트 영상 성분은 적외선 센서와 필터 사이에서 발생하는 것이다. 그러나 이 성분은 넓게 퍼져있기 때문에 고스트 영상의 세기가 약해서 I_G/I_P 값이 2절에서 구한 0등급 별 관측시 고스트를 무시할수 있는 수준에 근접한다 (그림 4 참조). 나머지 고스트 성분들은 크기는 작지만 상대적으로 세기가 강해서 만약 0등급 정도의 밝은 별을 관측해야 한다면 문제가 될 수도 있을 것이다. 이런 경우에는 고스트 영상을 초점면 상에서 이동시켜서 별의 영상과 분리하는 것으로 문제를 해결할 수 있는데, 광학 부품의 기울임으로 구현 가능하며 다음 절에서 검토한다.

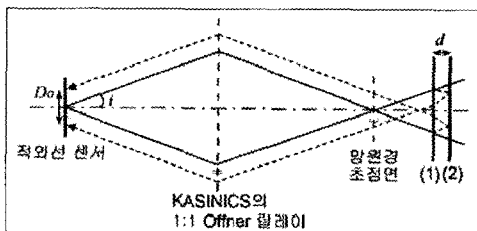


그림 8. 입사창 내부에서 발생하는 고스트의 광경로. Offner 광학계의 특성상 적외선 센서 상의 고스트 영상의 크기는 망원경 초점면 상의 크기와 같다.

표 2의 계산 결과로부터 가장 강한 고스트 성분의 세기를 기준으로 하여, KASINICS 관측시 고스트가 발생하지 않는 별의 관측 한계등급을 계산하였다 (그림 11). 즉, 해당 노출시간에 대해서 이 한계등급보다 어두운 별에 의해 발생한 고스트 영상은 적외선 센서의 노이즈 수준보다 어두워서 검출되지 않는다.

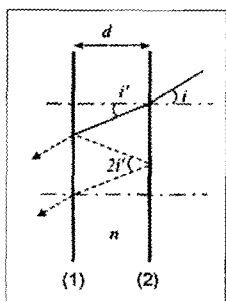


그림 9. 그림 7 및 그림 8 고스트 발생 구간의 세부 광경로

4. 광학부품 기울임 (tilting)의 효과

고스트를 억제하는 가장 대표적인 방법 중 하나인 광학 부품 기울임은 인접한 두 광학부품들 사이의 공간을 쐐기형 (wedge)으로 만들어 고스트 형성을 방지하며, 초점면에서 고스트 영상을 이동시켜 다른 영상 성분과 분리시키는 역할을 한다.

KASINICS에 기울임을 적용할 경우, 적외선 센서-필터 간의 고스트, PK50-J/H 필터 간의 고스트를 쐐기형 공간 효과로 제거하는 것이 가능하며, 나머지 각각의 필

표 2. KASINICS 광학계의 고스트 특성 계산 결과

고스트 발생 구간	d (mm)	n	R_1	R_2	I_G/I_P	D_G (mm)	D_G (pixel)
적외선 센서-필터 사이	45.8	1.0	0.1	0.01	6.33×10^{-8}	6.79	251.47
J, H, Ks 필터 내부	4.1	1.5	0.01	0.01	7.90×10^{-7}	0.40	15.00
L 필터 내부	2.1	3.4	0.01	0.01	3.01×10^{-6}	0.09	3.39
PK50 내부	3.2	1.5	0.01	0.01	1.30×10^{-6}	0.32	11.71
PK50-J/H 필터 사이	17.0	1.0	0.01	0.01	4.60×10^{-8}	2.52	93.28
입사창 내부	6.35	1.4	0.03	0.03	2.97×10^{-6}	0.67	24.89

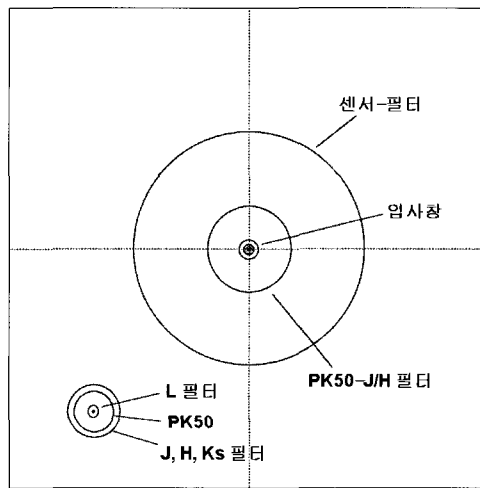


그림 10. KASINICS 광학계의 고스트 영상 분포. 그림의 면적은 512×512 픽셀 적외선 센서에 해당하며 고스트 영상 성분들의 상대적인 크기는 표 2의 값에 따라 표시하였다. 왼쪽 아래 그림은 중앙의 입사창 고스트 안쪽을 4배 확대시켜 놓은 것이다.

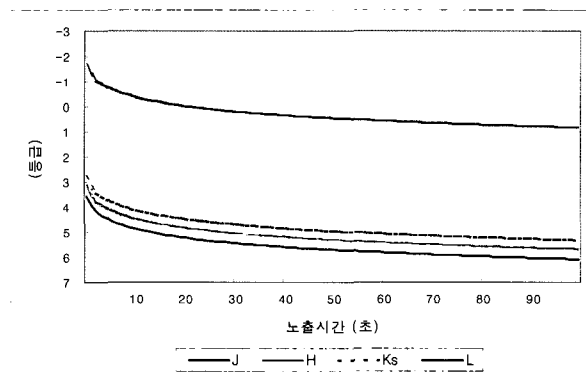


그림 11. KASINICS로 별을 관측할 때 고스트가 발생하지 않는 한계등급

표 3. 관측기기별 고스트 허용 조건

관측기기	I_G/I_P	참고문헌
GMOS/Gemini	1×10^{-3}	Murowinski et al. 2003
PISCES/LAT	3×10^{-3}	McCarthy et al. 2001
SARG/TNG	1×10^{-5}	Gratton & Claudi 1998
MOIRCS/Subaru	1×10^{-5}	Suzuki et al. 2003
WIRCAM/CFHT	1×10^{-3}	Thibault et al. 2003
NIFS/Gemini	1×10^{-7}	McGregor 2000
NIC-FPS/ARC	1×10^{-8}	Vincent et al. 2003

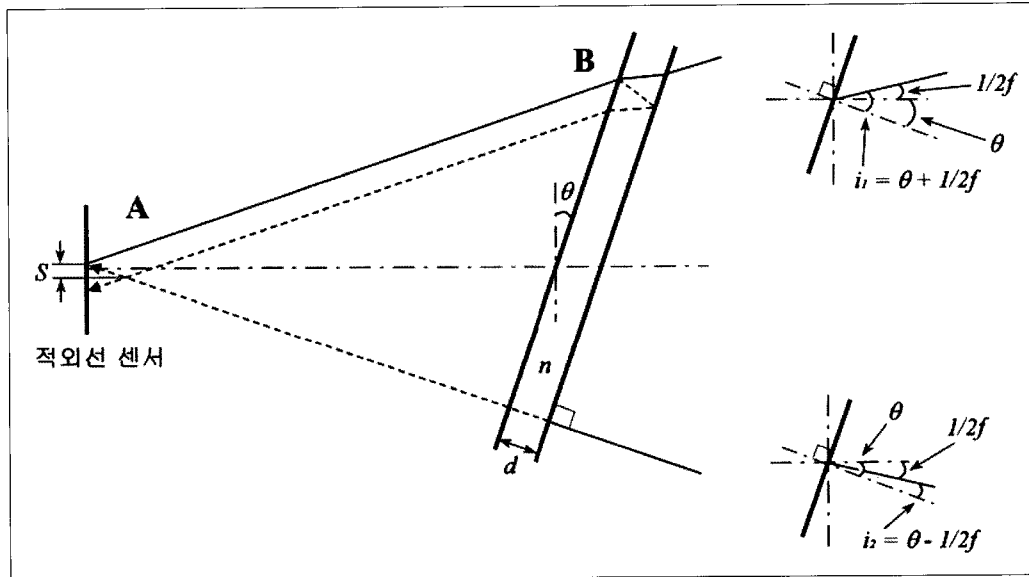


그림 12. 광학부품의 기울임 (tilting)과 초점면 상에서의 고스트 영상의 이동. θ 는 기울임 각도이며 오른쪽의 두 개의 작은 그림들은 beam의 양 끝단에서의 필터면에 대한 입사각이 기울임에 의해 어떻게 달라지는지 보여준다.

터와 입사창 내부에서 발생하는 고스트들의 경우에는 그림 12에서와 같은 원리에 의해 별의 중심 위치로부터 고스트 영상을 이동시킨다.

이 때, 고스트 영상의 이동량은 그림 13으로부터 다음 식과 같이 계산된다.

$$S = \frac{h_1}{2} + \frac{h_2}{2} = \frac{h_1 + h_2}{2} \quad (8)$$

여기서, 고스트 광경로 한쪽 끝단의 수직이동량 h 는 그림 14으로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{2d \tan i'}{\sin(\pi - \theta - \frac{\pi}{2} + i)} = \frac{h}{\sin(\frac{\pi}{2} - i)}$$

$$h = \frac{2di}{n} \frac{\cos i}{\cos(\theta - i)} \quad (9)$$

표 4는 KASINICS 광학계에 사용되는 투과성 광학 부품들에 대해 두께 (d), 굴절률 (n), 적용 검토 중인 기울임 각도 (θ)와 그에 따른 고스트 이동량 계산 결과를 보여준다. 광학부품에 따라 기울임 방향이 다른 것은 인

접한 두 개의 광학부품 사이를 썬기형으로 만들어 고스트 발생을 방지하기 위해서이다. 그림 15은 기울임 적용시 예상되는 적외선 센서 상에서의 고스트 영상의 상대적인 위치와 크기를 표 4의 계산 결과에 따라 표시한 것이다. 기울임 방향에 따라 광학부품별 고스트 성분이 성상의 양쪽으로 나뉘어 이동된 것을 볼 수 있다. 기울임을 적용하지 않은 그림 10과 비교할 때, 적외선 센서-필터 간의 고스트, PK 50-J/H 필터 간의 고스트는 썬기형 공간 효과로 제거되었다.

5. 광선추적 (ray tracing) 수치계산

앞에서 얻은 해석학적 계산 결과들을 검증하기 위해 수치계산 방법으로 광선추적 (ray tracing)을 수행하였다. 앞 절들의 계산에서는 KASINICS 광학계 (그림 5)의 각 부분들을 고스트 성분별로 나누어 각각의 경우를 독립적으로 취급하였으나, 여기서는 광선추적을 통해 모든 광학계의 효과를 동시에 고려한다. 또한 수치계산에서는 모든 광학부품들의 위치와 각도가 설정되므로 기울임 효과도 함께 고려된다. 단, 사용하는 필터에 따라 광학적 물성이 다르고 광학계의 구성 또한 달라지므로 이를 구분하여 검토할 필요가 있다. 따라서 PK50을 겹쳐서 사용하는 J, H 필터의 경우, Ks 필터의 경우, L 필터의 경우 3가지로 나누어 살펴본다. 표 5, 6, 7은 각각의 경우에 대해 성분별 고스트 영상의 센서 중심으로부터의 상대위치와 크기를 광선추적을 통해 계산한 결과이다. J, H 필터의 경우에는 PK50을 겹쳐 사용하므로 PK50 내부와 PK50-필터 사이에서도 고스트가 발생한다. 앞 절에서 예상한 바와 같이, 광학부품의 기울임에 의해 썬기 효과가 발생하여 PK50-필터 간의 고스트 및 필터-센서 간의 고스트는 약 14 mm 크기의 센서 밖으로 완전히 벗어나서 검출되지 않음을 알 수 있다.

수치계산 결과를 표 2, 4의 해석학적 계산 결과와

비교하면 대체로 잘 맞는다. 광학부품 기울임에 의한 고스트 이동량은 약 10% 차이 내에서 맞는데, 이는 해석학적 계산에서와 달리 수치계산 광선추적에 Offner 반사경들을 비롯한 모든 광학부품들이 동시에 포함되기 때문인 것으로 여겨진다. 고스트 영상의 크기는 해석학적 계산 결과들이 대부분 더 큰 것은 RMS 크기로 정의한 수치계산에서와 달리 고스트 영상의 최외각 크기로 정의되었기 때문이다. 단, PK50-필터 간의 고스트 및 필터-센서 간의 고스트의 경우 수치계산 결과가 더 큰 것은 광학부품 기울임에 의한 썬기 효과가 포함되었기 때문이다.

그림 16, 17, 18은 각각 J, H 필터, Ks 필터, L 필터를 사용할 경우에 대해 고스트 영상의 적외선 센서 상의 분포를 나타낸 것이다. 각 영상들의 크기는 식별을 용이하게 하기 위해 두 배로 확대 표시하였다. 그림 15의 해석학적 예상 결과와 대체로 잘 맞는다. 그림 19는 광선추적을 통해 얻은 성상과 고스트 영상들의 스폿 다이어그램 (spot diagram)들이다. 성상이 세로로 길게 늘어난 것은 비축광학계인 Offner 릴레이에 의해 발생한 비점수차 때문이다.

6. 결론 및 토의

그림 11은 KASINICS로 관측할 때 고스트 문제 발생 가능성이 있는 밝은 별의 등급을 보여준다. 그러나 L 밴드에서는 실제 노출 가능한 시간이 1초 미만이므로 고스트 발생 가능성이 거의 없다. 나머지 J, H, Ks 밴드에서는 3-6 등급보다 밝은 별은 해당 노출시간에서 과노출 (saturation)되므로 결론적으로 관측 대상에 대한 고스트 문제는 없을 것으로 예상된다. 다만, 고스트 한계등급 이상의 밝은 별이 관측 대상 근처에 존재할 경우 고스트 영상에 의해 국부적으로 배경하늘의 밝기가 고르지 않아 관측 대상의 측광 등에 영향을 미칠 수 있다.

표 4. 광학부품 기울임에 의한 고스트 영상의 이동량

광학부품	d (mm)	n	θ (deg)	h_1 (mm)	h_2 (mm)	S (mm)	S (pixel)
PK50	3.2	1.5	-15	1.22	0.94	1.08	39.90
J, H, Ks 필터	4.1	1.5	+15	1.56	1.20	1.38	51.13
L 필터	2.1	3.4	+15	0.35	0.27	0.31	11.55
입사창	6.35	1.4	-15	2.59	1.99	2.29	84.84

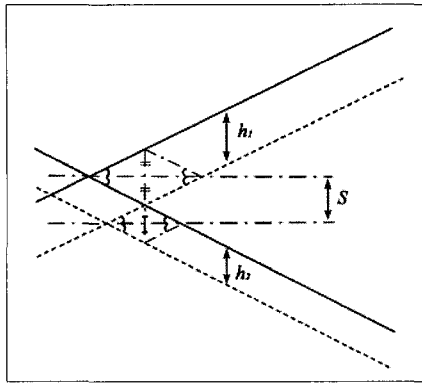


그림 13. 초점면 상에서의 고스트 영상의 이동량. 그림 12의 A 부분 확대.

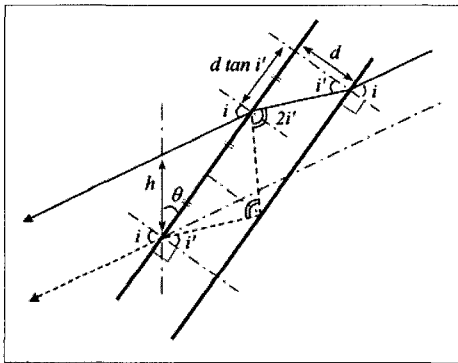


그림 14. 고스트 광경로 한쪽 끝단의 수직 이동량. 그림 12의 B 부분 확대.

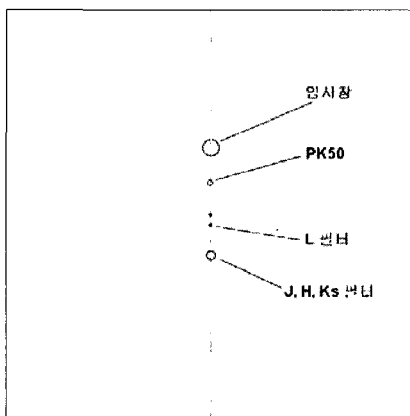


그림 15. KASINICS 광학부품에 기울임을 적용할 경우 고스트 영상의 분포. 512×512 픽셀 적외선 센서 상에서의 고스트 성분별 위치와 크기를 표 4의 계산 결과에 따라 나타내었다.

표 5. J, H 필터의 경우 고스트의 상대위치와 크기. 성상의 크기는 0.027mm (0.95pixel)이다.

	상대위치 (mm)	RMS 크기 (mm)	RMS 크기 (pixel)
윈도우	1.998	0.382	13.65
PK50	0.935	0.167	5.97
PK50-필터	-115.983	8.235	294.10
필터	-1.204	0.221	7.88
필터-센서	25.300	5.576	199.14

표 6. Ks 필터의 경우 고스트의 상대위치와 크기. 성상의 크기는 0.029mm (1.05pixel)이다.

	상대위치 (mm)	RMS 크기 (mm)	RMS 크기 (pixel)
윈도우	1.998	0.434	15.49
필터	-1.204	0.272	9.71
필터-센서	25.338	5.641	201.46

표 7. L 필터의 경우 고스트의 상대위치와 크기. 성상의 크기는 0.026mm (0.92pixel)이다.

	상대위치 (mm)	RMS 크기 (mm)	RMS 크기 (pixel)
윈도우	1.998	0.431	15.38
필터	-0.269	0.080	2.84
필터-센서	25.858	5.753	205.47

그러나 이 경우에도 가장 넓은 영향 범위를 가지는 적외선 센서-필터 간의 고스트와 PK50-J/H 필터 간의 고스트는 광학부품의 기울임 방법으로 제거할 수 있다. 또한 현재는 필터들에만 무반사 (anti-reflection) 코팅을 적용한 상태이지만 향후 실제 관측에서 고스트 문제가 나타나면 입사창과 적외선 센서 표면에도 무반사 코팅을 적용할 수 있다.

참고문헌

강지나, 이성호, 진호, 박수종, 문봉곤, 김상호, 박장현, 2004, 한국우주과학회지, 21, 467
 문봉곤, 이성호, 박수종, 진호, 김용하, 육인수, 한원용, 2004, 한국우주과학회지, 21, 453

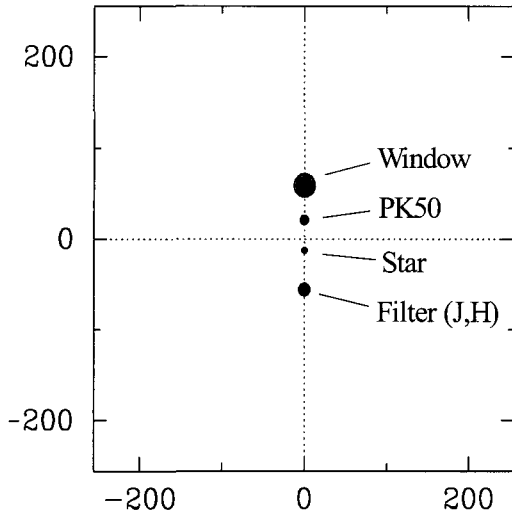


그림 16. J, H 필터를 사용한 경우의 고스트 영상. 축의 단위는 픽셀이며 고스트 영상의 크기는 두 배로 확대되었다.

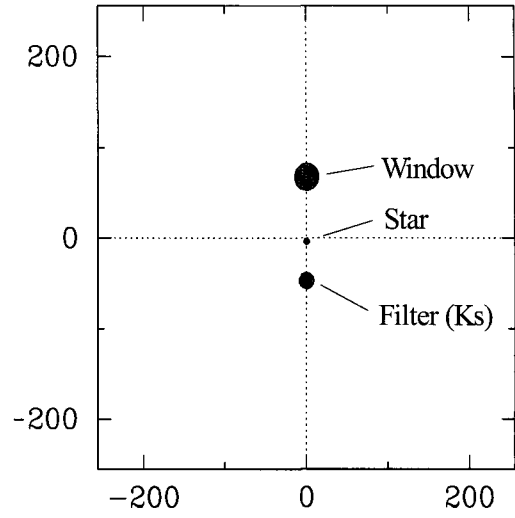


그림 17. Ks 필터를 사용한 경우의 고스트 영상. 나머지 사항은 그림 16과 같다.

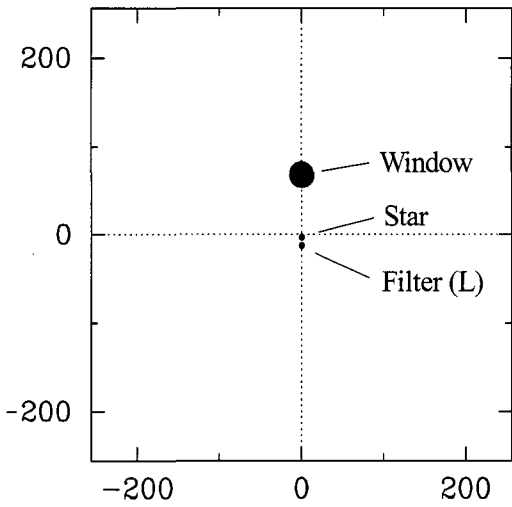


그림 18. L 필터를 사용한 경우의 고스트 영상. 고나머지 사항은 그림 16과 같다.

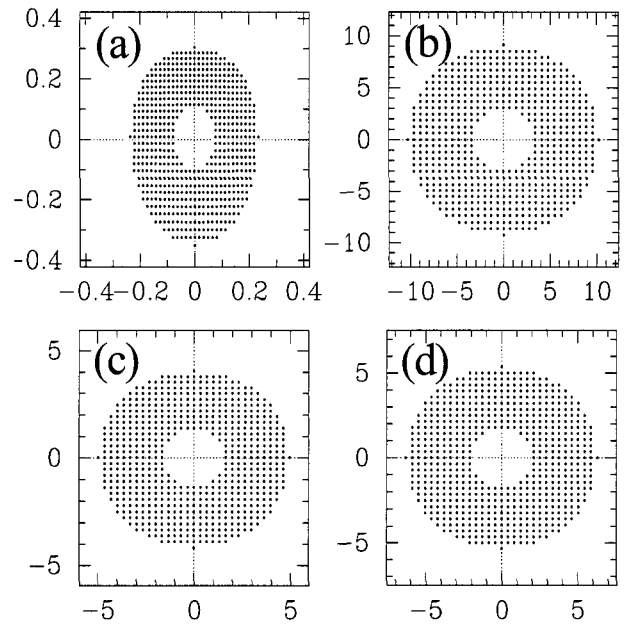


그림 19. 검출기 중심에서의 스팟 다이어그램 (spot diagram). 단위는 픽셀로서 (a) 정상, (b) 입사창에서 발생한 고스트 영상, (c) PK50에서 발생한 고스트 영상, (d) 필터에서 발생한 고스트 영상이다.

- 육인수, 이성호, 진호, 선광일, 박수중, 이대회, 남육원, 문봉곤, 차상목, 한정열, 경재만, 김건희, 양진석, 2005, 천문학논총, submitted
- Cox, A. N., 2000, Allen's astrophysical quantities, 4th ed. (London: AIP press)
- Glass, I. S., 1999, Handbook of infrared astronomy (Cambridge:Cambridge University Press)
- Gratton, R. G. & Claudi, R., 1998, SARG Optics Specifications (Padova: TNG), Document SARG-D001
- Jacoby, G. H. et al., 1998, SPIE, 3355, 721
- McCarthy, D. W. et al., 2001, PASP, 113, 353
- McGregor, P. J., 2000, Gemini NIFS Ghost Image Analysis (Canberra: AUSTRALIAN NATIONAL UNIVERSITY), System Design Note 5.09
- Murowinski, R. et al., 2003, SPIE, 4841, 1440
- Suzuki, R. et al., 2003, SPIE, 4841, 307
- Thibault, S. et al., 2003, SPIE, 4841, 932
- Vincent, M. B. et al., 2003, SPIE, 4841, 367
- Zeilik, M. & Gregory, S. A., 1998, Introductory Astronomy & Astrophysics, 4th ed. (Troy: Saunders College Publishing)