

우주탐재용 적외선카메라 시험모델의 광학계 설계

이대희^{1†}, 박수종¹, 육인수¹, 남옥원¹, 진호¹, 이성호¹, 한정열^{1,2},
양형석³, 김동락³, 김건희³, 박성제⁴, 김병혁⁵, 정한⁵
¹한국천문연구원, ²과학기술연합대학원대학교
³한국기초과학지원연구원, ⁴한국기계연구원, ⁵(주) 아이쓰리시스템

DESIGN OF THE OPTICAL SYSTEM FOR A PROTOMODEL OF SPACE INFRARED CRYOGENIC SYSTEM

Dae-Hee Lee^{1†}, Soojong Pak¹, In-Soo Yuk¹, Uk-Won Nam¹, Ho Jin¹, Sungho Lee¹
Jeong-Yeol Han^{1,2}, HyungSuk Yang³, Dong Lak Kim³, Geon-Hee Kim³,
Seong-Je Park⁴, Byung-Hyuk Kim⁵, and Han Jeong⁵

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

²University of Science & Technology, Daejeon 305-348, Korea

³Korea Basic Science Institute, Daejeon 305-333, Korea

⁴Korea Institute of Machinery & Materials, Daejeon 305-343, Korea

⁵i3system Co., Daejeon 305-343, Korea

E-mail: dhlee@kasi.re.kr

(Received May 23, 2005; Accepted November 23, 2005)

요 약

대형 적외선 우주 망원경 개발은 한국천문연구원의 중요 전략 목표의 하나로써 이를 성공시키기 위한 다양한 기술적 노력들이 전개되고 있다. 그 일환으로 한국천문연구원과 한국기초과학지원 연구원은 정책 협동 과제로 한국기계연구원, (주) 아이쓰리시스템과 함께 우주용 적외선 냉각시스템을 개발하고 있다. 본 논문에서는 이렇게 개발중인 우주탐재용 적외선카메라 냉각시스템 시험모델의 광학계를 설계하기 위한 요구 조건을 도출하였으며, 그에 따라 $3.8 \sim 4.8\mu\text{m}$ 적외선 대역에서 $15^\circ \times 12^\circ$ 의 시야를 가지며 각분해능이 0.047° 인 단일 렌즈 카메라 시스템을 설계하였고, 앞으로 더 복잡한 광학계에 대한 기초로 활용하고자 한다.

ABSTRACT

Many technical challenges are being tried for a large space infrared telescope, which is one of the major objectives of the Strategic Technology Road Map (STRM) of KASI (Korea Astronomy and Space Science Institute). As one of these challenges, KASI and KBSI (Korea Basic Science Institute) have started a cooperation project for developing a space infrared cryogenic system with KIMM (Korea Institute of Machinery & Materials) and i3system co. In this paper, we generate optical requirements for the Protomodel of Space Infrared Cryogenic System (PSICS), and design a single lens optical system with a bandpass of $3.8 \sim 4.8\mu\text{m}$, a field of view of $15^\circ \times 12^\circ$, and an angular resolution of 0.047° , to develop a further complex optical system.

Keywords: IR, optical design, cryogenics, space telescope, protomodel

[†]corresponding author

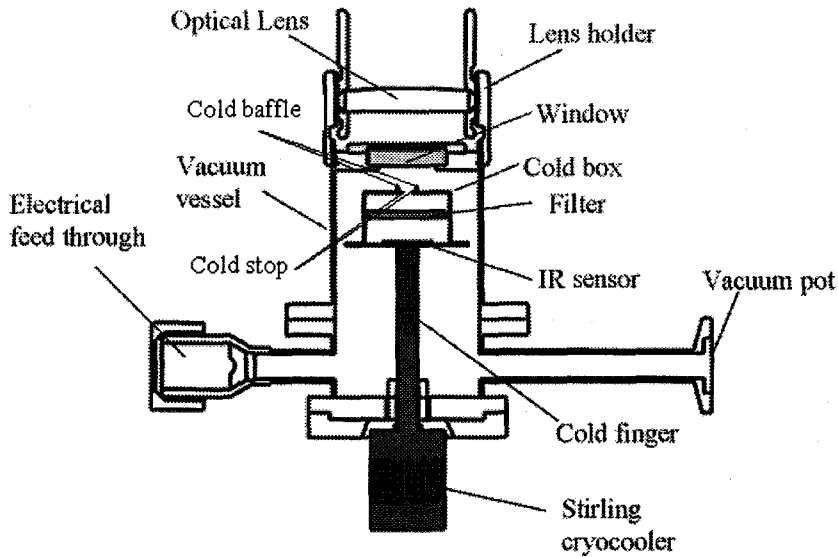


그림 1. PSICS의 개념 설계도(양형석 외 2005).

1. 서론

국제협력을 통한 대형 적외선 우주 망원경 개발은 현재 한국천문연구원에서 기획되고 있는 전략기술지도 상의 중요 목표 중의 하나이다(한국천문연구원 2004). 이러한 적외선 우주 망원경의 기반 기술의 하나로써 우주탑재용 적외선카메라 냉각시스템(Protomodel of Space Infrared Cryogenic System, PSICS)이 개발되고 있다. PSICS는 적외선 센서 및 전자부, 냉각기부, 냉동기부, 그리고 광학계로 이루어져 있으며, (주) 아이쓰리시스템, 한국기초과학지원연구원, 한국기계연구원, 그리고 한국천문연구원이 각각의 부분을 맡아 개발하고 있어서, 순수 국내 기술로 설계, 제작되는 우주탑재용 적외선카메라 냉각시스템이라 할 수 있다. PSICS의 개발 목적은 1) 적외선 검출기용 냉각기를 설계/제작하고, 2) 국산 적외선 센서 시스템을 검증하며, 3) 적외선카메라용 광학계를 설계/제작하며, 4) 이러한 모든 부분을 조립하여 성능 시험을 수행하는 것이다.

본 논문에서는 PSICS의 광학계 요구 조건 및 이에 따른 설계 결과, 잡광 제거용 배플의 설계 및 효과, 그리고 허용 오차 등에 대한 연구 결과를 기술하여 이후의 우주탑재용 적외선카메라 광학계 설계의 참고가 되고자 한다.

2. PSICS 광학계의 요구조건

2.1 PSICS의 구조

그림 1은 PSICS의 대략적인 구조를 보여준다. 스텔링 냉동기의 열부하를 줄이기 위해 냉동기의 cold finger에 적외선 센서와 cold box만 붙여서 77K까지 냉각시킨다. Cold box의 상단에 cold stop 및 cold baffle이 있으며, 내부의 필터는 원하는 파장대의 광자만 통과시킨다. 냉각기에 빛이 내부로 통과할 수 있도록 상부에 창(window)을 만들었으며, 그 위에 렌즈를 장착하였다.

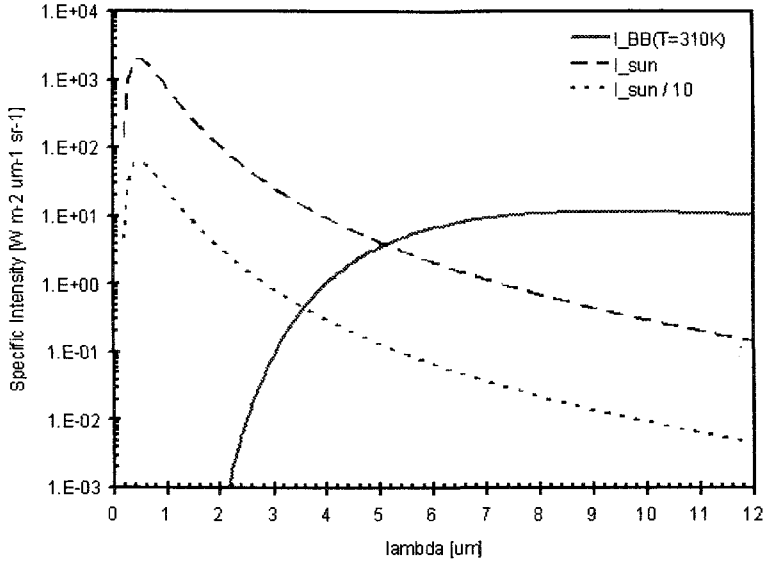


그림 2. 파장에 따른 태양의 복사 세기와 흑체 복사 세기의 비교. 실선은 표면 온도 310K인 흑체의 복사 세기를 보여주고, 긴 점선은 지구 표면에 있는 물체가 받는 태양의 복사 세기를 보여준다. 짧은 점선은 태양 복사 세기의 10%에 해당하는 값이다.

표 1. PSICS 적외선 센서의 특성.

Instrument Parameter	Specification	Comment
Input circuit	Direct Injection	
Reacting band	1 ~ 5μm	NIR
Pixel pitch	30μm	Horizontal & vertical
Array size	320 × 256	Supporting electrical zoom
Chip size	12.2mm×9.8mm	ROIC chip size
Charge storage capacity	17M electrons	~ 2.7pC
Operation flux	1.0E14~3.0E14 photons/cm ² s	NEI = 2E11 photons/cm ² s
Operation temperature	~ 77K	MCT
Median NETD	15mK	Half well fill, 300K target

2.2 관측 파장대

적외선 영상시스템의 파장대는 적외선 관측 환경 및 관측 대상 그리고 검출기의 종류 등에 의해 결정된다(Riedl 1995). 먼저 관측 환경 및 관측 대상의 측면을 보자. 본 연구에서 제작하는 PSICS는 실험실 환경(온도 약 300K)에서 인간의 영상을(온도 약 310K) 관측하여 전체 시스템의 성능을 평가하는 것이 목적이므로, 인간의 흑체 복사 영상을 구하기 위한 적절한 파장대를 사용하면 된다. 이 경우 관측 대상이 반사 또는 산란하는 태양 복사의 세기(intensity, $I_{sun,\lambda}$)와 관측 대상이 스스로 방출하는 흑체 복사의 세기($I_{BB,\lambda}$)를 비교해야 한다. 태양 복사의 세기가 커질 수록 광자 잡음이 커져서 영상 시스템의 효율이 떨어진다.

그림 2는 플랑크의 복사 법칙으로 계산한 흑체 복사의 세기($I_{BB,\lambda}$, 실선으로 표시)와 산란하는 태양 복사의 세기($I_{sun,\lambda}$, 긴 점선으로 표시)의 값을 파장에 따라 보여준다. 맑은 날 실내의 조도가

표 2. PSICS 광부품의 특성.

Optical components	Parameter	Value
Filter (FXWP-3848, Janostech)	Band pass	3.8 ~ 4.8 μ m
	Material	Sapphire
	Diameter	25.4mm
	Thickness	1.02mm
	Clear aperture	20.32mm
	Transmission	88%
Window (A1405V344, Janostech)	Band pass	0.19 ~ 7.2 μ m
	Material	CaF ₂
	Thickness	5mm
	Diameter	25.4mm

실외의 조도보다 대략 10% 미만이고, 실내에서 영상 관측을 수행할 예정이므로 우리는 태양 복사 세기의 10%에 해당되는 값을 짧은 점선으로 표시하여 이를 파장 선택의 기준으로 삼았다. 그림 2를 보면, 흑체 복사 세기가 약 2.2 μ m보다 긴 파장에서 급격히 커져서 약 3.5 μ m에서는 태양 복사 세기의 10%보다 커진다. 따라서 적외선 영상 시스템의 관측 파장이 약 3.5 μ m보다 길어야 함을 알 수 있다.

한편, PSICS에서 사용하는 검출기는 (주) 아이쓰리시스템에서 제작하는 MCT 센서로서, 그 자세한 특성은 표 1에 기술되어 있다. 이 검출기가 5.0 μ m보다 짧은 적외선에 반응하므로 결과적으로 관측 가능 파장대는 3.5 ~ 5.0 μ m가 된다. 따라서, 이 파장대에서 상용으로 구할 수 있는 적외선 필터의 사양에 따라 PSICS의 관측 파장대를 3.8 ~ 4.8 μ m으로 결정하였다.

2.3 광자 잡음

적외선 영상 시스템의 잡음 원인으로는 검출기에 얻어진 광자의 포아송 분포의 불확정성에 의한 광자 잡음에 있다(Vincent 1990). 특히 PSICS의 관측 파장대 3.8 ~ 4.8 μ m에서는 방출되는 관측대상의 흑체 복사 세기가 커서 읽기 잡음 등의 다른 잡음은 무시할 수 있다. 광자 잡음을 계산하기 위해서는 검출기가 감지하는 광자의 수를 관측 대상에서 방출되는 것(N_{obj})과 렌즈와 윈도우 등 광학계에서 방출되는 것(N_{lens} , N_{win})으로 다음과 같이 각각 구분하여 계산한다.

$$\begin{aligned}
 N_{obj}(T_{obj}) &= \epsilon_{obj} \int \left(\frac{I_{\lambda}(T_{obj})}{hc/\lambda} \right) d\lambda \cdot \tau_{lens} \tau_{win} \tau_{filter} \eta \cdot A\Omega \cdot t \\
 N_{lens}(T_{lens}) &= \epsilon_{lens} \int \left(\frac{I_{\lambda}(T_{lens})}{hc/\lambda} \right) d\lambda \cdot \tau_{win} \tau_{filter} \eta \cdot A\Omega \cdot t \\
 N_{win}(T_{win}) &= \epsilon_{win} \int \left(\frac{I_{\lambda}(T_{win})}{hc/\lambda} \right) d\lambda \cdot \tau_{filter} \eta \cdot A\Omega \cdot t
 \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서 ϵ 은 관측 대상과 배경 광학계의 방출률, τ 는 관측 대상과 검출기 사이의 광학계 투과율, η 는 적외선 검출기의 양자 효율, t 는 노출 시간이다. 이 시스템의 광자 잡음은 광자가 포아송 분포를 한다는 가정으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{Noise} = [N_{obj}^2 + N_{lens}^2 + N_{win}^2]^{1/2} \quad (2)$$

표 2에서는 PSICS에 사용되는 광부품인 필터 및 윈도우의 특성을 나타내었다. 필터 및 윈도우의

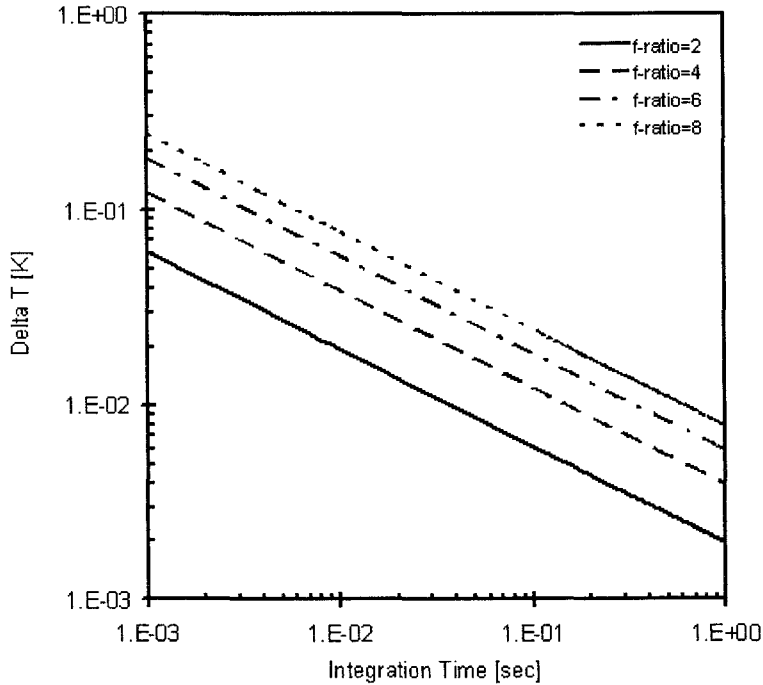


그림 3. 노출 시간에 따른 감도의 변화. 신호대 잡음비를 5로 관측할 수 있는 한계를 온도의 변화 값으로 표시하였다. 광학계의 f-비가 2 (실선으로 표시), 4 (긴 점선), 6 (길고 짧은 점선), 8 (짧은 점선)인 경우에 대해 각각 계산하였다.

크기는 전체적인 시스템의 크기에 준하여 결정되었으며 윈도우의 두께는 냉각기의 진공 압력을 견딜 수 있도록 결정되었다(양형석 외 2005).

2.4 신호대 잡음비

적외선 영상 시스템의 관측 대상은 표면 온도에 의한 흑체 복사의 법칙을 따르기 때문에 시스템의 성능은 주로 온도의 단위로 표시한다. 즉 영상 시스템이 관측할 수 있는 복사 세기의 변화(ΔI)는 온도의 변화(ΔT)로 표시할 수 있다.

$$\Delta I(T) = \Delta T \cdot \frac{d}{dT} I(T) \tag{3}$$

신호대 잡음비(Signal-to-Noise ratio)의 계산에 필요한 신호에 해당하는 관측 대상의 방출 광자수의 변화는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Signal} &= \Delta N_{obj}(T_{obj}) \\ &= \epsilon_{obj} \int \left(\frac{\Delta I_{\lambda}(T_{obj})}{hc/\lambda} \right) d\lambda \cdot \tau_{lens} \tau_{win} \tau_{filter} \eta \cdot A\Omega \cdot t \end{aligned} \tag{4}$$

식 (1), (2), (3), (4)의 관계에서 광자 잡음에 의한 신호대 잡음비(S/N ratio)는 다음의 식으로 정리

표 3. PSICS 광학계 요구사항.

Instrument Parameters	Requirements	Constraint
Band Pass	3.8 ~ 4.8 μ m	Filter
Angular Resolution	< 0.05degree/pixel	Image
Field of View	< 16° × 13°	Image, Sensor
Lens Figure	평볼록 렌즈(Plano-convex)	System
F-ratio	3 - 6	Sensor

할 수 있다.

$$\frac{\text{Signal}}{\text{Noise}} = \frac{\int \frac{d}{dT} \frac{I_{\lambda}(T_{obj})}{hc/\lambda} d\lambda \cdot \epsilon_{obj} \tau_{lens} \tau_{win} \cdot [\tau_{filter} \eta]^{1/2}}{\left[\int \frac{I_{\lambda}(T_{obj})}{hc/\lambda} d\lambda \cdot \epsilon_{lens} \tau_{win} + \epsilon_{win} \right]^{1/2}} \cdot \Delta T \cdot [A\Omega \cdot t]^{1/2} \quad (5)$$

즉, 원하는 신호대 잡음비로 관측하려는 온도의 변화(ΔT)는 그림 3에서 보여주는 것처럼 광학계의 특성인 $A\Omega$ 값과 노출 시간의 함수로 나타낼 수 있다.

이 계산에서 광학계의 온도(T_{opt})는 300K, 방출률($\epsilon_{lens}, \epsilon_{wind}$)은 0.1, 투과율($\tau_{lens}, \tau_{wind}, \tau_{filter}$)은 0.9, 검출기의 양자 효율(η)은 0.7라고 가정하고, 관측 대상의 표면 온도(T_{obj})는 310K, 방출률(ϵ_{obj})은 0.5라고 가정하였다. 그리고, 검출기 픽셀의 크기($A_{det} = 30 \times 30\mu\text{m}$)를 사용하여 $A\Omega$ 값을 F-비로 나타냈다. 예를 들면 F-비가 6인 광학계로 0.04초의 노출을 준다면, 표면 온도 310K인 영상의 표면 온도 변화 ~ 30mK을 신호대 잡음비 5의 값으로 감지할 수 있다.

2.5 광학계 설계 요구 조건

PSICS의 관측 조건으로는 해당 근적외선(3.8 ~ 4.8 μm) 파장 영역에서 센서의 한 픽셀당 시야가 약 0.05degree, 즉 1m 전방 관측 대상의 적외선 영상을 약 1mm의 공간 분해능으로 획득하며, 이때 관측 대상에서 ~ 30mK의 온도 차이를 신호 대 잡음비가 5 이상으로 하여 구별할 수 있도록 하였다. 그 밖에, 광학계는 최대한 간단하게 설계하여 시스템의 부피 및 비용을 줄이도록 한다. PSICS의 개발 목표가 냉각시스템의 개발 및 적외선 센서의 검증에 더 주안점이 있는 까닭이다. 다음 표 3은 위의 내용을 정리하여 PSICS의 광학 설계 요구 조건을 나타낸 것이다.

3. 광학계 설계

3.1 렌즈 설계

그림 4는 설계 요구 조건에 맞게 PSICS 광학계를 ZEMAX로 설계하여 광경로를 추적한 것이다. 그림에서와 같이 평행광이 입사한다고 할 때 렌즈, 윈도우 및 필터를 적절하게 배치하였다. 그리고 요구되는 F-비를 맞추고 수차를 최소화하기 위하여 Cold stop을 필터와 렌즈 사이에 배치하였다. 각 광학면에는 1부터 9까지 번호를 부여하여 후에 공차 계산 시에 참고하도록 하였다. 각 광학면에 대한 설명은 다음과 같다: ① 렌즈 표면, ② 렌즈 밀면, ③ 윈도우 윗면, ④ 윈도우 밀면, ⑤ cold baffle, ⑥ old stop, ⑦ 필터 윗면, ⑧ 필터 밀면, ⑨ 센서. 그림 4에서 입사각(field angle)은 시반경으로써 입사각이 7.5도, 3.5도인 것은 시야가 각각 15도, 7도인 경우를 나타낸다. 시야 7도가 중요한 이유는 관측 대상인 사람의 영상이 전체 영상의 절반 정도를 차지한다고 고려하였기 때문이다.

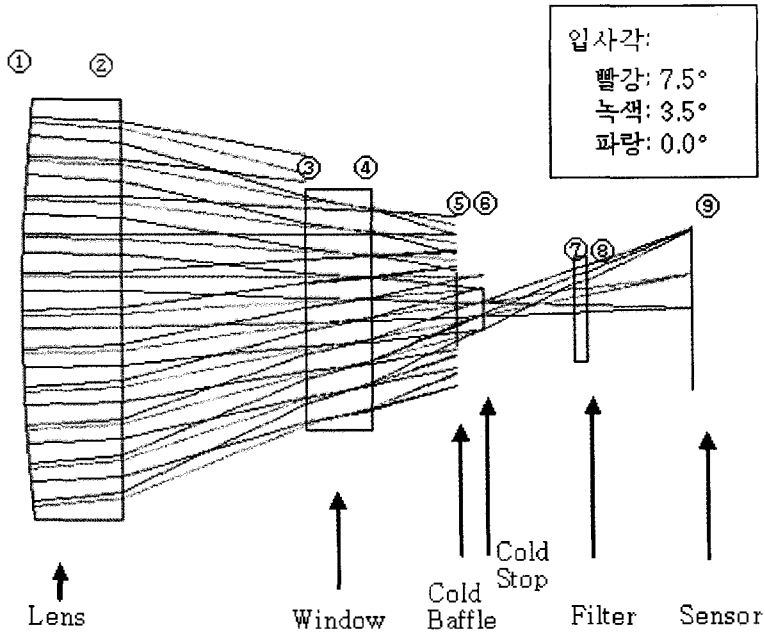


그림 4. PSICS 광학계 설계사양.

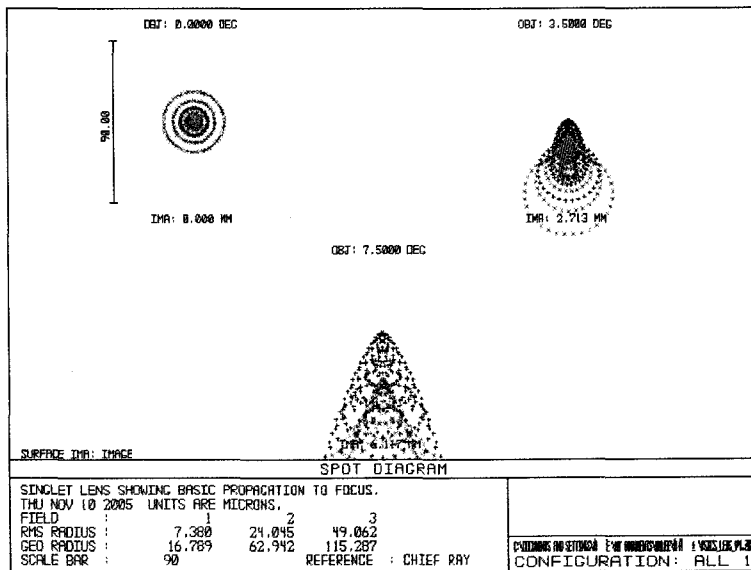


그림 5. PSICS 광학계의 광점 이미지 분포.

그림 5와 6은 그림 4의 설계로부터 얻은 spot diagram과 encircled energy distribution을 각각 그린 그림이다. 적외선 센서의 픽셀 크기가 30 μ m임을 고려하면 입사각이 3.5° 미만인 경우는 한 개의 픽셀 안에 광점의 90% 이상이 포함되며 입사각도가 3.5°보다 크고 7.5°보다 작은 경우는 두 개의 픽

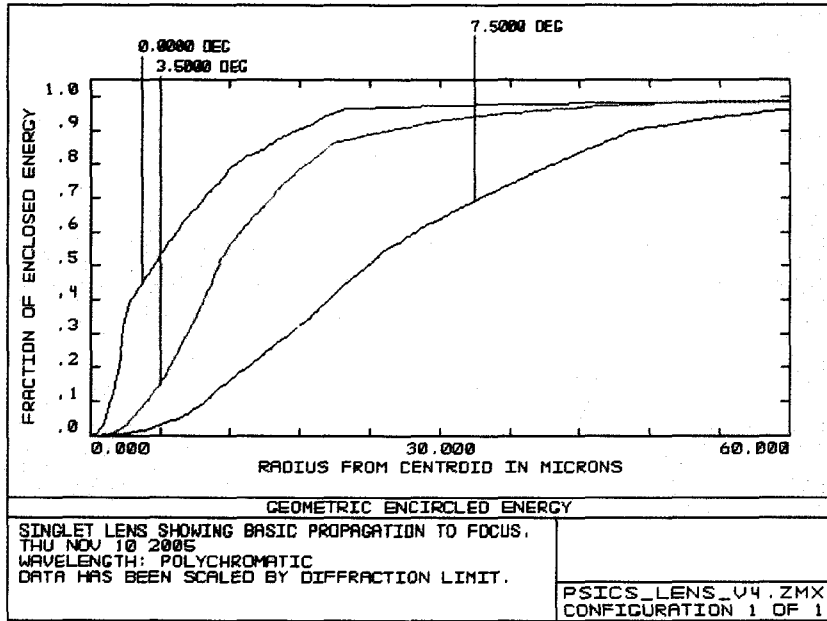


그림 6. 광학계 광점 이미지의 에너지 분포.

셀 안에 광점의 90% 이상이 포함되는 것을 알 수 있다. 이는 적외선 센서의 중심 부분에 관측 대상의 영상이 맺히는 것을 감안할 때 주어진 요구 조건을 만족함을 알 수 있다. Spot diagram을 보면 입사각이 0보다 큰 경우, 즉 비축 영상인 경우 색수차(그림 5에서 파란색이 3.8 μm 이고 녹색이 4.8 μm), 코마수차 및 기타 수차가 나타남을 알 수 있다. 이는 단일 렌즈를 사용했기 때문에 부득이한 결과이지만 cold stop을 사용하여 entrance pupil을 좁게 만듦으로써 가장 문제가 큰 코마수차를 상당히 줄일 수 있었다.

3.2 배플 설계

적외선 영상 검출기를 설계할 때 제일 주의해야 하는 부분이 검출기 자체에 오는 잡광을 제거하는 것이다. 적외선 센서의 동작 온도가 절대 온도 77K인 극저온이기 때문에 상온인 진공 냉각기의 외벽으로부터 방출되는 열복사를 차단할 필요가 있으며 그림 4에서 cold baffle이 그 역할을 한다.

Cold box의 구조상 cold box 내벽에 1차 이하의 반사를 한 잡광은 적외선 센서에 도달할 수 없기 때문에 cold baffle은 2차 반사를 통한 잡광을 차단하도록 설계하였다. 따라서 센서에는 3차 이상의 잡광, 즉 적어도 3번은 cold box 내벽을 반사한 빛만 잡음으로써 센서에 도달하게 된다. Cold box 내부의 반사율이 최대 8%라고 가정하고(강지나 외 2004), 간단한 기하에 따라 이 잡광의 시야를 계산하여 광량을 구하면, 외벽의 온도가 300K라고 할 때 그 값이 8E9photons $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 가 되어 센서의 주어진 잡음레벨 NEI = 2E11 photons $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 보다 훨씬 작으므로 배플 설계의 요구 조건을 맞출 수 있다.

3.3 설계 결과

이상으로 PSICS 광학계의 렌즈 및 배플에 대한 설계를 완성하였다. 다음 표 4는 이러한 설계 결

표 4. PSICS Optics Specification.

Instrument Parameter	Specification
Band Pass	3.8 ~ 4.8 μ m
Angular Resolution	0.047degree/pixel
Field of View	15° × 12°
Lens Figure	평볼록 렌즈(Plano-convex)
Lens radius of curvature	131.75mm
Lens conic constant K	-19
f/#	5.34

과를 정리한 것이다. 표 1 및 표 3과 비교해 볼 때 요구되는 설계 조건을 모두 만족함을 알 수 있다.

4. PSICS 광기계부 제작을 위한 허용 오차

광학계 및 기계부를 제작, 조립할 때 필연적으로 공차가 발생하게 된다. 원래 공차 설계는 설계, 제작, 조립, 운용, 보관의 단계로 나뉘서 수행하여야 하나, 본 장에서는 ZEMAX를 이용한 간단한 계산을 통하여 PSICS 광학계의 허용 오차 한계를 구해보았다. 기계적인 오차는 기본적으로 제작/조립 시에 대부분 발생하는데 주로 광축 방향으로의 이동(shift)이나 광부품의 기울기(tilt)의 형태로 나타나며 그 최대값은 대개 0.1mm이다(양순철 외 2005). 한편 광부품에서의 오차는 곡률 반경 및 굴절 상수 등의 변화로 나타나는데, 일반적인 조건하에서는 기계적인 오차보다 영향이 크지 않다. 우리는 PSICS 광기계부를 제작, 조립할 때 발생 가능한 공차의 오차 값을 0.15mm로 설정하여 1000회의 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다. 이 시뮬레이션에서 각 공차는 중심값에서 최대 오차 한계로 정규 분포를 가진다고 가정하였고, 모든 경우를 독립 변수로 계산하였다. 몬테카를로 시뮬레이션 결과에 따르면 입사각이 3.5°보다 작은 경우 센서의 한 픽셀 안에 광량의 80% 이상이 포함되며 입사각이 3.5°보다 큰 경우도 센서의 두 픽셀 안에 광량의 70% 이상이 포함되는 것을 확인하였다.

5. 결론

우주탑재용 적외선카메라 냉각시스템 시험모델, PSICS는 미래의 적외선 우주망원경을 개발하기 위한 기초 기술을 축적하는 목적으로 개발되고 있으며, 한국천문연구원 이 광학계와 총괄 시스템, 한국기초과학지원연구원이 냉각기 시스템, 한국기계연구원이 냉동기 시스템, (주) 아이쓰리시스템이 적외선 센서와 전자부를 담당하여 순수 국내 기술로 제작되고 있다. 본 연구에서는 절대 온도 77K의 극저온에서 근적외선 영역의 영상을 구현하기 위한 최소한의 광학계를 설계하였다. 센서의 잡음 레벨을 고려하여 영상 이미지를 구현할 때 필요한 광량을 계산하여 3.8 ~ 4.8 μ m 적외선 대역에서 광학계의 구경 32mm, 15° × 12°의 시야, 그리고 각분해능이 0.047인 단일 렌즈 카메라 시스템을 설계하였다. 한편, 잡광을 제거하기 위해 잡광에 대한 광경로를 추적하고 이에 따른 배플을 설계하였다. 이렇게 설계된 광학계는 센서 및 영상 분해능의 요구 조건을 만족하는 것으로 나타났다. 그리고, 제작 및 조립 시의 공차 조건에 따른 허용 오차를 몬테카를로 시뮬레이션한 결과, 허용 공차 한계가 0.15mm로 계산되어, 주어진 제작 공차 0.1mm보다 크게 주어짐을 알 수 있었다.

감사의 글: 본 연구는 기초기술연구회의 협동연구과제로 수행되었다.

참고문헌

- 강지나, 이성호, 진호, 박수종, 문봉곤, 김상호, 박장현 2004, 한국우주과학회지, 21, 467
- 양순철, 김건희, 김효식, 신현수, 홍권희, 유종신, 김동락, 박수종, 남옥원 2005, 한국기계가공학회지, 4, 31
- 양형석, 김동락, 이병섭, 김건희, 이대회, 박수종, 남옥원 2005, 한국우주과학회지, 투고중
- 한국천문연구원 2004, 일본 적외선 천문위성(SPICA) 국제공동개발 기획연구 (대전: 한국천문연구원), p.16
- Riedl, M. J. 1995, Optical Design Fundamentals for Infrared Systems (Washington: SPIE Optical Engineering Press), p.14
- Vincent, J. D. 1990, Fundamentals of Infrared Detector Operation & Testing (New York: Wiley-Interscience), p.56