

우주용 적외선 냉각시스템 시험모델 성능 평가

PERFORMANCE TEST OF THE PROTO-MODEL OF SPACE INFRARED CRYOGENIC SYSTEM

이대회¹, 양형석², 남옥원¹, 이성호¹, 진호¹, 김동락², 박수종³, 김병혁⁴, 박성제⁵

¹한국천문연구원

²한국기초과학지원연구원

³경희대학교, ⁴i3system, ⁵한국기계연구원

D.-H. LEE¹, H.-S. YANG², U.-W. NAM¹, S. LEE¹, H. JIN¹, D.-L. KIM², S. PAK³, B.-H. KIM⁴, S.-J. PARK⁵,

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

E-mail: dhlee@kasi.re.kr

²Korea Basic Science Institute, Daejeon, 305-333, Korea

³Kyung Hee University, Gyeonggi-do 446-701, Korea, ⁴i3system Co., Daejeon 305-343, Korea

⁵Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon 305-343, Korea

(Received November 17, 2006; Accepted December 19, 2006)

ABSTRACT

We have tested the performance of the Proto-model of Space Infrared Cryogenic System (PSICS), which is a small infrared camera, developed by Korea Astronomy and Space science Institute (KASI), Korea Basic Science Institute (KBSI), Korea Institute of Machinery and Materials (KIMM), and i3system co., as a cooperation project. The purpose of PSICS is to ensure a technology of small infrared cryogenic system for future development of space infrared (IR) cameras. PSICS consists of cryogenic part, IR sensor and electronics part, and optical part. The performance test of each part and the integrated system has been completed successfully. PSICS will be used as a guiding camera for ground-based IR telescopes and a test system for developing a space-borne instrument.

key words: cryogenics, infrared, camera

1. 서론

국가우주개발 중장기 계획에는 우주 또는 지상을 관측하는 적외선 우주 망원경의 개발이 포함되어 있다. 이때 적외선 기술의 핵심은 센서를 냉각하여 감도를 높이는 것이다. 우주 공간에서는 스테링 냉동기(Stirling Cooler)와 같은 순환식 냉동기를 사용하는데, 냉각 용량이 작기 때문에 냉각시스템의 열손실을 줄이기 위한 연구가 필수적이다. 그러나 이러한 적외선 기반 기술은 군사적 이유로 외국으로부터 기술도입이 제한되고 있다. 따라서 우주망원경을 위한 냉각시스템의 국내 기술 축적이 국가우주개발 중장기 계획의 필수적인 요소가 된다.

2006년 6월에 기초기술연구회 협동과제 “우주망원경 냉각시스템 개발” 과제가 성공적으로 종료되었다. 이 과제를 통해 한국천문연구원(KASI)과 한국기초과학지원

연구원(KBSI)은 우주용 적외선 냉각시스템 시험모델(Proto-model of Space Infrared Cryogenic System, PSICS)을 개발하였다. PSICS는 소형 적외선 카메라로서 미래의 적외선 우주망원경의 냉각시스템 기술을 확보하기 위한 목적을 가지고 있다. PSICS의 광학계와 냉각시스템은 한국천문연구원과 한국기초과학지원연구원에서 설계, 제작하였으며 (이대회 외 2005; 양형석 외 2006) i3system에서 제공한 적외선 센서시스템과 한국기계연구원에서 제공한 냉동기(박성제 외 2003)를 사용하여 하나의 완성된 카메라 시스템으로 제작하였다.

우리는 본 논문에서 PSICS의 성능 평가 결과 및 활용에 대해 설명한다. 2절에서는 PSICS의 냉각계, 전자부 및 광학계의 성능 평가 내용 및 결과에 대해 설명하고, 3절에서는 PSICS를 이용한 국내 천문사이트 대기 특성 측정 등의 활용 방안에 대해 기술하며, 끝으로 4절에서는

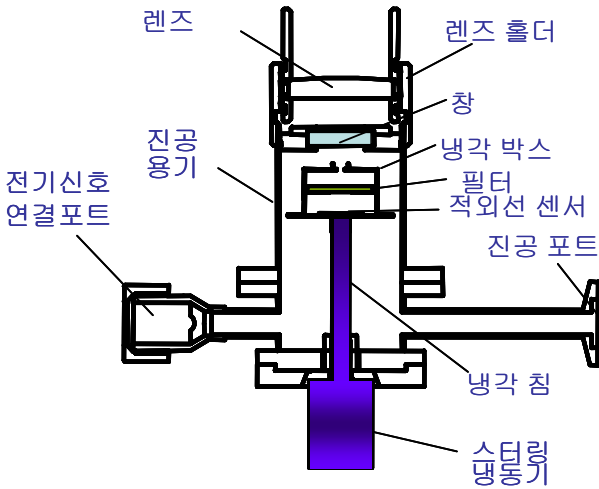


그림 1. 최종 개발된 PSICS 단면도

표 1. PSICS 사양

구성요소	사양
렌즈	재질: Germanium 지름: 40 mm (유효지름: 32 mm) 두께: 7.6 mm 특징: 바깥쪽면 비구면
창	재질: CaF ₂ 지름: 25.4 mm (유효지름: 18.4 mm) 두께: 5 mm 투과대역: 0.19~0.72 μm
필터	재질: Sapphire 지름: 25.4 mm (유효지름: 20.32 mm) 두께: 1.02 mm 투과대역: 3.8 ~ 4.8 μm
적외선 센서	Array Size: 320 x 256 픽셀 크기: 12.2 x 9.8 mm ²
냉각 박스	재질: Copper 크기: 지름 28.2 mm, 높이: 18.9 mm 볼트 체결부: 지름 40.2 mm
냉동기	냉각능력: 220 mW @ 80 K 냉각 침 길이: 56.4 mm

결론을 논의하려고 한다.

2. PSICS 성능 평가

2.1 개요

PSICS는 적외선 센서와 필터를 냉각하기 위한 냉각계, 관측을 위한 광학계, 그리고 센서 전자부의 3부분으로 크

게 나눌 수 있다. 냉각계는 냉각대상인 냉각 박스(cold box)와 냉각을 위한 냉동기로 구성되고, 냉각 박스는 냉동기의 냉각 침(cold finger) 끝단에 부착된다. 냉각 박스 속에 320 x 256 픽셀의 적외선 센서와 지름 25.4 mm, 투과대역 3.8 - 4.8 μm의 사파이어 재질의 필터가 부착된다. 냉동기는 80 K에서 220 mW의 냉각 능력의 스테어링 냉동기를 이용하며, 스테어링 냉동기에 의한 냉각 박스 냉각 목표 온도는 80 K이다. 적외선 관측을 위한 광학계로는 진공용기 상부에 두께 5 mm 지름 25.4 mm (유효지름 18.4 mm)의 CaF₂ 재질의 창(Window)을 부착하고 그 위의 진공용기 외부에 부착된 렌즈 홀더 (Lens holder)에 의해 두께 7.6 mm, 지름 40 mm (유효지름 32 mm) 인 게르마늄 (Germanium) 재질의 비구면 렌즈 (Optical lens)가 고정된다. 진공용기 옆면에는 적외선 센서의 신호 전달과 온도 모니터를 위한 2개의 진공용 코넥터(Electrical feed-through)와 진공배기를 위한 포트(Vacuum pot)가 부착되어 있다. 광학계는 광량 계산 결과에 따라 초점비가 6인 상태에서 0.04 초의 노출을 주었을때, 표면 온도 310 K인 대상체의 표면 온도변화 300 mK을 신호 대 잡음 비 5의 값으로 감지할 수 있도록 하였다. 센서 전자부로는 HgCdTe 적외선 센서를 제작하였고, 이를 제어하는 제어 전자시스템을 설계, 제작하였으며, 영상 디스플레이 및 분석을 위한 소프트웨어를 개발하였다. 최종 개발된 PSICS의 단면도와 사양을 그림 1과 표 1에 나타내었다.

2.2 냉각계 성능 평가

냉각시스템의 주요 열부하는 복사에 의한 열침입이므로 목표 온도인 80 K 이하로 냉각시키기 위해서는 복사열 감소를 위한 단열기술개발이 꼭 필요하다. 복사열 감소를 위해 적층단열재 (Multi Layer Insulator, MLI)가 주로 사용되며, 보다 효율적인 복사열 감소를 위해서 MLI 적층 기술의 개발이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 적층 방식에 따른 최저 냉각도달 온도 실험을 실시하였다. 실험방법은 냉동기 냉각 침에 실리콘 다이오드 온도계를 부착하고, 냉동기의 구동전력을 38 W로 일정하게 유지한 상태에서 각각의 적층방식에 따른 냉각도달온도를 측정하여 복사열 차폐 효과를 측정하였다. 수행한 MLI (NRC-2, MPI사) 적층방식과 도달온도를 그림 2에 나타내었다. 냉각 박스에 복사열 차폐를 위한 MLI를 설치하지 않았을 경우 (실험 I)에는 냉각온도가 82.1 K로 목표온도 이하로 냉각되지 않았으나 MLI를 5층 적층하여 (실험 I-2) 복사열을 차단하면 냉각온도는 73.0 K로 낮아지고, MLI를 10층 적층하면(실험 I-3), 냉각온도는 72.2 K로

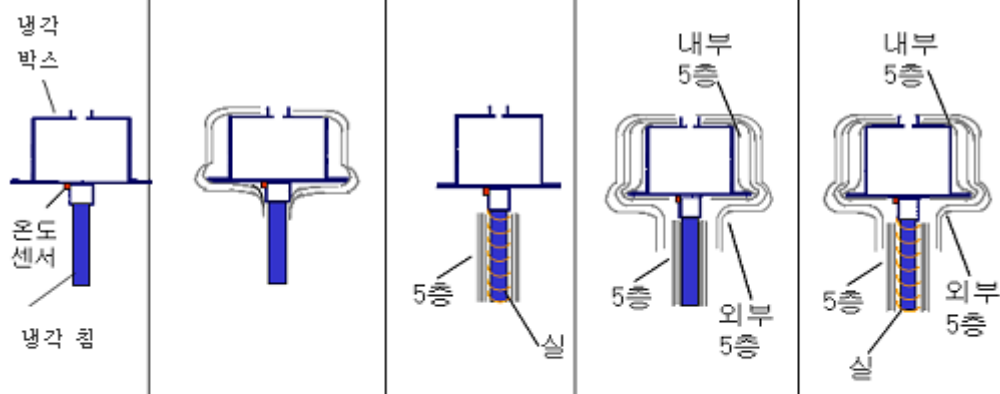
적층방식	실험 I	실험 II	실험 III	실험 IV
냉각 박스	실험 I-1 : 0층 실험 I-2 : 5층 실험 I-3 : 10층	0층	10 (5+5) 층	10 (5+5) 층
냉각 칩	0 층	5 층	5 층	5 층 (내부실)
				
도달온도	실험 I-1 : 82.1 K 실험 I-2 : 73.0 K 실험 I-3 : 72.2 K	81.1 K	70.9K	70.3K

그림 2. MLI 적층 방식에 따른 냉각 도달 온도

낮아져 MLI가 복사열 차폐에 효과적임을 알 수 있다. 한편 냉각 칩을 통한 복사열 침입 효과를 검토하기 위해 실험 II와 같이 냉각 칩에 MLI를 5층 적층하고 냉각 박스에는 MLI를 적층하지 않고 냉각시험을 수행하여 실험 I-1과 비교하였는데 이 경우 냉각온도는 1 K 더 하락하여 81.1 K에 도달하였다.

이 결과로 냉각 칩에도 MLI를 적층하는 것이 냉각온도 하락에 효과적인 것을 알 수 있었다.

냉각 박스에 MLI를 적층할 때, 냉각 박스 최내층 MLI와 냉각 칩의 최외층 MLI가 접촉하면 서로 다른 온도구배에 의해 MLI면을 통한 열부하의 증가를 초래한다. 그래서 실험 III과 실험 IV에서는 냉각 박스의 MLI 10층 중에 내부 5층은 냉각 박스를 완전히 싸도록 적층하고 외부의 5층은 냉각 칩과 접촉하지 않도록 적층하였다.

그 결과 실험 I-3에 비해 냉각온도는 더 낮은 온도에 도달하였다. 그리고 냉각 칩에는 하단의 상온에서부터 상단의 저온부분까지 온도구배가 존재한다. 냉각 칩의 MLI 적층은 냉각 칩 하단의 열이 가장 안쪽의 MLI를 통해 전도되지 못하도록 단열 효과가 있는 실을 설치하여 MLI와 냉각 칩을 비접촉시킨 실험 IV의 경우가 실험한 적층 방식 중에서 가장 낮은 70.3 K까지 냉각되었다. 이 결과

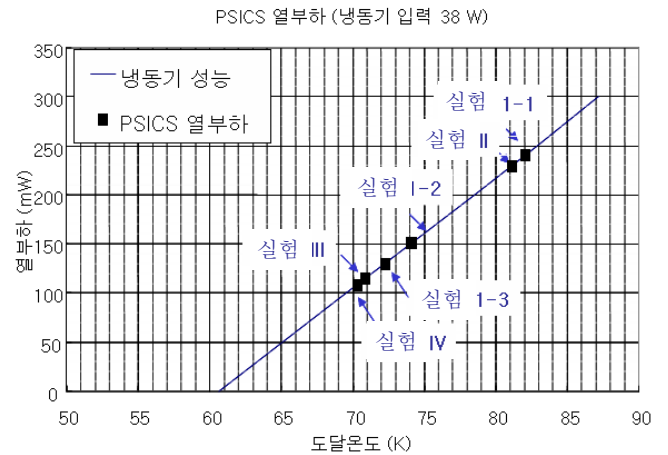


그림 3. MLI 적층 방식에 따른 열부하 및 냉각 도달온도

에 따라 PSICS의 MLI 적층은 실험 IV와 같은 방법으로 적층하였다. 위의 결과로 얻어지는 복사 열부하 감소효과를 그림 3에 나타내었다. MLI를 적층하지 않았을 경우의 열부하 240 mW (실험 I-1)에서 가장 열부하가 낮은 108 mW (실험 IV)까지 132 mW (55 %)의 복사열 부하가 감소하는 효과를 거두었음을 알 수 있다.

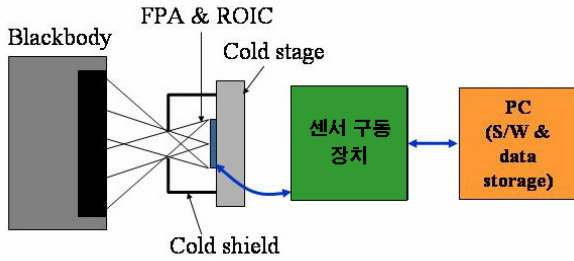


그림 4. 적외선 검출기 특성 측정 장치의 개념도

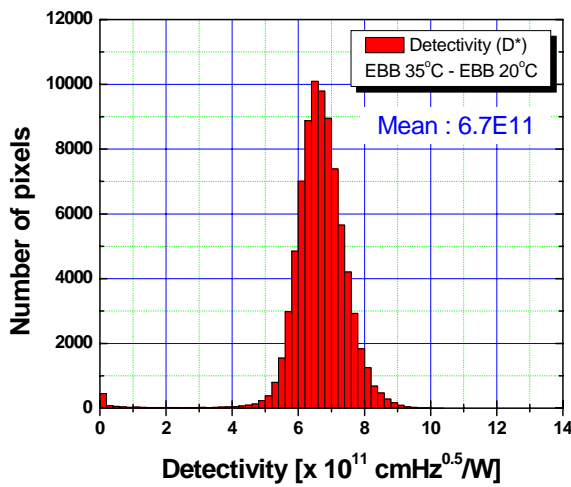


그림 5. 소자 검출도 분포도

2.3 적외선 검출기의 특성

그림 4는 적외선 검출 소자의 특성 측정 방법을 보여준다. 이 실험에서 광역 흑체 광원(extended blackbody source)을 이용하여 적외선 광원을 생성하고, 이 광원의 온도를 조정함으로써 입사하는 광량을 조정하였다. 이 경우에는, 점 광원을 이용하여 측정하는 경우와는 달리 흑체와 소자 사이의 거리에 상관없고, 냉각 차폐(cold shield)를 통해 바라보는 전체 영역이 흑체의 면적 이내에 들어오기만 하면 되는 장점이 있다. 왼쪽에 있는 것이 흑체이고, 오른쪽이 냉각기이다. 냉각기 뒷부분에는 ROIC (ReadOut Integrated Circuit)를 구동하고 출력을 디지털 신호로 전환해주는 회로 보드가 삽입되어 있으며, 전환된 디지털 데이터는 USB나 병렬 입출력(parallel I/O) 카드를 통해 컴퓨터로 전송된다.

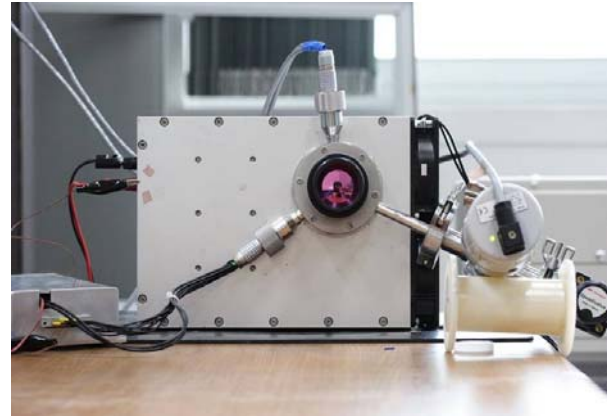


그림 6. 최종 조립된 PSICS의 사진

적외선 검출기의 광특성에 대한 분석 항목을 다음과 같이 정리하였다. 단, 모든 항목들에 대하여 평균값은 작동 조건을 만족하는 픽셀을 대상으로 추출한다.

- 신호/잡음의 분포
- 반응도 분포
- 양자효율 분포
- 작동가능성 및 불량 픽셀의 2차원 지도
- 검출도 분포

적외선 센서 검출도는 앞에서 구한 반응도와 잡음으로부터 구할 수 있는데, 아래의 수식으로 계산한다.

$$NEP = \frac{v_n}{R_v} \tag{1}$$

여기서, NEP는 잡음 등가 출력 (Noise Equivalent Power) 이고, v_n 은 잡음, R_v 는 반응도이다. 검출도는 이러한 NEP의 역수인데, 소자의 면적과 측정시의 파장 대역에 대하여 정규화를 하면 표준 검출도, 즉 D^* 가 된다.

$$D^* = \frac{\sqrt{A_d \cdot \Delta f}}{NEP} \tag{2}$$

이러한 수식을 이용하여 D^* 를 구하였고, 평균 D^* 는 6.7×10^{11} 로 나타남을 알 수 있었다. 다음의 그림 5에서 측정된 검출도의 분포도를 보여준다.

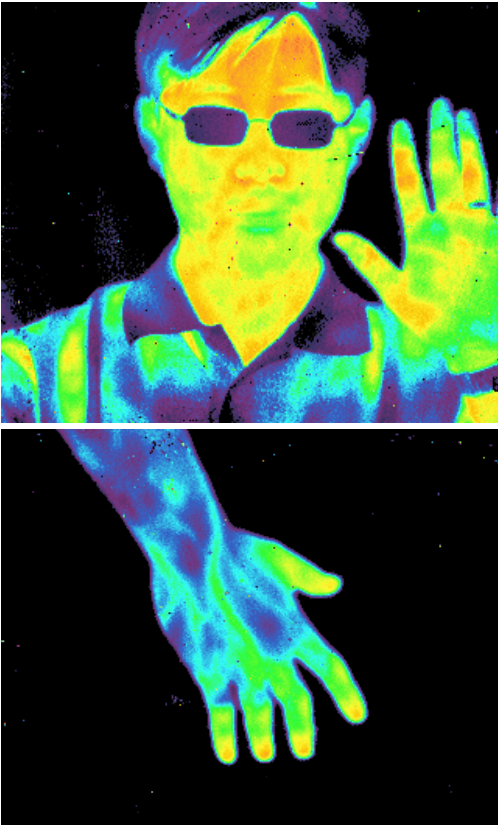


그림 7. 2 m 거리에서 촬영한 PSICS 영상

2.4 광학계 및 최종 성능 평가

PSICS의 광학계 및 최종 성능을 평가하기 위해서 시스템을 모두 조립하였다. 조립하는 순서는 다음과 같다. 하나의 조립 순서가 완성되어야만 다음 순서가 가능하므로 조립 순서를 지키는 것이 매우 중요하다. 진공용기 하단부를 냉동기 박스에 조립한다. 냉동기의 냉각 칩 끝에 냉각 팁을 부착한다. 시험 완료된 적외선 센서를 제작된 회로판 위에 에폭시를 이용하여 접착시킨다.

- 회로판에 신호 선을 연결한다.
- 냉각 박스를 검은 칠한 후에 필터를 조립한다.
- 냉각 박스를 회로판 위에 조립한다.
- 온도 센서를 부착한다.
- MLI를 적층하고 진공용기 상단부를 조립한다.
- 렌즈가 부착된 렌즈 홀더를 조립하여 완성한다.

위의 그림 6은 최종 조립되어 완성된 PSICS의 사진이다. 완성된 PSICS를 이용하여 아래의 그림 6과 같은 적외선 영상을 촬영하였다. 적외선 영상은 10 ms의 노출



그림 8. 11월 대전 밤하늘의 PSICS 영상

시간으로 50번 촬영하여 평균한 것이다. 온도 감각 영역을 20° C에서 35° C로 설정하여 사람의 체온에 가장 민감하게 반응하게 하였고, 온도 분해능을 300 mK로 설정하였다. 이러한 조건으로 주어졌을때 적외선 센서는 90.8%의 동작률로 작동함을 알 수 있었다.

그림 7의 관측 결과를 보면 2 m 거리의 피사체가 가로 55 cm, 세로 40 cm의 시야를 갖는 것을 알 수 있으므로, 시야각 15° x 12°의 광학계 설계 결과와 잘 맞는 것을 알 수 있다.

3. PSICS의 활용

PSICS를 개발함으로써 획득한 우주망원경 냉각시스템 기술은 천문관측은 물론, 구름 및 수증기의 분포 이미지를 얻을 수 있는 기상위성, 지질 자원의 분포를 얻을 수 있는 자원탐사위성, 해류의 온도 및 이동을 추적할 수 있는 해양위성, 지상 물체의 열 추적을 하는 군사위성의 개발에도 응용할 수 있다. 초정밀 가공기를 이용한 대형 미러 및 적외선 렌즈의 가공을 통한 초정밀 가공 기술력 확보로 다양한 소재의 초정밀가공과 새로운 아이디어 창출에 필요한 연구 활동이 활발하게 이루어질 것이며, 전적으로 수입에 의존하고 있는 적외선 렌즈의 국내 설계, 제작에 활용할 수 있다. 최종적으로는 위성 탑재용 적외선 냉각시스템 개발에 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

3.1 PSICS를 이용한 밤하늘 관측

제작된 PSICS를 이용하여 국내 천문사이트의 적외선 천문 관측 타당성 조사를 수행할 수 있다. 근적외선 영역에서 지구 대기는 부분적으로 불투명하다. 낮은 투과율은

대기 흡수를 크게 하고 대기 자체의 열적 배경 복사를 증가시켜서 관측 가능한 한계 등급을 떨어뜨리게 된다. 근적외선 영역의 대기 투과율은 주로 수증기량에 의해 결정되는데 대기 중의 수증기량은 관측지에 따라 차이가 있다 (문봉곤 외 2004). 그림 8은 PSICS를 이용하여 11월 대전의 밤하늘을 찍은 영상이다. 달이 선명하게 나타남을 알 수 있다. 태양빛의 달의 반사도를 약 0.1 정도로 할 때 검출된 픽셀당 세기 분포를 계산하면 3.8 - 4.8 μm 의 파장 대역의 대기 투과율 값을 구할 수 있다.

3.2 위성탑재체 활용 방안

한국천문연구원은 과학기술위성3호의 주탑재체로 “다목적 적외선 영상시스템 (MIRIS : Multi-purpose IR Imaging System)”을 제안하였다. 위성탑재용 다목적 근적외선 영상시스템 개발 및 이를 이용한 우주관측 및 지상관측이 최종목표로서 적외선 광학계, 적외선 센서 및 전자부, 위성탑재용 냉각계 등의 개발이 포함되어 있다. PSICS는 이러한 위성탑재용 다목적 근적외선 영상시스템의 핵심적인 기술 및 사양을 포함하고 있으므로 과학기술위성3호의 위성탑재체에 활용될 계획이다.

4. 결론 및 토의

적외선 우주망원경 냉각시스템의 시험모델 PSICS의 특성을 평가하였다. 냉각 용량이 220 mW인 스테링 냉동기를 이용하여 냉각목표온도인 80 K보다 낮은 70 K를 달성하였다. 냉각도달온도를 낮추기 위해 복사열을 감소시키기 위한 단열기술을 개발하였다. 그 결과 복사열을 55% 감소시킬 수 있었다. 적외선 검출기의 양자 효율 특성을 측정할 결과 90 % 이상의 작동율을 보이는 것을 확인하였으며, 최종 조립된 PSICS를 이용하여 적외선 영상을 촬영한 결과, 광학계를 포함한 전체 시스템이 주어진 설계대로 작동함을 알 수 있었다.

PSICS를 이용하여 밤하늘을 촬영하여 해당 파장대역의 대기 투과율을 측정함으로써 국내 천문사이트의 적외선 관측에 활용할 수 있다. 또한 PSICS는 우주망원경 냉각시스템의 시험모델로서 미래의 적외선 우주망원경 시스템에 활용할 수 있으리라 기대된다.

참고 문헌

- 문봉곤, 이성호, 박수중, 진호, 김용하, 육인수, 한원용, 2004, 한국우주과학회지, 21(4), 453
- 박성제, 홍용주, 김효봉, 유병건, 이기백, 2003, 한국초전도 저온공학회 2003년도 학술대회 논문집, 156

양형석, 김동락, 이병섭, 김건희, 이대회, 박수중, 남옥원, 2006, 한국우주과학회지, 23(2), 153

이대회 외 2005, 한국우주과학회지, 22(4), 473