

## 적외선 우주망원경 냉각시스템 열설계 및 열침입량 측정

### Thermal Design and Heat Load Measurement of PSICS

양형석\*, 김동락\*\*, 이병섭\*, 최연석\*

H. S. Yang\*, D. L. Kim\*\*, B. S. Lee\* and Y. S. Choi\*

**Abstract:** A Protomodel Space Infrared Cryogenic System (PSICS) cooled by a stirling cryocooler was designed. The PSICS has an IR sensor inside a cold box which is cooled by a stirling cryocooler with refrigeration capacity of 500mW at 80K in a vacuum vessel. It is important to minimize heat load for reducing background thermal noise. In order to design the cryogenic system of low heat load and to reduce heat load, we did several numerical analyses and tested using boil-off calorimetry with liquid nitrogen to measure the heat leak of the system. In this paper, we present the results obtained by thermal analysis and heat load measurement for designing the PSICS.

**Key Words:** space cryogenics, IR sensor, radiation heat transfer.

#### 1. 서 론

적외선 우주 망원경 냉각시스템 개발을 목표로 하여 시험모델인 PSICS (Protomodel Space Infrared Cryogenic system)를 설계하였다. 적외선 센서를 이용한 우주 미션에서 저온냉각의 목적은 관측대상인 적외선이 열선이므로 냉각을 통해 센서의 감도향상과 배경 열잡음의 감소에 있으며, 이는 약 20년 전부터 미국, 일본 등에서는 우주 개발 미션에 저온냉각기술을 도입하여, 우주관측에 사용하고 있는 기술이다[1-3]. 적외선 우주 망원경 냉각시스템에는 액체헬륨 또는 액체질소와 같은 냉매를 사용하는 방법과 기계식 냉동기를 이용하는 방법이 있으나, 최근의 냉동기 기술개발로 문제가 되어 왔던 냉동기의 장기운전 신뢰성도 대폭 개선되었고, 액체냉매의 경우 냉매의 소비에 의해 관측이 종결되는 단점을 피하기 위해 본 연구에서는 스테어링 냉동기를 이용한 80K 냉각시스템 제작을 목표로 설계하였다. 본고에서는 먼저 적외선 센서 냉각을 위한 냉각시스템의 설계사양과 열부하 해석 결과를 논의한다. 그리고, 계산 및 해석을 통해 도출한 열부하 중 큰 부분을 차지하는 복사 열침입량의 측정 방법 및 측정 결과를 논의하여 설계의 타당성을 검증한다.

#### 2. PSICS 구성요소

적외선 우주 망원경 냉각시스템(PSICS)은 스테어링 냉동기를 이용하여 적외선 센서를 80K로 냉각하는 냉각시스템이다. Fig. 1에 설계된 단면도를, 제작된 PSICS 사진을 Fig. 2에 보인다. PSICS는 적외선 센서(IR sensor)와 필터(Filter)를 냉각하기 위한 냉각계, 관측을 위한 광학계의 2부분으로 크게 나눌 수 있다. 냉각계는 냉각대상인 cold box와 냉동기로 구성되고, cold box는 냉동기의 cold finger 끝단에 부착된다. cold box속에 적외선 센서와 지름 25.4mm, 투과대역 3.8~4.8 $\mu$ m의 사파이어 재질의 필터가 부착된다. 냉동기는 80K에서 500mW급의 스테어링 냉동기(Stirling cryocooler)를 이용하며, 스테어링 냉동기에 의한 cold box 냉각목표온도는 80K이다. 적외선 관측을 위한 광학계는 진공용기 상부에 두께 5mm 지름 25.4mm(유효지름 18.4mm)의 CaF<sub>2</sub> 재질의 창(Window)이 부착되고 그 위의 진공용기 외부에 부착된 렌즈 홀더(Lens holder)에 의해 두께 7.6mm, 지름 40mm(유효지름 32mm)인 저마늄(Germanium) 재질의 비구면 렌즈(Optical lens)가 고정된다. 진공용기 옆면에는 적외선 센서의 신호와 온도 모니터를 위해 진공용 콘넥터(Electrical feed through)가 2개 부착되어 있고, 진공배기를 위한 포트(Vacuum port)가 부착되어 있다. Table 1에 PSICS의 구성요소 사양을 정리한다.

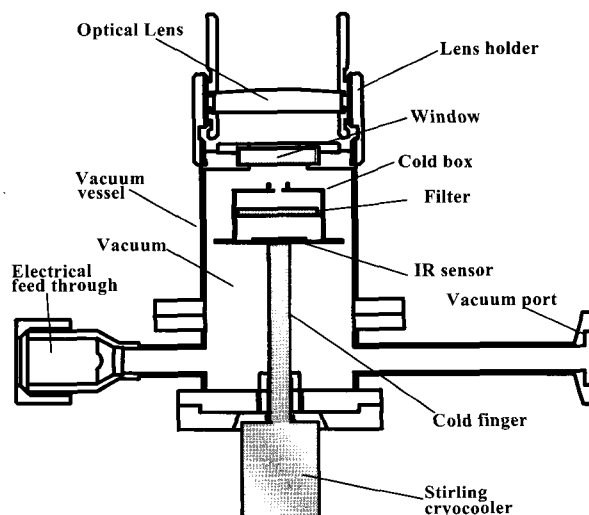


Fig. 1. Cross-sectional diagram of PSICS.

\* 정 회 원: 한국기초과학지원연구원 선임연구원

\*\* 정 회 원: 한국기초과학지원연구원 책임연구원

원고접수: 2005년 09월 09일

심사완료: 2005년 09월 23일

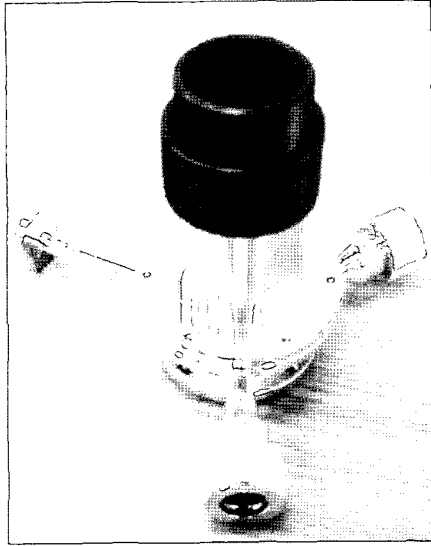


Fig. 2. Photographs of cryostat.

Table 1. Specification of PSICS.

Element	Specification
Lens	Material : Germanium Dia. : 40mm (effective dia. : 32mm) Thickness : 7.6mm Characteristic: aspheric lenses
Window	Material : CaF <sub>2</sub> Dia.: 25.4mm (effective dia.: 18.4 mm) Thickness : 5mm Band pass : 0.19 ~ 0.72 μm
Filter	Material : Sapphire Dia.:25.4mm (effective dia.: 20.32 mm) Thickness : 1.02mm Band pass : 3.8 ~ 4.8 μm
IR Sensor	Array Size : 320 x 256 Size : 12.2 x 9.8 mm
Cryocooler	Cooling capacity : 0.5W @ 80K

### 3. PSICS 열설계

#### 3.1 PSICS 열부하

PSICS의 열부하는 복사열침입, IR센서 신호선의 전도열침입 및 주울열 (Joule heating), IR 센서의 자체발열이 있다. 이 중 센서 자체의 발열은 센서 고유의 특성이므로 PSICS의 효율적 냉각을 위해서는 복사와 신호선의 열침입량을 줄이고 정확한 예측을 하여야 한다. 복사열침입은 적층단열재(MLI, Multi-Layer Insulation)를 적층하였을 경우와 미적층하였을 경우를 비교검토하기 위해 2가지 경우에 대해 고려하였고, 신호선의 열침입량은 시판하는 신호선 (Manganin wire)의 사양을 이용하여 계산하였다. MLI를 적층하지 않았을 경우의 복사열침입량은 상용소프트웨어 (Ansys)를 이용하여 계산하였다. 방사율은 진공용기(SUS 304):

0.11, cold box(Copper) : 0.06, window : 0.96을 이용하였다. MLI 적층시의 복사열침입량은 식 (1)을 이용하여 산출하였다.

$$Q_{Radiation} = \frac{\sigma(T_i^4 - T_j^4)}{\frac{1 - e_i}{e_i A_i} + \frac{1}{A_j} \left( \frac{1}{e_j} + \frac{2N}{e_s} - N \right)} \quad (1)$$

여기서, 하첨자 I는 상온(300K), j는 저온(80K)을 나타낸다. MLI의 방사율 e<sub>s</sub>는 0.05를 사용하였다. IR 센서 신호선의 전도 및 주울열의 계산은 지름 0.127mm, 길이 200mm의 신호선(Manganin wire) 11개를 계산한 결과이다. IR 센서 자체 발열은 센서 고유의 특성을 나타내고 있다. 계산 결과를 Table 2에 정리하였다.

Table 2. Heat load of PSICS.

	Heat load (mW)	Remark
Radiation	8.5	MLI 30layers
	116.5	without MLI
IR sensor signal line	2.7	conduction
IR sensor heating	~10 <sup>-2</sup>	Joule heat
Total	30	
	41.2	MLI 30layers
	149.2	without MLI

#### 3.2 Cold box 온도분포

Fig. 3에 나타낸 상용소프트웨어인 Ansys를 이용한 해석 모델을 이용하여 cold box (두께 0.4mm)의 냉각상태의 온도분포를 구하였다. 이 때의 열부하는 해석을 통하여 도출한 MLI를 적층하지 않았을 경우의 복사열침입량 116.5mW와 IR센서의 자체 발열 30mW를 이용하여 최대 열부하를 가정하였다. 해석에서 냉동기의 cold tip과 cold box의 결합부분을 80K로 고정하였고, 그 부분은 500mW의 냉동기로 냉각되는 것으로 가정하였다. Fig. 4에 Fig. 3의 모델을 이용한 cold box의 2차원 열해석 결과인 온도분포를 나타내었다. cold box 자체의 온도는 전체적으로 0.12K 이하의 균일한 온도 분포로 냉각될 수 있음을 확인하였다.

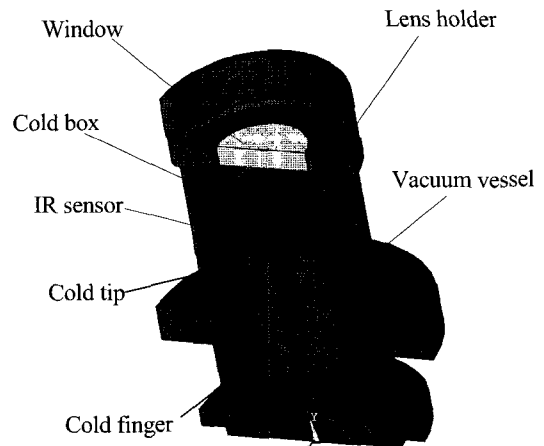


Fig. 3. Thermal analysis model.

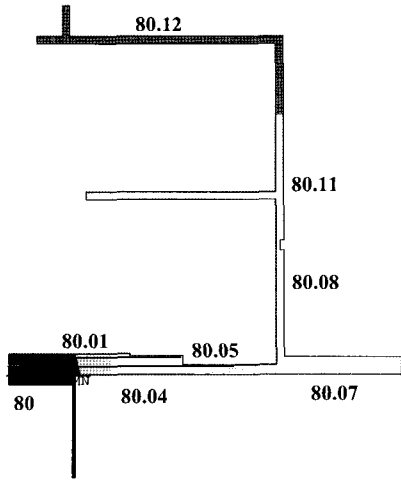


Fig. 4. Temperature distribution on the cold box.

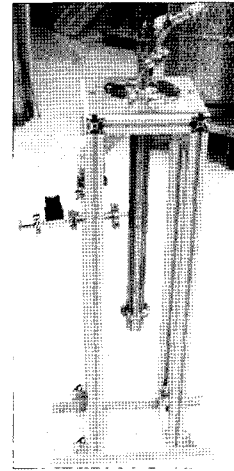


Fig. 6 Photograph of experimental setup.

#### 4. PSICS 복사열 침입량 측정

##### 4.1 실험장치 및 실험방법

액체질소를 이용한 증발열량법[4,5]을 이용하여 cold box의 복사열 침입량을 측정하였다. 증발열량법은 증발 잠열을 알고 있는 액체의 열침입에 의한 증발량을 열침입량으로 환산하여 열침입량을 구하는 실험법이다. 앞 절에서 설명한 cold box를 통한 복사 열침입량을 측정하기 위해 Fig. 5에 보인 것과 같은 실험용기를 제작하였다. 실험용기는 진공용기와 액체질소 용기로 구성된다. 진공용기의 밑단에는 PSICS와 같은 복사열 침입 조건을 구성하기 위해 창이 설치되어 있다. 액체질소 용기 하단에는 cold box를 부착할 수 있도록 되어 있다. 실험방법은 Fig. 5의 (a)에 보인 것처럼 진공용기 속에 설치된 액체질소용기끝단에 cold box를 부착하지 않고 실험용기 자체의 열부하를 측정한다. 이것은 실험용기 자체의 배경 열부하에 해당된다. 그 후 (b)에 보인 것처럼 액체질소 용기 끝단에 cold box를 부착하고 열침입량을 측정한다. 여기서 측정된 열부하에서 (a)에서 측정된 배경 열부하를 빼면, 그 값이 cold box를 통한 복사열 침입량에 해당한다. 그림 6에 실험장치의 사진을 보인다.

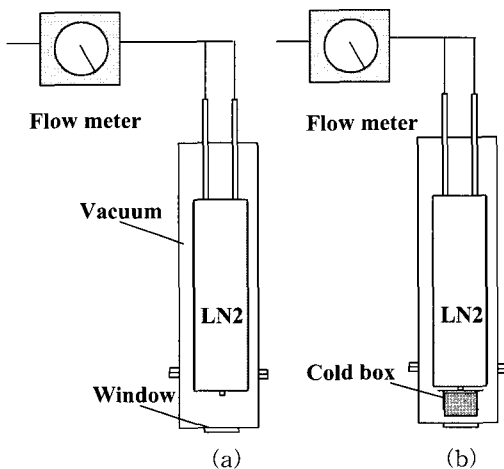


Fig. 5 Experimental method for measuring radiation heat load of cold box.

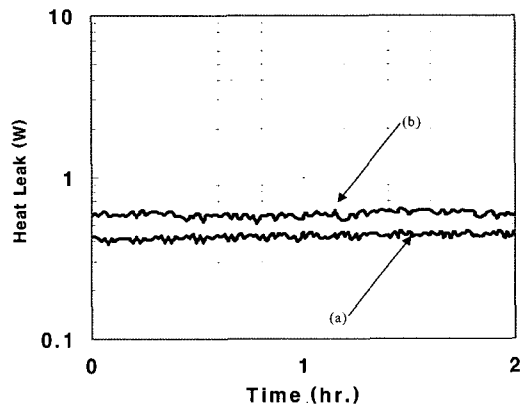


Fig. 7. Experimental results of the radiation heat load of the cold box. (a) background heat load, (b) cold box and background heat loads.

##### 4.2 실험결과 및 토의

Fig. 7에 열침입량의 시간 이력을 보인다. (a)는 액체질소 용기 하단에 cold box를 붙이지 않고 측정한 열침입량이고, (b)는 액체질소 용기 하단에 cold box를 부착하고 측정한 열침입량이다. 이 실험에서는 복사에 의한 최대 복사 열침입량을 측정하기 위해 cold box에 MLI를 적용하지 않았고, 신호선도 연결되어 있지 않다. 즉, (a)의 열침입량은 실험용기의 자체의 배경 열침입량에 해당하고, (b)는 배경 열침입량에 cold box를 통한 복사 열침입량이 더해진 결과이다. 그러므로, 측정 대상인 cold box를 통한 열침입량은 두 측정결과의 차이이고, 그 값은 146mW에 상당한다. 이 열침입량은 Table 1에 보인 MLI를 적용하지 않았을 경우, 즉 최대 복사열침입량인 116.5mW와 거의 일치한다. 다소 차이가 있는 것은 계산에 사용한 복사매체, 즉, cold box와 진공용기 벽면의 방사율 차이와 cold finger와 액체질소용기의 형상차이의 의한 형태계수의 차이에 의한 것으로 생각된다. MLI를 적용하였을 경우에는 MLI의 적용방식에 따라 열침입량이 달라지므로 적용시의 복사열침입량 측정에는 최적 적용방식을 고려해야 한다. MLI를 적용하였을 경우의 열침입량 측정은 추후 진행될 예정이다.

복사 열침입량의 측정에 의해 열설계 결과를 확인할 수 있었으며, 그 결과 80K에서 500mW의 냉동능력을

갖는 냉동기로 충분히 냉각시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

우주망원경 냉각시스템 시험모델 (PSICS)의 열설계 결과를 복사 열부하 측정실험을 통해 검증하였다. 실험 방법은 증발열량법을 이용하였다. 그 결과 cold box를 통한 최대 복사 열침입량은 계산 결과와 거의 일치하여 500mW의 냉동기로 충분히 냉각 가능한 열부하임을 실험적으로 검증하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 기초기술이사회 협동연구과제 연구비로 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] M. Murakami, K. Narasaki "Cryogenic System Consideration for HII/L2 Mission", The Institute of Space and Astronautical Science Report SP No.14, pp.315-321, 2000.
- [2] G. Fujii et al., "On-orbit thermal behaviour of the IRTS cryogenic system", Cryogenics Vol. 36, No.10 pp.731-739, 1996.
- [3] B. collaudin, N. Rando "Cryogenics in space: a review of the missions and of the technologies", Cryogenics Vol 40, pp.797-819, 2000.
- [4] 김동락, 양형석, 김도형, 조승연, 정원목, 이제묘 "열량법에 의한 열침입량 계측", 2003년도 한국초전도 저온공학회 학술대회 논문집, pp. 328-331, 2003.
- [5] 김도형, 김동락, 양형석, 정원목, 황시돌 "열량법을 이용한 MLI의 단열성 평가", 2004년도 한국초전도 저온공학회 학술대회 논문집, pp. 74-77, 2004.

#### 저 자 소 개



양형석(梁炯哲)

1969년 05월 08일생, 1994년 홍익대학교 기계공학과 졸업, 1998년 Tsukuba 대학 대학원 이공학연구과 졸업(공학석사), 2001년 동대학 대학원 공학연구과 저온공학전공 (공학박사), 현재 한국기초과학지원연구원 고자기장개발팀 선임연구원.



김동락(金東洛)

1953년 04월 04일생, 1976년 경북대학교 물리학과 졸업, 1993년 일본 오사카 시립대학 대학원 학위과정 수료(초저온 물리학, 이학박사), 1993 ~ 현재 : 한국기초과학지원연구원 고자기장개발팀 책임연구원.



이병섭(李炳燮)

1968년 9월 3일생, 1994년 충남대학교 기계공학과 졸업, 1996년 동 대학원 기계공학과 공학석사, 2001년 8월 동 대학원 기계공학과 공학박사 졸업(Ph.D), 2004년 6월 ~ 2004년 11월 미국 NHMFL 방문연구원, 현재 한국기초과학지원연구원 고자기장개발팀 선임연구원.



최연석(崔然惜)

1969년 4월 5일생, 1994년 홍익대 기계공학과 졸업, 1996년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 2004년 Florida State Univ. 기계공학과 졸업(공학박사), 2000년~2005년 NHMF 연구원, 현재 KBSI-NHMFL RCC 선임연구원.