

적외선 우주배경복사 관측 실험 검교정  
CALIBRATION PROCESS OF THE COSMIC INFRARED BACKGROUND EXPERIMENT

D.-H. LEE<sup>1</sup>, U.-W. NAM<sup>1</sup>, G.-H. KIM<sup>2</sup>, S. PAK<sup>3</sup>, M. ZEMCOV<sup>4,5</sup>, J. J. BOCK<sup>4,5</sup>,  
J. BATTLE<sup>4</sup>, I. SULLIVAN<sup>5</sup>, P. MASON<sup>5</sup>, K. TSUMURA<sup>6</sup>, T. MATSUMOTO<sup>6</sup>,  
S. MATSUURA<sup>6</sup>, T. RENBARGER<sup>7</sup>, AND B. KEATING<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 305-348, Korea

<sup>2</sup>Korea Basic Science Institute, Daejeon, 305-333, Korea

<sup>3</sup>Kyung Hee University, Gyeonggi-do 446-701, Korea

<sup>4</sup>Jet Propulsion Laboratory, Pasadena CA 91109

<sup>5</sup>California Technology Institute, Pasadena CA 91125

<sup>6</sup>Institute of Space and Astronautical Science, Tokyo, Japan

<sup>7</sup>University of California, San Diego, CA 92093

E-mail: dhlee@kasi.re.kr

(Received November 30, 2007; Accepted December 14, 2007)

ABSTRACT

The international cooperation project CIBER (Cosmic Infrared Background Experiment) is a rocket-borne instrument, of which the scientific goal is to measure the cosmic near-infrared extra-galactic background to search for signatures of primordial galaxy formation. CIBER consists of a wide-field two-color camera, a low-resolution absolute spectrometer, and a high-resolution narrow-band imaging spectrometer. Currently, all the subsystems have been built, and the integration, testing, and calibration of the CIBER system are on process for the scheduled launch in June 2008.

*key words:* instrument, optics, infrared, cosmic background

1. 서론

CIBER 프로젝트는 한국천문연구원 이 미국의 제트추진 연구소 (Jet Propulsion Laboratory, JPL), 캘리포니아공대 (California Technology Institute, Caltech) 및 일본의 우주 과학연구소 (Institute of Space and Astronautical Science, ISAS) 등과 함께 진행하는 국제 공동 연구로서, 미국 NASA의 과학로켓에 적외선 카메라 및 분광기를 탑재하여 근적외선 (1-2  $\mu\text{m}$ ) 영역에서의 우주배경복사를 관측함으로써 우주 초기의 별 및 은하에 대한 연구를 수행하려는 목적을 가지고 있다 (Bock et al. 2006).

우주 초기의 원시성 (종족 III)들이 초기 은하를 형성하면서 방출하는 강한 원자외선 빛은 두가지 특징적인 형상을 남기는데, 하나는 Ly- $\alpha$  분광 형상이고, 다른 하나는 공간적 비등방성이다 (Cooray & Yoshida 2004). 이 형상들이 오늘날 지구까지 도달하면서 적색이동을 겪게 되어 약 1-2  $\mu\text{m}$  정도의 근적외선 영역에서 관측되게 된다 (Matsumoto et al. 2005). 이를 위해 CIBER의

두 대의 광시야카메라 (Imager)는 근적외선 우주배경복사 공간 섭동을 측정하며, 저분산분광기 (Low Resolution Spectrometer, LRS)는 근적외선 우주배경복사의 스펙트럼을 관측할 예정이다. 한편, 고분산 분광기 (Narrow Band Spectrometer, NBS)는 근적외선 우주배경복사의 잡음에 해당하는 태양계 내의 황도광을 정밀 측정하는 것이 목표이다 (Lee et al. 2006).

CIBER는 그림 1에서와 같이 로켓의 경통 일부를 구성하고 있으며 모든 기기는 액체 질소를 이용한 cryostat 안에 장착되어 절대 온도 77 K의 온도를 유지한 상태에서 작동된다. 카메라와 분광기에 공통적으로 운용되는 전자부 시스템은 데이터 획득 및 로켓과의 인터페이스를 담당한다.

현재 CIBER는 모든 기기가 제작 완료되었으며, 미국 Caltech에서 조립 및 시험, 그리고 검교정을 진행하는 중이다. 2008년 초까지 모든 시험 및 검교정을 마친 후 2008년 6월 미국 NASA의 화이트샌드 기지에서 로켓 발사를 예정하고 있다. 천문연은 이 전체 과정에 참

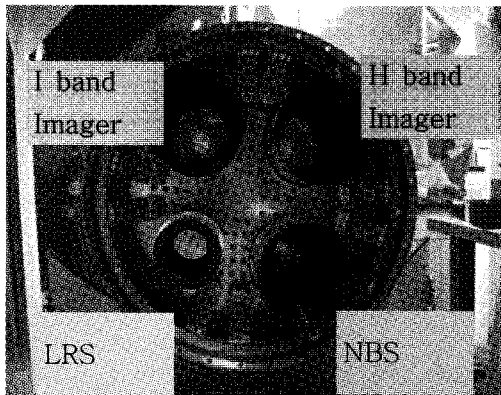
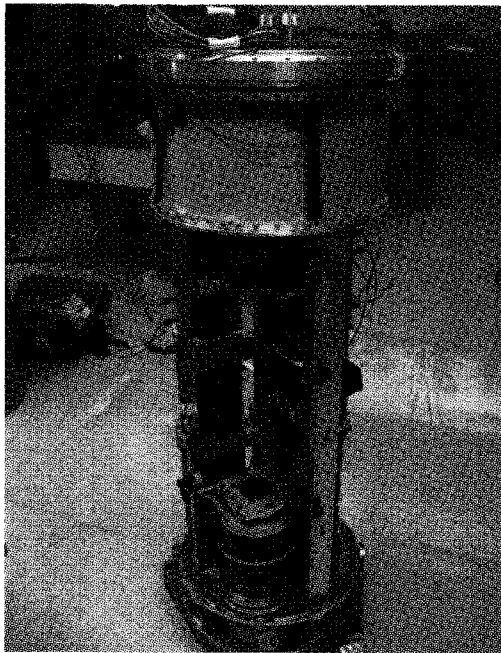


그림 1. CIBER의 측면사진(위) 및 밀면사진(아래).

여함으로써 우주용 적외선카메라 기술을 습득하고 이 기술을 한국에서 개발 중인 과학기술위성 3호 주탑재체 “다목적 적외선 영상시스템” 개발에 활용할 예정이다.

**2. CIBER 기기 및 실험**

**2.1 CIBER 기기**

각각 0.9  $\mu\text{m}$  (I band) 및 1.6  $\mu\text{m}$  (H band) 대역의 파장에 맞추어 설계, 제작된 두 개의 광시야 적외선카메라는 10 cm 구경을 가지는 굴절망원경이다. 초점면에는 1024 x 1024 HAWAII 센서가 장착되어 2도 x 2도의 시야를 7"의 각분해능으로 관측한다. 저분산 분광기는 0.8-2.0  $\mu\text{m}$  파장 영역의 근적외선 배경복사 세기를 정

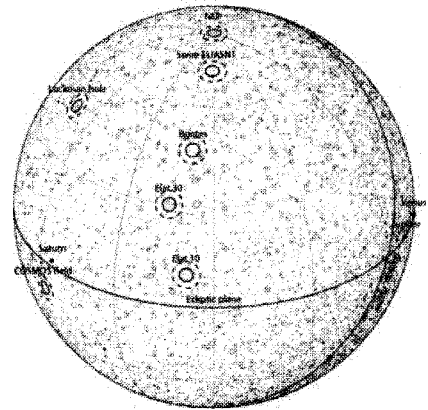
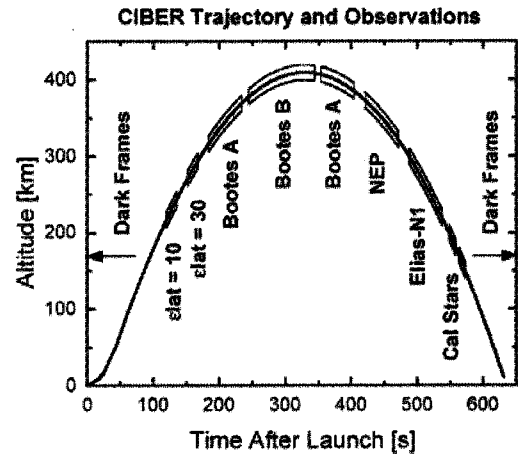


그림 2. CIBER 궤도 (위) 및 관측 필드 (아래)

확하게 측정하도록 설계, 제작된다. 저분산 분광기는 구경이 7.3 cm인 굴절 망원경으로 프리즘이 삽입되어 R ~ 20 정도의 분해능을 가진다. 256 x 256 PICNIC 적외선 센서를 사용하여 한 픽셀의 크기가 40  $\mu\text{m}$  정도이며, 네 개의 슬릿이 4도의 시야를 60"의 각분해능으로 각각 관측하게 되는데, 하나의 슬릿당 256 스펙트럼이 나오므로 총 1024 개의 스펙트럼이 관측 가능하다. 고분산 분광기는 7.5 cm의 구경을 가지는 굴절망원경으로 협대역 필터를 이용하여 0.8542  $\mu\text{m}$  부근의 좁은 영역의 파장을 관측하는데, 패브리-페로 분광기를 삽입하여 파장 분해능이 약 1000 정도가 되도록 분광 관측한다. 저분산 분광기와 같은 256 x 256 PICNIC 적외선 센서를 사용하며 시야각이 8.5 x 8.5도로 크기 때문에 픽셀의 각분해능은 2분이 된다.

**2.2 로켓 관측**

위의 그림 2는 로켓의 궤도 및 관측에 대한 개념도이다. CIBER는 고도 200 km 이상에서 약 300-390초 동

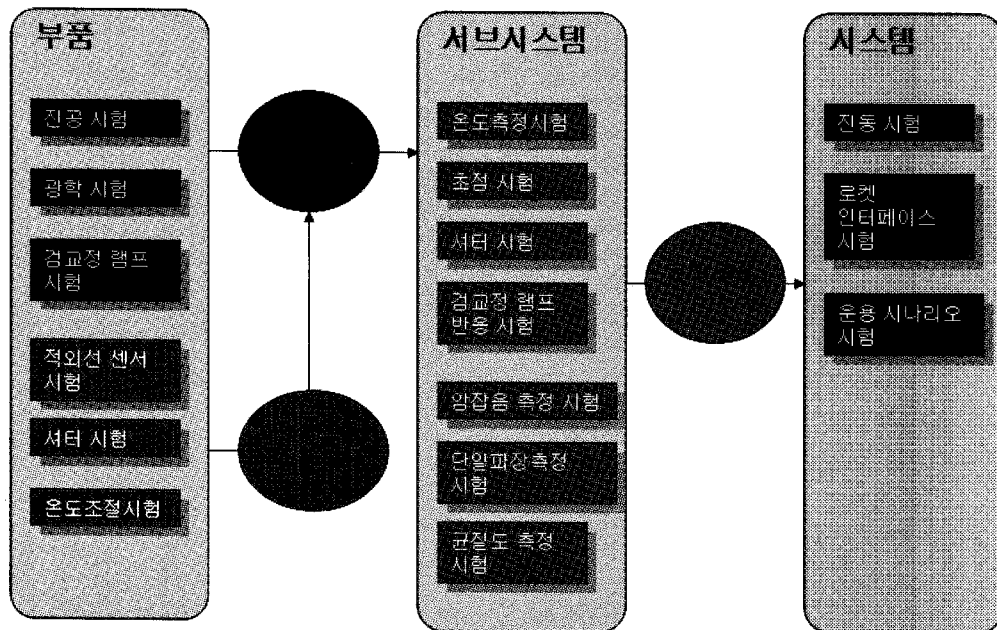


그림 3. CIBER 조립, 시험 및 검교정 구성도

표 1. CIBER 구성 서브시스템 및 부품

서브시스템	부품
저온유지장치 (Cryostat)	진공 밸브 (Vacuum valve)
	액체질소 밸브 (LN2 valve)
	하네스 (Harness)
	온도 감지기 (Thermometry)
광학계 (Optics)	광학기기 (Imager, NBS, LRS)
	검교정 램프 (Calibration lamp)
전자부 (Electronics)	데이터처리부 (Array Process boards)
	시스템관리부 (HK board)
센서부 (Focal Plane Assembly)	적외선 센서 (HAWAII or PICNIC)
	셔터 (Shutter)
	온도조절장치 (Temperature control)

안 다섯 개의 지역을 관측하며, 관측 데이터는 실시간으로 지상으로 전송된다. 각 관측 지역에 대한 자세한 설명은 Bock et al. (2006)을 참조하기 바란다. 관측 예정일은 2008년 6월에 1차 로켓 발사가 예정되어 있으며 2009년 2월에 2차 로켓 발사 및 관측을 수행할 예정이다.

### 3. CIBER 조립 및 검교정

그림 3은 CIBER의 조립, 시험 및 검교정 과정을 도식화하여 그린 것이다. 각 부분에 대한 자세한 내용은 다음과 같다.

#### 3.1 CIBER 부품 및 장비

CIBER의 각 부품들이 모두 제작되면 자체적인 시험 및 검증을 마친 뒤 조립된다. 표 1에서 CIBER를 구성하는 각 부품들 및 이들이 구성하는 서브시스템들을 나열하였다.

부품들을 조립하기 전에 각각의 성능에 대한 검증 시험을 수행한다. 다음은 각 부품들에 대한 시험 항목 및 검증 내용이다.

- 진공 밸브: 저온유지장치의 진공이 안정적으로 유지되는지 확인.
- 액체질소 밸브: 저온유지장치의 온도가 액체질소에 의해 안정적으로 냉각되는지 확인. 특히 로켓이 운행중에 중력이 역전되는 기간에도 액체질소가 안정적으로 저온유지장치에 공급되는지 확인.
- 하네스: 서브시스템을 조립하기 전에 모든 하네스가 전기적으로 올바르게 연결되었는지 확인.
- 온도 감지기: 저온유지장치의 각 중요 부분에 온도 센서를 부착하고 이들이 제대로 동작하는지 확인.
- 광학기기: Imager, NBS, LRS의 광학 성능이 설계 요구 조건을 충족하는지 확인.
- 검교정 램프: 검교정 램프를 조립하여 주어진 파장 대역의 빛을 발광하는지 확인.
- 데이터처리부: 적외선 센서를 구동하여 입력되는 아날로그 신호를 증폭, 디지털 신호로 전환하며, 지상 전자장비 (GSE)와의 고속 직렬 통신을 통해 데이터를 올바르게 전달하는지 확인.

- 시스템관리부: 검교정 램프 및 셔터, 그리고 온도조절장치 등을 올바르게 구동하고 모니터링하는지 확인.
- 적외선 센서 (HAWAII or PICNIC): 적외선 센서가 올바르게 동작하는지 확인.
- 셔터: 셔터드라이브의 입력에 따라 셔터가 올바르게 열리고 닫히는지 확인.
- 온도조절장치: 미리 지정된 온도 조건에 따라 센서부의 온도를 올바르게 조절하는지 확인.

한편, CIBER의 부품 및 서브시스템을 조립, 시험 및 검교정하기 위해 여러 가지 장비가 필요하다. 다음에서 각 필요 장비 및 역할을 소개하였다.

- 청정커튼 및 기타용품: 청정커튼은 CIBER 적외선 센서 및 광학계를 보관, 조립하는 공간으로 쓰인다. 청정실을 유지하기 위해 청정매트 및 장갑, 덧신, 청정모 등을 이용하며 전용 진공 청소기도 있다.
- 이온 발생기 및 정전기 방지 장비 : 정전기에 민감한 적외선 센서의 정전기를 제거하기 위해 이온 발생기를 구비하였다. 그 밖에 적외선 센서를 보관할 때 접지 코넥터를 연결하여 정전기를 방지한다.
- 기중기 및 리프터: CIBER를 조립하거나 이동할 때 사용되는 기중기이다. 특히 CIBER를 광학 시험하기 위해 광학 테이블에 올릴 때 꼭 필요하다.
- 액체질소탱크 및 방류시스템: CIBER를 냉각시키기 위해 액체질소를 사용하며 액체질소를 다루기 위해 여러 도구를 사용한다. 특히 일정한 냉각 및 냉각 온도 유지를 위해 방류시스템은 컴퓨터에 연결되어 프로그램에 의해 액체질소의 방류를 조절한다.
- 광학 테이블 (Optical bench): 광학 테이블은 CIBER의 초점 시험(Focus test), 단일 파장 시험(Monochrometer test) 등 다양한 광학 시험을 하기 위해 필요하다.
- 콜리메이터 (Collimator): 콜리메이터는 초점 시험을 위한 일종의 망원경이다.
- 광원 (Light sources): 초점 시험을 수행하기 위해 CIBER의 모든 파장 대역을 포함하는 광원이다.
- 단일 파장 발생기 (Monochrometer): 각 기기의 파장에 따른 검교정을 수행하기 위해 필요하다. 주어진 입력에 따른 일정한 간격의 단일 파장 빛이 방출된다.
- 시험용 듀어 (Test dewar): 시험용 듀어는 적외선 센서 및 센서부를 미리 간단히 시험하기 위한 목적으로 사용된다. 하네스가 구비되어 있어서 영상을 얻거나 온도 변화를 모니터링할 수 있다.
- 전류공급장치 (Constant current source): 셔터나 검교정 램프를 시험할 때 유용하다.
- 공작실 (Machine shop): 공작실에는 기본적인 선반과

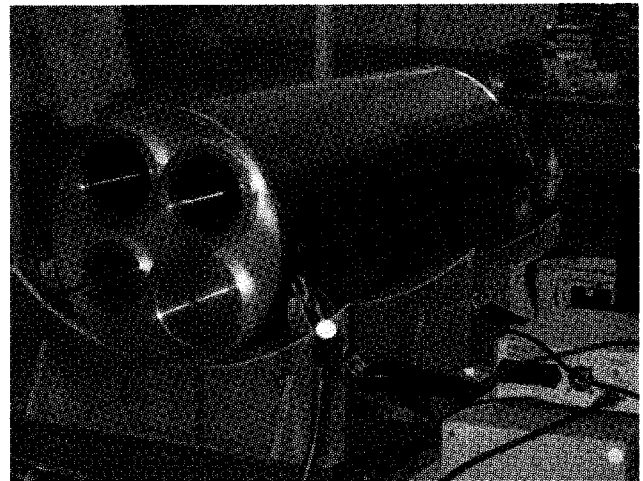


그림 4. 조립된 CIBER 사진

드릴등 공구가 비치되어 있어 원하는 때에 필요한 기계 가공을 할 수 있으며 또한 접착제 등을 제조하는 공간으로 사용된다.

- 지상전자장비 (GSE, Ground Station Equipment): CIBER 지상 전자 장비는 CIBER의 성능 시험, 검교정, 관측자료처리 소프트웨어 개발 및 로켓 발사 운용 등의 임무를 수행한다.

### 3.2 CIBER 서브시스템 조립 및 검교정 과정

CIBER의 각 부품들에 대한 시험이 완료되면 CIBER를 조립하여 각 서브시스템에 대한 시험을 수행하게 된다. 이때 CIBER를 조립하는 순서는 다음과 같다.

- ① 광학기기를 저온유지장치에 조립
- ② 적외선 센서, 셔터, 온도조절장치를 포함하는 센서부 조립
- ③ 정밀거리측정 (Metrology)를 수행하여 FPA의 기준면에서 적외선 센서가 어느정도의 정확도로 위치하였는지 확인
- ④ 센서부를 저온유지장치에 조립
- ⑤ 검교정 램프 조립
- ⑥ 저온유지장치의 각 부분에 온도센서 부착
- ⑦ 모든 하네스 연결 및 확인
- ⑧ 저온유지장치 열차단막 (thermal shield) 부착
- ⑨ 저온유지장치 커버 (skin) 조립
- ⑩ 전자부를 포함하는 전자 박스 조립
- ⑪ 진공 밸브 및 액체질소 방류 시스템 연결
- ⑫ 지상전자장비 설치 및 연결

CIBER의 조립이 완성되면 기중기를 이용해 광학테이블 위에 위치시킨다. 다음 그림 4는 조립된 CIBER의 사진이다.

표 2. CIBER 서브시스템 시험 항목

서브시스템 시험	필요 장비
온도측정시험 (Thermometry)	온도측정기 (Thermometer)
초점 시험 (Focus test)	콜리메이터, 광원, 지상전자장비
셔터 시험 (Shutter test)	시스템관리부 (HK board)
검교정 램프 반응 시험 (Cal. lamp test)	시스템관리부, 지상전자장비
암잡음 측정 시험 (Dark test)	지상전자장비
단일파장측정 시험 (Monochrometer test)	지상전자장비, 단일 파장 발생기 (Monochrometer)
균질도 측정 시험 (Flat Field test)	진공 챔버 (Vacuum chamber), 지상전자장비

- 온도측정시험: 저온유지장치 내에 부착된 각 온도 센서들의 온도를 모니터링하여, 저온유지장치가 액체 질소에 의해 제대로 냉각되고 있는지 확인한다.
- 초점 시험: 광학계와 센서부가 정확히 정렬되었는지 확인하기 위한 시험이다. 이 시험을 통해 얻은 결과를 바탕으로 적외선 센서를 제조립할 때 위치를 변화시킨다. 초점 시험이 정확하려면 콜리메이터의 광학계에 오차가 없어야 한다. 콜리메이터 부경의 초점면에 점 광원을 위치하면 주경을 통해 평행광이 나오게 되며 이 빛이 CIBER의 광학계를 통해 적외선 센서에 도달하게 된다. 콜리메이터의 초점이 정확하고, CIBER의 광학계와 적외선 센서가 정확한 위치에 정렬되어 있다면 적외선 센서의 단일 픽셀에 영상이 나오게 된다. 그림 5는 이러한 정초점 (best focus)을 찾기 위한 실험 결과를 보여주고 있다. 그림 5에서 가로축은 콜리메이터의 초점을 변화시킨 값이고, 세로축은 이에 따른 영상의 FWHM을 픽셀로 나타낸 것이다. 실험 결과에 따르면 콜리메이터의 정초점으로부터 약 2 mm 떨어진 곳에서 H band Imager의 정초점이 위치한 것을 알 수 있다. 콜리메이터와 H band Imager의 F/# 비를 고려하면 이는 H band 적외선 센서부가 광학계로부터 약 200 um의 비초점 면에 위치한다는 것을 의미한다. 이러한 오류는 추후 정밀거리측정 시험 (Metrology)을 통하여 수정된 후 제조립될 것이다. 그림 6은 H bandImager의 200 um 비초점 (off-focus) 영상과 정초점 (best focus) 영상을 각각 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 정초점인 경우에 콜리메이터의 광원(검은색)이 센서의 단일 픽셀에 들어가 있지만 200 um 비초점인 경우에는 두 픽셀에 걸쳐 있는 것을 볼 수 있다.

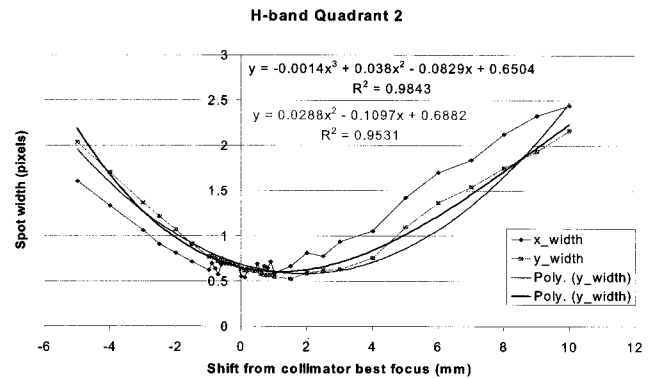


그림 5. H band Imager 초점 시험 결과. 파란색은 센서면의 수직방향, 붉은색은 수평방향을 나타낸다.

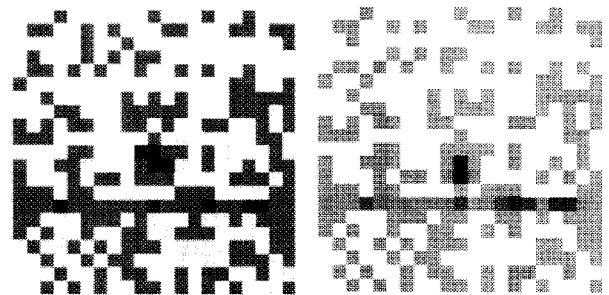


그림 6. H band Imager 200 um 비초점 (off-focus) 영상 (좌) 및 정초점 (best focus) 영상 (우)

- 셔터 시험: 셔터는 로켓 발사 시에 적외선 센서를 보호하고, 관측 중간 중간에 암잡음을 측정하기 위해 사용된다. 셔터는 매우 안정적으로 동작해야 하는데, 셔터를 구동시킬 때 사용되는 솔레노이드 코일 (solenoid coil)은 셔터가 냉각됨에 따라 저항값이 바뀌므로 냉각 상태일 때 셔터의 수명 측정 시험 (life-time test)를 하는 것이 중요하다.
- 검교정 램프 반응 시험: 검교정 램프는 로켓이 궤도를 운행할 때 CIBER를 실시간으로 검교정하기 위해 필요하다. 따라서 검교정 램프의 영상 결과를 냉각 상태에서 정확히 알고 있는 것이 중요하다. 다른 그림 7은 H band Imager의 검교정 램프 영상이다. 적외선 센서의 우상귀 면에 검교정 램프의 영상이 나타나있는 것을 볼 수 있다. 검교정 램프의 이 영상은 램프에 흘려주는 전류의 세기에 따라 더 선명해지는데, 지상에서 미리 정확한 선명도를 측정하여 표로 만들어 놓으면 실제 로켓 실험 중 측정된 검교정 램프의 영상과 비교하여 적외선 센서의 감응도를 구할 수 있다.

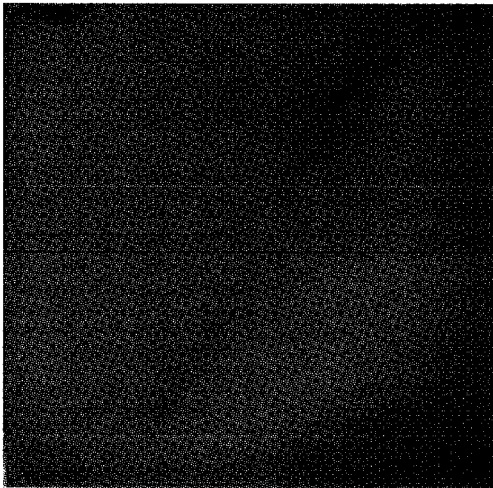


그림 7. H band Imager 검교정 램프 영상

- 암잡음 측정 시험: 암잡음 측정 시험은 셔터를 닫고 광학계의 시야를 완전히 가린 상태에서 적외선 센서의 특성, 즉 암잡음 세기 (Dark current) 및 암잡음 분산 (Dark noise)을 구하기 위한 시험이다. 암잡음 세기는 단위 시간당 발생하는 픽셀 당 전자 수를 의미하며 암잡음 분산은 전체 픽셀에 대한 암잡음 세기의 평균 분포 (RMS) 값을 의미한다. 그러므로 암잡음 세기가 클수록 시간당 센서의 잡음도가 커지고 암잡음 분산이 클수록 센서의 균질도가 떨어지게 된다. 한편, 적외선 센서의 입력 신호로써 VRESET과 Biasgate를 입력하는데, VRESET은 광량에 따른 적외선 센서의 반응 범위를 결정하고, Biasgate는 적외선 센서 반응 offset을 결정하게 된다. 그림 8은 암잡음 측정 시험 결과 VRESET에 따른 적외선 센서의 출력값, 그림 9는 Biasgate에 따른 적외선 센서의 출력값의 변화를 보여주고 있다. VRESET의 경우 0.65 V 이상에서 포화되는 것을 알 수 있으며, Biasgate의 경우 단지 적외선 센서 출력값의 오프셋만을 결정하는 것이기 때문에 주어진 증폭기 및 디지털변환기 (ADC)의 사양에 따라 Biasgate의 값을 조절할 수 있다.
- 단일파장측정 시험: 각 기기의 스펙트럼 반응을 보기 위하여 단일파장발생기를 이용한 시험을 수행한다. 단일파장발생기는 주어진 파장 범위 안에서 단일 파장의 광원을 순차적으로 방출하는 역할을 한다. 그림 10은 H band Imager의 단일파장측정 시험 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 분홍색 실선은 광학계의 파장에 따른 투과율을 나타낸 것이고, 파란색 점선은 실제 측정값을 나타낸 것이다. 긴 파장으로 갈수록 실제 측정값이 작아지는 이유는 광원인

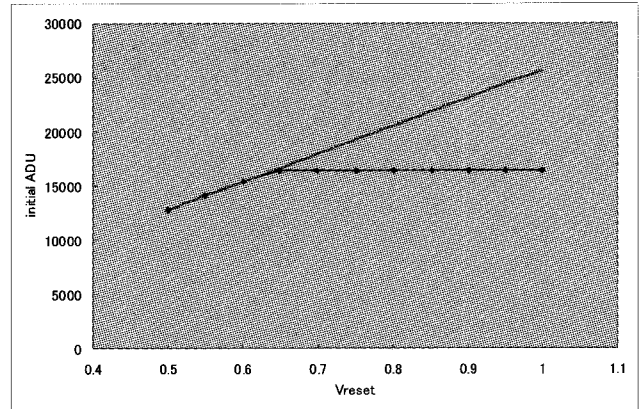


그림 8. VRESET에 따른 H band Imager 출력값

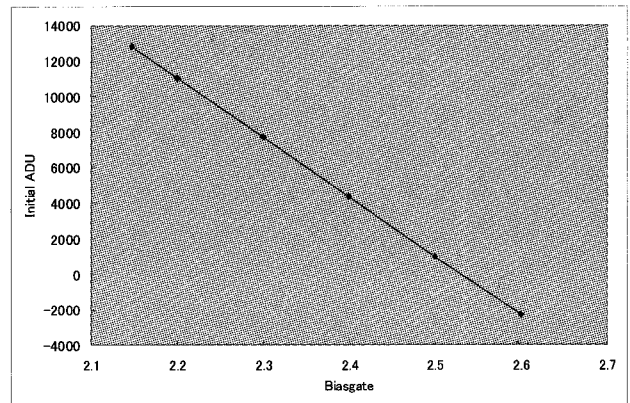


그림 9. Biasgate에 따른 H band Imager 출력값

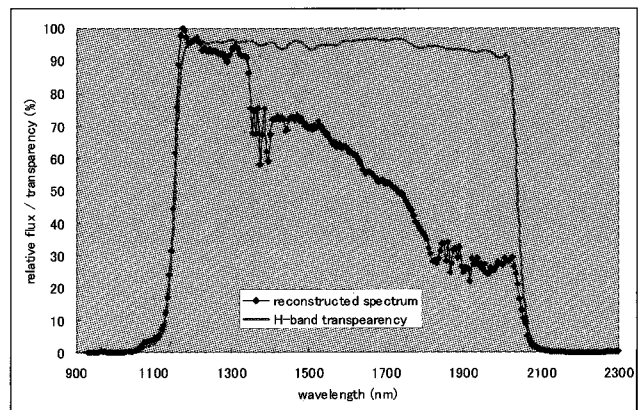


그림 10. H band Imager 단일파장측정 시험 결과

할로겐 램프의 흑체 복사 특성 때문이다. 할로겐 램프의 스펙과 실제 측정 결과를 비교해보면 H band Imager의 광학계 및 적외선 센서가 시스템 요구 조건을 만족하고 있음을 알 수 있다. 한편, 1350 A과 1850 A 대역의 잡음은 실험실 내의 물 분자에 의한

흡수선이 관측된 것이다.

- 균질도 측정 시험: 균질도 측정 시험은 적외선 센서 전체 픽셀의 균질도 (uniformity)를 측정하기 위해 꼭 필요한 시험이다. 진공 챔버 안에 집광구 (Integration sphere)를 위치하고 각 기기의 시야를 집광구 안으로 위치한 후 시험한다. 집광구는 입력단자에서 발광되는 광원의 빛을 모든 시야 방향에서 균일하게 각 기기의 시야에 전달하는 역할을 한다.

### 3.3 CIBER 시스템 로켓 조립 시험

CIBER의 모든 서브시스템에 대한 시험 및 검교정이 완료되면 CIBER를 로켓 본체에 조립하고, 기계적, 전기적 시험을 수행할 예정이다. 시험 내용은 먼저 기계적 인터페이스가 맞는지 확인하고, 전기적 인터페이스를 검증한 후, 로켓 발사 시의 진동에 견딜 수 있는지를 확인하는 진동 시험을 수행한다. 최종적으로는 로켓에서 입력되는 운용 시나리오의 명령에 따라 CIBER가 올바르게 작동하여 데이터를 전송하는지를 확인한다.

## 4. 결론 및 토의

CIBER 프로젝트는 2개의 광시야 카메라, 저분산 분광기, 그리고 고분산 분광기를 NASA의 과학로켓에 탑재하여 근적외선 우주배경복사를 관측하는 국제 공동 연구이다. 근적외선 영역의 우주배경복사 관측 자료를 수집하고, 이를 분석함으로써 우주 초기 별 및 은하에서 방출되는 빛의 스펙트럼과 공간적 분포를 연구할 계획이다. 미국 NASA 제트추진연구소, 일본 우주과학연구소와 공동으로 추진하는 이 프로젝트에 한국에서는 한국천문연구원과 한국기초과학지원연구원 그리고 경희대학교에서 참여한다. 현재 CIBER 각 기기의 제작이 모든 끝난 시점에서 각 서브시스템의 시험 및 시스템 조립, 검교정이 진행 중에 있다. 천문연에서는 이러한 모든 과정에 직접 참여하고 있으며, 이 과정에서 축적된 우주용 적외선 카메라/분광기의 검교정 기술을 과학기술위성 3호 “다목적 적외선 영상시스템”에 직접 활용할 계획이다.

CIBER는 2008년 초까지 검교정 및 환경 시험을 모두 끝내고 2008년 6월에 미국의 화이트샌드 NASA 기지에서 1차로 발사될 예정이다. CIBER의 최종적인 성능 및 검교정 결과는 추후에 다른 논문으로 발표할 계획에 있다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부 과학기술위성 3호 주탑재체 “다목적 적외선 영상시스템” 과제의 일환으로 수행되었다.

### 참고 문헌

- Bock, J., et al., 2006, The Cosmic Infrared Background Experiment New Astronomy Review, 50, 215
- Cooray, A. & Yoshida, N. 2004, MNRAS, First Sources in Infrared Light: Stars, Supernovae and Mini-quasars 351, L71
- Matsumoto, T., et al., 2005, Infrared Telescope in Space Observations of the Near-Infrared Extragalactic Background Light, ApJ 626, 31
- Lee, et al., 적외선 우주배경복사 관측 실험 국제 공동 연구, PKAS, 2006, 21, 2