

적외선 우주배경복사 관측 실험 국제 공동 연구  
INTERNATIONAL COOPERATION OF THE COSMIC INFRARED  
BACKGROUND EXPERIMENT

이대희<sup>1</sup>, 남옥원<sup>1</sup>, 이성호<sup>1</sup>, 진호<sup>1</sup>, 육인수<sup>1</sup>, 김건희<sup>2</sup>, 박수종<sup>3</sup>,

<sup>1</sup>한국천문연구원

<sup>2</sup>한국기초과학지원연구원, <sup>3</sup>경희대학교

D.-H. LEE<sup>1</sup>, U.-W. NAM<sup>1</sup>, S. LEE<sup>1</sup>, H. JIN<sup>1</sup>, I.-S. YUK<sup>1</sup>, K.-H. KIM<sup>2</sup>, S. PAK<sup>3</sup>,

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

E-mail: dhlee@kasi.re.kr

<sup>2</sup>Korea Basic Science Institute, Daejeon, 305-333, Korea, <sup>3</sup>Kyung Hee University, Gyeonggi-do 446-701, Korea

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

ABSTRACT

A Korean team (Korea Astronomy and Space Science Institute, Korea Basic Science Institute, and Kyung Hee University) takes part in an international cooperation project called CIBER (Cosmic Infrared Background Experiment), which has begun with Jet Propulsion Laboratory (JPL) in USA and Institute of Space and Astronautical Science (ISAS) in Japan. CIBER 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. The Korean team is in charge of the ground support electronics and manufacturing of optical parts of the narrow-band spectrometer, which will provide excellent opportunities for science and technology to Korean infrared groups.

Keywords: instrument, optics, infrared, cosmic background

1. 서론

2006년 8월에 “우주용 적외선카메라 개발 및 로켓관측” 과제가 기초기술연구회의 협동과제로 선정됨으로써 한국천문연구원(KASI), 한국기초과학지원연구원(KBSI), 그리고 경희대학교로 구성된 적외선 연구 그룹이 적외선 우주배경복사 관측 국제 공동 연구(Cosmic Infrared Background Experiment, CIBER)에 본격적으로 참여하게 되었다. CIBER 프로젝트는 미국의 제트추진연구소 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) 및 일본의 우주과학연구소 (Institute of Space and Astronautical Science, ISAS) 등이 주축이 되어 진행되는 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.

우주 초기의 원시성 (종족 III)들이 초기 은하를 형성하면서 오늘날 관측되는 근적외선 파장 대역에 두가지 특징적인 형상을 남기는데, 하나는 Ly- $\alpha$  분광 형상이고, 다른 하나는 공간적 비등방성이다 (Cooray & Yoshida 2004). 빅뱅 이후 최초의 별들이 생성되면, 이들 별들에서 방출되는 빛에 의해 성간 공간에 있는 수소 원자가 재이온화되기 시작한다. 따라서 Ly- $\alpha$ 선(121.6 nm)보다 에너지가 큰, 즉 파장이 짧은 빛은 수소 원자에 의해 차단되게 되며, 원자외선 영역에서의 이러한 형상을 Ly- $\alpha$  분광 형상이라 한다. 적색이동이 약 10-20에 이르는 우주 초기에서 방출된 이 빛이 오늘날 지구까지 도달하면서 적색이동을 겪게 되어 약 1-2  $\mu\text{m}$  정도의 근적외선 영역에서 관측되게 된다 (Matsumoto et al. 2005). 이러한 근적외선 우주배경복사의 Ly- $\alpha$  분광 형상은 Diffuse Infrared Background Experiment (DIRBE, Wright 2001; Cambresy et al. 2001),

표 1. 적외선 관측연구별 관측파장

| 프로젝트    | 관측파장 ( $\mu\text{m}$ ) |
|---------|------------------------|
| CIBER   | 0.8 - 2.0              |
| ASTRO-F | > 1.7                  |
| Spitzer | > 3.6                  |
| IRTS    | > 1.4                  |
| HST     | < 0.8                  |
| 2MASS   | 1.25 - 2.16            |
| DIRBE   | > 1.25                 |

Infra-Red Telescope in Space (IRTS, Matsumoto et al. 2005), Hubble Space Telescope (HST, Bernstein, Freedman & Madore 2002), 그리고 2 Micron All Sky Survey (2MASS, Kashlinsky et al. 2002) 등에서 부분적으로 관측되었는데, 그 이유는 우주배경복사를 관측하기에는 단위 시야각이 너무 작거나 (2MASS의 경우 1") 또는 너무 크기 (DIRBE/ IRTS의 경우 0.7°) 때문이며, 종족 III에 의한 성분이 검출될 것으로 기대되는 1  $\mu\text{m}$  전후의 파장 대역을 모두 관측하지는 않기 때문이다. 아래의 표 1에서 각 관측기기의 관측파장을 나타내었다.

CIBER는 관측 감도가 좋은 저분산 분광기를 이용하여 0.8-2.0  $\mu\text{m}$  파장 대역을 관측함으로써 우주 초기 별들에서 방출되는 Ly- $\alpha$  분광 현상을 직접적으로 검출할 것이다. 한편, 큰 적색이동을 갖는 원시은하들에서 방출되는 우주배경복사는 원시은하들의 공간 밀도 분포에 따라 국부은하단과 구별되는 공간적 비등방성을 갖게 된다 (Kashlinsky et al. 2005). CIBER는 시야가 넓은 근적외선 카메라 두 대를 이용하여 0.8 및 1.6  $\mu\text{m}$  대역을 동시에 관측함으로써 이러한 근적외선 우주배경복사의 공간 섭동을 검출하려고 한다. 위의 두 파장을 선택한 이유는 두 파장 대역 사이에서 초기 별들에 의한 우주배경 복사량의 차이가 제일 크고, 황도광 또는 우리 은하 내의 광원에 의한 잡음들과 잘 분리할 수 있기 때문이다 (Bock et al. 2006). 현재 일본의 ASTRO-F 및 미국의 Spitzer 적외선 우주망원경 또한 적외선 우주배경복사를 부분적으로 관측하고 있으므로, CIBER의 독보적인 파장 및 시야각으로 관측한 자료를 함께 이용하면 위에 설명한 근적외선 우주배경복사의 두 특성을 직접적으로 분석하게 되어 국제 선도적인 연구를 수행할 수 있다.

본 논문에서는 CIBER를 구성하는 두 대의 광시야 카메라, 저분산 분광기, 그리고 고분산 분광기의 성능 및 과학 임무에 대해 설명하고 로켓 실험의 개요에 대해 소개하려고 한다. 그리고 CIBER에서 한국 그룹이 참여하는 구체적인 사항에 대해 기술하고 이것이 갖는 기술적,

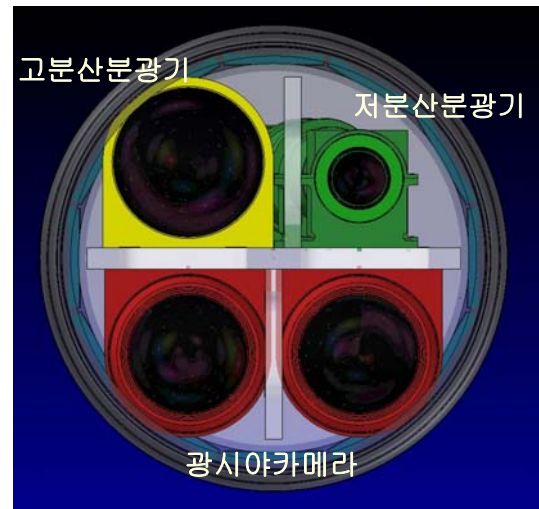
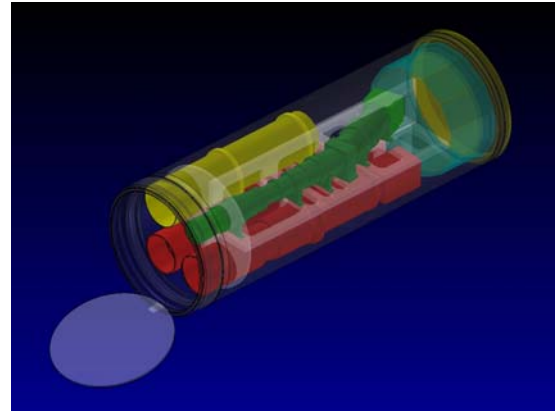


그림 1. 로켓 경통 안에 위치한 CIBER 기기의 투시도 (위) 및 각 기기가 위치한 단면도 (아래). Tsumura Kohji 그림.

과학적 의미에 대해 논의할 것이다.

## 2. CIBER 기기 및 실험

### 2.1 개요

CIBER는 그림 1에서와 같이 로켓의 경통 안에 위치한다. 두 대의 광시야 카메라와 저분산 분광기, 그리고 고분산 분광기로 구성되는 CIBER는 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. 두 대의 광시야 카메라는 근적외선 우주배경복사 공간 섭동을 측정하며, 저분산 분광기는 근적외선 우주배경복사의 스펙트럼을 관측할 예정이다. 고분산 분광기는 근적외선 우주배경복사의 잡음에

표 2. 광시야 카메라 광학계 사양

|                         |   |          |
|-------------------------|---|----------|
| Aperture                | 10 cm   |          |
| Dimension               | 1024 x 1024 pixels  |          |
| FOV                     | 2 x 2 degrees   |          |
| Pixel size              | 7 x 7 arcsec  |          |
| Wavelength              | 0.95(I), 1.6(H) $\mu\text{m}$   |          |
| $\Delta\lambda/\lambda$ | 0.5,  | 0.5      |
| Array QE                | 0.65,   | 0.75     |
| Optics QE               | 0.85,   | 0.85     |
| Photo current           | 10,   | 9 e/s    |
| Dark current            | <0.3,   | <0.3 e/s |
| Read noise (CDS)        | 15,   | 15 e/s   |
| $\delta I_V$ (inst.)    | 44(1 $\sigma$ ), 22(1 $\sigma$ ) $\text{nWm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{pix}^{-1}$ |          |

해당하는 태양계 내의 황도광을 정밀 측정하는 것이 목표이다. 각 기기의 자세한 임무 및 성능은 이어지는 장에서 기술된다.

### 2.2 광시야 카메라

근적외선 광시야 카메라는 10 cm 구경을 가지는 굴절망원경으로 77K까지 냉각되어 사용된다. 초점면에는 1024 x 1024 HgCdTe 센서가 장착되어 2도 x 2도의 시야를 7"의 각분해능으로 관측할 수 있게 하였다. 두 대의 광시야 카메라는 각각 0.9  $\mu\text{m}$  (I band) 및 1.6  $\mu\text{m}$  (H band) 대역의 파장에 맞추어 설계, 제작된다. 이때 광학계는 전체 시야각에서 수차가 최소화되도록 설계되었다.

광시야 카메라의 적외선 센서는 매 1.7초 마다 읽히며 25초의 간격으로 초기화된다. 콜드 셔터가 있어 로켓 발사 전에 센서 배경 잡음을 측정할 수 있게 하였다. 3 $\sigma$ 를 가정할 때 각 밴드에서의 점광원 감도는 I = 18.5 mag이고 H = 17.8 mag가 될 전망이다 (Bock et al. 2006). 2MASS 전천관측의 경우, 여러 개의 관측필드를 중첩하는 방법을 이용하여 H 밴드에서 19.3 mag 이상의 감도를 가질 수 있으나 이 방식에서는 우주거대구조의 요동을 측정할 때 문제가 생기는 것으로 알려져 있다 (Odenwald et al. 2003). 즉, 단일 필드 이미지를 이용한 광원 감도는 CIBER가 더 좋을 수 있다.

### 2.3 저분산 분광기

저분산 분광기는 0.8-2.0  $\mu\text{m}$  파장 영역의 근적외선 배경복사 세기를 정확하게 측정하도록 설계, 제작된다. 저분산 분광기는 구경이 7.3 cm인 굴절 망원경으로 프리

표 3. 저분산 분광기 광학계 사양

|            |                         |
|------------|-------------------------|
| Aperture   | 7.3 cm                  |
| Dimension  | 256 x 256 pixels        |
| FOV        | 4 x 4 degrees           |
| Pixel size | 1 x 1 arcmin            |
| Wavelength | 0.8 - 2.0 $\mu\text{m}$ |

표 4. 고분산 분광기 광학계 사양

|            |                      |
|------------|----------------------|
| Aperture   | 7.5 cm               |
| Dimension  | 256 x 256 pixels     |
| FOV        | 8.5 x 8.5 degrees    |
| Pixel size | 2 x 2 arcmin         |
| Wavelength | 0.8542 $\mu\text{m}$ |

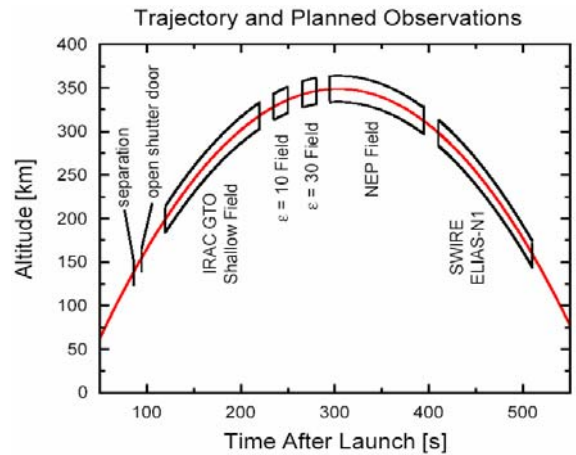


그림 2. 로켓 궤도 및 CIBER 관측 계획

즘이 삽입되어 R ~ 20 정도의 분해능을 가진다. 256 x 256 HgCdTe 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. 계산된 결과에 따르면 약 15초 정도의 관측 시간으로 S/N > 100 이상 되는 정도로 우주배경복사를 측정할 수 있는 감도가 되는 것을 알 수 있다.

### 2.4 고분산 분광기

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. 저

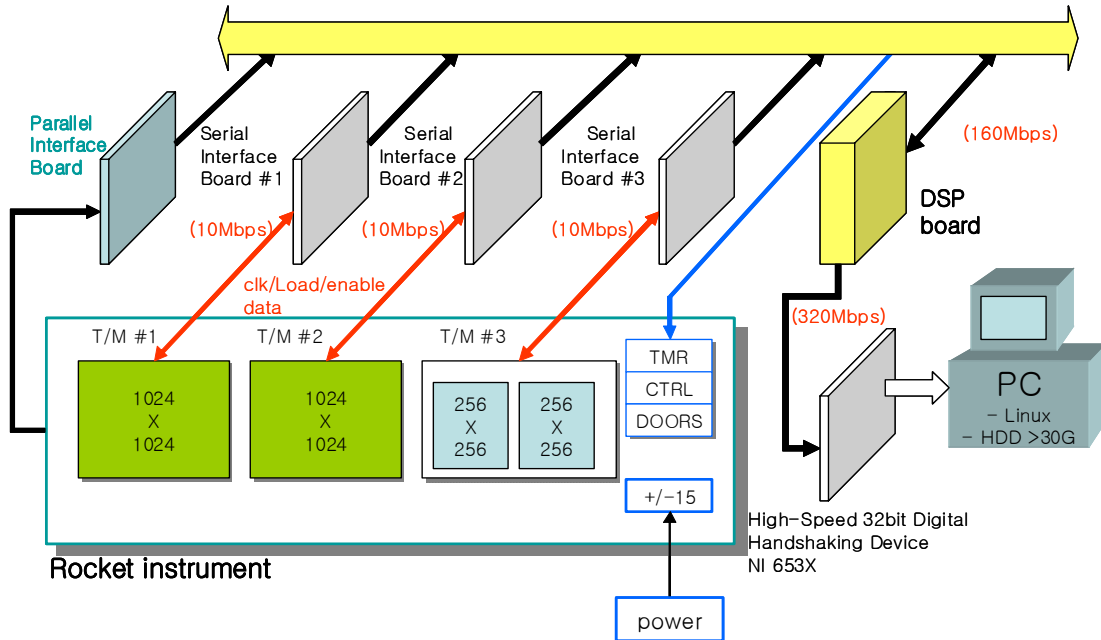


그림 3. CIBER 지상 전자 장비 개념도

분산 분광기와 마찬가지로 256 x 256 HgCdTe 적외선 센서를 사용하며 시야각이 8.5 x 8.5도로 크기 때문에 픽셀의 각분해능은 2분이 된다. 고분산 분광기의 관측 임무 및 자세한 설계, 제작에 관한 사항은 다음 장에 자세히 기술하였다.

2.5 로켓 관측

위의 그림 2는 로켓의 궤도 및 관측에 대한 개념도이다. CIBER를 탑재한 로켓은 발사 후 약 600초에 걸쳐 고도 350 km까지 도달하게 된다. CIBER는 고도 200 km 이상에서 약 300-390초 동안 다섯 개의 지역을 관측하며, 관측 데이터는 실시간으로 지상으로 전송된다. 각 관측 지역에 대한 자세한 설명은 Bock et al. (2006)을 참조하기 바란다. 목표한 지역이 관측 가능한 시간을 택해 2008년 경에 NASA의 발사장에서 로켓을 발사할 예정이다.

3. CIBER에서 한국 그룹의 역할

CIBER는 미국, 일본, 한국 3개국의 각 그룹이 개발하는 국제 공동 연구로서, 미국 JPL이 광시야 카메라를, 일본 ISAS에서는 저분산 분광기를, 그리고 한국 그룹은 CIBER 지상 전자 장비 및 고분산 분광기의 개발을 KASI와 KBSI가 각각 담당하고 있다.

3.1 CIBER 지상 전자 장비

지상 전자 장비는 CIBER의 데이터 인터페이스 및 전자 신호 시뮬레이션을 담당함으로써 CIBER의 성능 시험, calibration, 데이터 처리 소프트웨어 개발 등에 필수적인 장비이다. 또한 로켓 관측 중에는 실시간으로 관측 자료를 모니터링하는 역할도 수행한다. 따라서 CIBER 지상 전자 장비의 요구조건을 다음과 같은 세 가지로 정리할 수 있다.

- 로켓 인터페이스 대행 기능
- 관측 자료 저장 및 처리 기능
- 관측 영상 실시간 모니터링 기능

위의 세 기능을 통해 CIBER 지상 전자 장비는 CIBER의 성능 시험, calibration, 관측자료처리 소프트웨어 개발 및 로켓 발사 운용 등의 임무를 가능하게 한다. 그림 3은 CIBER 지상 전자 장비의 개념도를 그린 것이며, 구체적인 사양은 다음과 같다.

- 1 DSP board: 모든 데이터 인터페이스를 관장하며 CIBER에서 수신된 데이터를 PC로 전달하고, 또 PC로부터 명령을 받아 CIBER를 제어하는 역할을 담당한다

다.

- 3 Serial interface boards: Ch 1, 2, 3의 serial interface를 담당한다. 여기서 Ch 1, 2는 두 개의 광시야 카메라 센서에 해당되며 Ch 3는 저분산 분광기와 고분산 분광기를 모두 포함한다.
- 3 parallel interface boards: CIBER를 로켓과 연결하여 시험할 경우 로켓에서 나오는 데이터를 수신하기 위한 인터페이스이다.
- High-speed data interface card 및 PC system: 고속데이터 카드는 32bit의 데이터를 320Mbps로 PC에게 전달하기 위한 카드이다. PC 시스템은 고속의 데이터를 받아 영상 처리할 수 있도록 사양을 정하였고, 이를 구현하기 위해 Windows OS로 구동하는 GUI 프로그램을 개발하였다.

### 3.2 고분산 분광기

고분산 분광기는 태양계 내의 황도광을 정밀 측정하는 목적을 가지고 있다. 황도광은 태양계 내의 먼지에 의해 태양빛이 반사하여 나타나는 것으로 근적외선 우주배경복사의 가장 큰 잡음에 해당된다. 따라서 황도광을 정밀 측정하면 우주배경복사의 가장 큰 잡음을 제거할 수 있게 된다. 황도광은 태양 스펙트럼의 특징을 가지고 있으므로 이를 이용하면 쉽게 측정할 수 있다 (Bernstein, Freedman & Madore 2002; Reynolds, Madsen & Moseley 2004). 고분산 분광기의 경우 Ca II Fraunhofer 선(0.8545  $\mu\text{m}$ )의 바로 근방에 파장 중심을 맞추으로써 황도광을 정밀 측정하려고 한다. 다음 그림 4는 고분산 분광기의 광학계 설계 결과를 그린 것이다. 고분산 분광기의 설계 결과에 따르면 지구 북극 지역을 약 50초 동안 관측함으로써 S/N = 170의 감도로 관측할 수 있게 된다. 관측 결과를 기존의 황도광 모델 (Kelsall et al. 1998)과 비교하기 위해 저분산 분광기로 측정된 황도광을 외삽하여 고분산 분광기의 결과와 비교하는 것이 반드시 필요하다. 왜냐하면 황도광은 1.2  $\mu\text{m}$  이하로는 정확하게 측정된 경우가 없기 때문이다. 이러한 작업을 통하여 0.8-2.0  $\mu\text{m}$  파장에서의 절대적인 우주배경복사 세기를 구할 수 있게 된다.

고분산 분광기는 한국에서 초정밀 가공으로 제작된다. 렌즈의 재질은 Silica로 77 K의 극저온에서도 적외선 특성이 잘 나오는 물질을 사용하였다. 렌즈를 지탱하는 광기계부는 Aluminium A6061T6를 사용할 예정이며 분석 결과 상온과 극저온에서의 온도 차이에 의한 광학계 성능이 요구 조건을 만족시킴을 확인하였다. 제작된 렌즈는 AR (anti-reflection) 코팅을 수행한다. AR 코팅의 요구 조건은 상온과 77 K의 온도에서 모두 렌즈 한 면

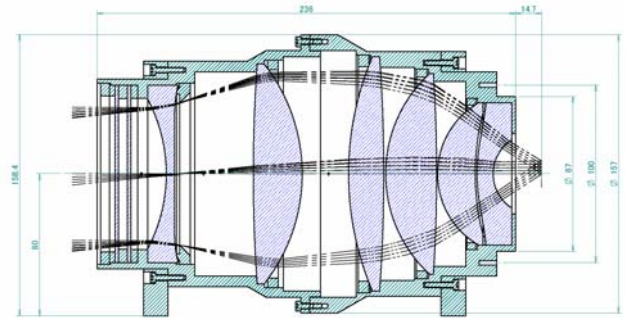


그림 4. CIBER 고분산 분광기 광기계부 설계도. Genesis Co. 그림

의 반사율이 0.5 % 미만인 되도록 하는 것이며 국내의 코팅 회사에서 시편을 코팅한 결과 요구 조건을 만족함을 알 수 있었다.

### 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 설계가 끝난 시점에서 제작을 진행 중에 있으며, 한국에서는 지상 전자 장비의 개발과 고분산 분광기의 제작을 수행 중에 있다. 2007년에 조립, 시험 및 calibration을 수행하고, 2008년에 NASA에서 발사될 CIBER 프로젝트는 국제 선도적인 관측 데이터를 제공하고, 첨단 우주 적외선 기술을 직접 개발하게 하는 좋은 기회이므로, 이를 잘 활용하면 차후의 적외선 우주망원경 개발의 초석이 될 것으로 보인다.

감사의 글: 본 연구는 기초기술연구회의 협동연구과제인 “우주용 적외선카메라 개발 및 로켓관측”의 일환으로 수행되었다.

### 참고 문헌

Bernstein, R. A., Freedman, W. L. & Madore, B. F., 2002, The First Detection of the Extragalactic Background Light at 3000, 5500, and 8000 Å. II. Measurement of

- Foreground Zodiacal Light, *ApJ*, 571, 56
- Bock, J. et al., 2006, Observations of the temperature and polarization anisotropies with BOOMERANG 2003, *New Astronomy Review*, 50, 215
- Cambresy, L. et al., 2001, The Cosmic Infrared Background at 1.25 and 2.2 Microns Using DIRBE and 2MASS: A Contribution Not Due to Galaxies?, *ApJ*, 555, 563
- Cooray, A. & Yoshida, N., 2004, First sources in infrared light: stars, supernovae and miniquasars, *MNRAS*, 51, L71
- Kashlinsky, A. et al., 2002, Detection of Small-Scale Fluctuations in the Near-Infrared Cosmic Infrared Background from Long-Exposure 2MASS Fields, *ApJ*, 579, 53
- Kashlinsky, A., Arendt, R. G., Mather, J. & Moseley, S. H., 2005, Tracing the first stars with fluctuations of the cosmic infrared background, *Nature*, 438, 45
- Kelsall, T. et al., 1998, The COBE Diffuse Infrared Background Experiment Search for the Cosmic Infrared Background. II. Model of the Interplanetary Dust Cloud, *ApJ*, 508, 44
- Matsumoto, T. et al., 2005, Infrared Telescope in Space Observations of the Near-Infrared Extragalactic Background Light, *ApJ* 626, 31
- Odenwald, S., Kashlinsky, A., Mather, J. C., Skrutskie, M. F., & Cutri, R. M., 2003, Analysis of the Diffuse Near-Infrared Emission from Two-Micron All-Sky Survey Deep Integration Data: Foregrounds versus the Cosmic Infrared Background, *ApJ*, 583, 535
- Reynolds, R. J., Madsen, G. J. & Moseley, S. H., 2004, New Measurements of the Motion of the Zodiacal Dust, *ApJ*, 612, 1206
- Wright, E. L., 2001, DIRBE minus 2MASS: Confirming the Cosmic Infrared Background at 2.2 Microns, *ApJ*, 553, 538