

적외선카메라를 위한 모니터 시스템 개발

차상목^{1,2†}, 문봉곤¹, 진호¹, 육인수¹, 남육원¹, 이성호¹, 박영식¹, 조승현¹, 목승원¹, 김천휘^{2,3}

¹한국천문연구원 위성탑재체연구그룹

²충북대학교 자연과학대학 천문우주학과

³충북대학교 기초과학연구소

DEVELOPMENT OF A MONITORING SYSTEM FOR AN INFRARED CAMERA

Sang-Mok Cha^{1,2†}, Bongkon Moon¹, Ho Jin¹, In-Soo Yuk¹, Uk-Won Nam¹, Sungho Lee¹,
Yungsik Park¹, Seoungyun Cho¹, Seungwon Mok¹, and Chun-Hwey Kim^{2,3}

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

²Dept. of Astronomy & Space Science, College of Natural Science, Chungbuk National University

³Institute for Basic Science Research, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

E-mail: chasm@kasi.re.kr

(Received October 14, 2006; Accepted November 17, 2006)

요 약

한국천문연구원에서 개발 중인 근적외선카메라 KASINICS(KASI Near Infrared Camera System)의 운용을 위한 온도·진공 모니터 시스템을 개발하였다. 이 시스템은 하드웨어 부분과 소프트웨어 부분으로 나누어지며, 온도와 진공도의 측정자료를 실시간으로 PC에서 출력하고 저장할 수 있도록 구성하였다. 이 시스템은 KASINICS와 같은 적외선카메라뿐만 아니라 극저온 냉각을 요하는 모든 장치에 적용할 수 있다. 우리는 KASINICS의 냉각 및 진공 시험을 수행하면서 우리가 개발한 모니터 시스템이 적외선카메라의 시험과 운용에 있어서 효율적이고 안정적이라는 것을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

The KASINICS (KASI Near-Infrared Camera System) is a ground-based instrument developed by the Korea Astronomy and Space Science Institute (KASI). We developed a temperature and vacuum monitoring system for operating the KASINICS. The system consists of hardware and software parts. The acquired data are saved on a hard disk in a real-time mode. This system can also be applied to general cryogenic instruments. We tested our monitoring system for the cooling and vacuum performance of the KASINICS. The results show that our system is efficient and stable for the operation of the KASINICS.

Key words: IR camera, IR instrument, temperature monitor, vacuum monitor, cryogenic

†corresponding author

1. 서 론

한국천문연구원에서는 지상관측용 근적외선 카메라 KASINICS(KASI Near Infrared Camera System)를 개발하고 있다(Cha et al. 2006, Jin et al. 2006, 박수중 외 2004, 2005). KASINICS는 J, H, Ks, L 밴드의 파장대에서 목성형 행성의 대기, 장주기 변광성, 변광 AGN 등의 천체 관측에 사용될 예정이다(이성호 외 2005).

적외선카메라 KASINICS의 성능을 결정짓는 중요한 요인은 크게 3가지이다. 첫 번째 요인은 대기에 의한 배경복사 잡음이고, 두 번째 요인은 광학망원경에서 발생하는 열복사 잡음이며, 세 번째 요인은 카메라의 내부 부품에서 발생하는 열복사 잡음이다. 첫 번째 요인인 대기의 배경복사 잡음은 OH와 O₂ 분자의 방출선과 대기 수증기의 열복사로 나누어지는데 2.3 μm 이하의 영역에서는 분자의 방출선이 주를 이루고 3 ~ 13 μm 의 영역에서는 수증기의 흑체복사가 주를 이룬다. 특히 수증기의 흑체복사는 3 ~ 13 μm 의 영역에서 망원경과 관측기기의 흑체복사보다 더 큰 잡음을 유발한다(McLean 1997). 두 번째 요인인 광학망원경의 경통과 배플 등 흑체복사계수가 큰 장치에서 오는 열복사 잡음은 1:1 오프너 릴레이(Offner relay)를 사용하여 제거할 수가 있다(육인수 외 2005, Offner 1975). 세 번째 요인인 내부 부품의 열복사 잡음을 최소화하기 위해서는 근적외선 카메라의 경우 내부 부품들의 온도를 약 80K까지 낮추어서 내부 부품의 열복사 잡음이 관측하늘의 배경복사 잡음의 효과에 묻히도록 하여야 한다(Nagashima 2003). 그 외에 검출기의 암전류와 읽기잡음 등이 있으나 암전류는 검출기를 냉각하여 최소화 하면 무시할 수 있을 정도로 작아지고 읽기잡음은 전자부 제어기(Readout controller; Cho et al. 2006)의 조정 작업을 통하여 최소화하게 된다.

KASINICS는 검출기의 암전류와 내부 부품의 열복사를 최소화하기 위해 검출기상자(Detector box)는 30K으로, 내부 부품들은 80K 이하로 냉각, 유지되고 기기내부의 열전달을 최소화하기 위해 냉각시 약 10⁻⁷ torr의 진공도를 유지한다. 이와 같은 극저온의 진공상태에서 온도와 진공도의 급격한 변화는 기기에 치명적인 손상을 주기 때문에 실시간으로 온도와 진공도를 검사할 수 있는 모니터 시스템이 필요하다. 이 연구에서는 적외선카메라의 효율적인 운용 및 냉각시험을 위한 온도·진공 모니터 시스템을 개발하였고 이 시스템을 사용하여 KASINICS의 냉각과 진공 시험을 수차례 시행하였다. 이 논문에서는 새롭게 개발한 모니터 시스템의 하드웨어 구성과 소프트웨어 개발에 대한 내용을 소개한 후 KASINICS의 냉각시험 결과에 대하여 논의하고자한다.

2. 시스템의 구성

온도·진공 모니터 시스템은 온도모니터, 온도제어기, 진공모니터 등의 장치들이 조합되어 이루어진 하드웨어 부분과 PC에서 하드웨어 장치들을 제어 하기 위한 소프트웨어 부분으로 구성되었다. 하드웨어 장치들은 35 × 30 × 43cm³의 틀을 제작하여 설치하였고 이 장치들의 집합을 KMDM(KASI Monitoring Device Module)이라 명명하였다. KMDM에 설치된 하드웨어 장치들은 RS-232C 통신을 지원하지만 시스템의 효율적인 운영을 위하여 4개의 RS-232C 통신을 하나의 TCP/IP통신으로 수행할 수 있는 통신변환장치를 사용하였다. TCP/IP 통신변환장치는 PC와 KMDM을 근거리 네트워크(Local Area Network, LAN)로 연결하여 적외선 카메라 KASINICS의 온도와 진공 상태를 확인할 수 있도록 한다. 그림 1은 근거리 네트워크 내에서 KASINICS와 KMDM의 관계를 나타내는 구성도이다. 그림 2는 실험실에서 KASINICS에 설치되어 시험운용되고 있는 KMDM의 모습을 보여 준다.

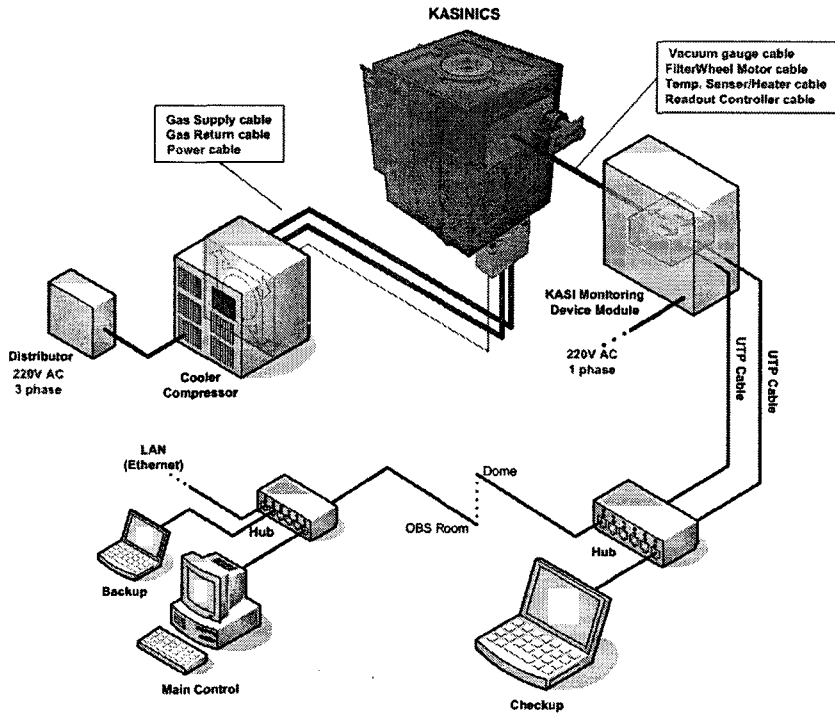


그림 1. 적외선카메라 KASINICS와 KMDM(KASI Monitoring Device Module)의 구성도. KASINICS는 KMDM과 냉각압축기(Cooler compressor)와 연결되고 KMDM은 LAN을 통하여 PC와 연결된다.

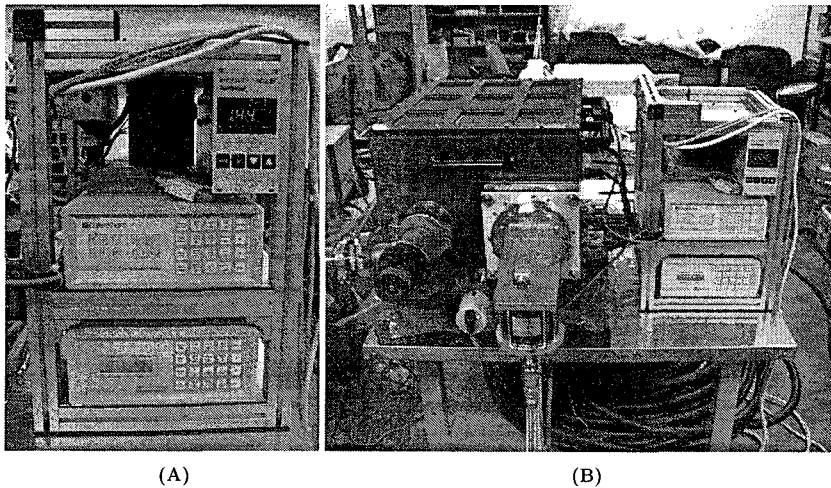


그림 2. KMDM의 사진. 왼쪽의 사진(A)는 KMDM의 확대 모습이며, 오른쪽의 사진(B)는 KMDM이 KASINICS에 설치되어 냉각시험 중인 모습이다. 사진(A)에서 우측 상단의 장치가 진공모니터이고 가운데의 장치가 온도모니터, 아래의 장치가 온도제어기이다.

표 1. KASINICS 온도센서 목록.

센서번호	위치
S0	검출기상자 (Detector box)
S1	냉각상자 상단 (Cold box)
S2	입사부 배플 (Baffle)
S3	필터휠상자 (Filter box)
S4	냉각기 두 번째 접촉단 (2nd stage cold head)
S5	냉각기 첫 번째 접촉단 (1st stage cold head)
S6	광학계상자 (Optics box)
S7	카메라의 외벽 (Cryostat surface)

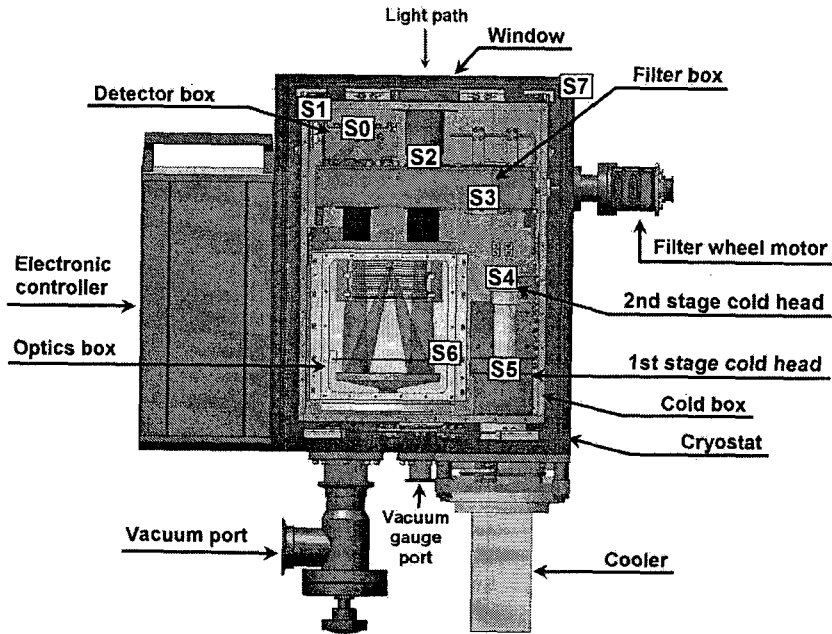


그림 3. KASINICS의 내부 구조와 온도센서(S0~S7)의 위치.

2.1. 하드웨어의 구성

적외선카메라의 내·외부에 위치하는 각 부품들의 온도를 지속적으로 감시하기 위한 온도모니터는 저온공학 등의 온도계측 관련분야에서 많이 사용되며 그 성능을 인정받고 있는 Lakeshore Inc.의 Temperature Monitor Model 218을 선정하여 사용하였다(박성제 외 2004, 박수중 외 2005). 이 온도모니터는 최대 8개의 온도센서 값을 입력 받을 수 있다. KASINICS에서는 8개의 온도센서(S0~S7)를 표 1과 같이 카메라 내·외부에 부착하였고 7개의 온도센서(S1~S7)를 온도모니터와 연결하여 각 부품들의 온도를 알 수 있도록 하였다. 각 온도센서의 위치는 그림 3에 표시하였다. 온도센서는 Lakeshore Inc.의 silicon diode DT-470(측정범위: 1.4~475K)을 사용하였다. 온도모니터는 온도센서들의 아날로그 출력 값을 계측하고 디지털 자료로 변환하여 온도 값을 출력하는 역할을 한다.

KASINICS에서 검출기로 사용되는 Raytheon Co.의 Aladdin III Quadrant IR-Array의 동작은

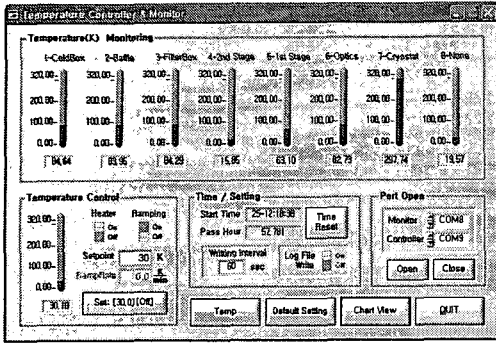
도는 30K이다. 이 검출기의 암전류 발생률은 30K의 온도에서 1electron/s 이하이고 온도가 높아짐에 따라 암전류의 발생률은 급격히 증가하게 된다(Raytheon 2006). 적외선검출기의 암전류 발생을 최소화하기 위해서는 검출기의 온도를 30K까지 낮추어야 하고 안정적인 동작을 위해서는 검출기의 온도를 일정하게 유지하는 것이 중요하다. KASINICS에서는 검출기를 담은 상자 전체를 냉각하고 일정한 온도를 유지하도록 하기 위해 검출기상자에 1개의 온도센서(S0)와 권선저항 히터를 장착하였다. 이 온도센서와 히터를 제어하기 위한 온도제어기는 Lakeshore Inc.의 Temperature Controller Model 321을 사용하였다. 온도제어기를 통하여 검출기상자는 30K의 온도를 $\pm 0.1K$ 의 범위 내에서 유지하게 된다.

카메라 내부의 진공도를 측정하기 위한 계측장비는 Pfeiffer Vacuum사의 진공게이지 PKR251과 진공모니터 TPG261을 사용하였다. 모델 PKR251은 저진공에서 고진공까지의 넓은 범위($3.75 \times 10^{-9} \sim 750\text{torr}$)의 측정이 가능한 장비로서 진공을 요하는 기기들의 실험과정에서 유용한 계측장비로 많이 활용되고 있다. 본 모니터링 시스템에 장착된 온도모니터와 온도제어기, 그리고 진공모니터 장비들은 RS-232C 통신을 통한 원격제어기능을 포함하고 있기 때문에 냉각과 진공 시험 및 관측의 운용에 있어서 PC를 통해 실시간으로 측정자료를 기록하고 저장할 수 있다는 장점이 있다.

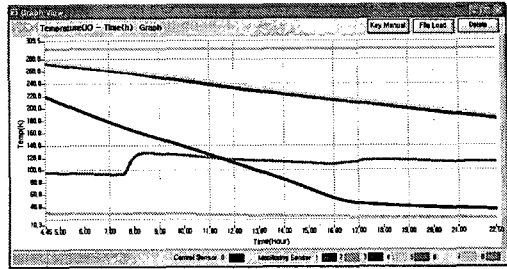
계측장비들과 PC와의 통신을 위해서는 3개의 RS-232C 포트와 케이블이 필요하다. RS-232C 통신은 케이블의 성능과 외부 잡음의 영향을 크게 받으며 통신거리가 길어질수록 통신 속도가 저하되고 통신 오류의 발생률이 증가한다는 단점을 가지고 있다. 보현산 1.8m 망원경이나 소백산 60cm 망원경의 경우 관측실과 망원경의 거리가 멀기 때문에 RS-232C 통신을 이용하는 것은 바람직하지 못하다. 우리는 하나의 TCP/IP통신으로 4개의 RS-232C 통신을 구현할 수 있는 통신변환기를 사용하였고, PC와 3개의 장치가 한 가닥의 UTP 케이블만 사용함으로써 통신할 수 있도록 하였다. TCP/IP 통신은 10Mbps의 속도에서 기본 100m의 통신거리를 보장하기 때문에 거리에 따른 제약이 없고 PC와 계측장비들이 같은 네트워크 안에 포함되어 있다면 위치의 제약 없이 LAN 포트 및 허브를 통해 쉽게 연결될 수 있다는 장점을 가지고 있다.

2.2. 모니터 소프트웨어의 개발

KMDM에 의해 측정된 자료를 실시간으로 PC에서 출력하고 저장할 수 있는 모니터 프로그램을 개발하였다. C언어로 개발된 모니터 프로그램은 Windows XP와 Windows 2000의 환경에서 사용할 수 있도록 만들어졌다. 모니터 시스템의 소프트웨어는 2개의 독립적인 응용프로그램으로 나누어져 있다. 각각의 프로그램은 온도제어기 및 온도모니터를 제어하기 위한 것과 진공모니터를 제어하기 위한 것이다. 이 프로그램들은 각각 2개의 창을 가지도록 하였는데, 하나의 창은 실시간 측정자료를 숫자와 눈금자의 형태로 표시하고 파일저장을 위한 설정과 하드웨어 장치의 설정 값들을 조정하는 제어창이고, 또 다른 하나의 창은 실험 경과시간에 따른 측정자료의 변화를 실시간으로 화면에 보여주는 도표 출력창이다(그림 4, 5). 도표 출력창은 현재 실험 중인 측정자료 뿐만 아니라 과거에 실험하여 저장된 측정자료 파일을 읽어 시간에 따른 자료의 변화를 도표로 출력하는 기능을 가지고 있고 키보드의 방향키로 도표의 출력범위를 이동시키거나 'Ctrl'키와 방향키를 조합하여 도표의 척도를 조절할 수 있도록 하여 사용자에게 편의를 제공하였다. 진공모니터의 제어프로그램에서는 도표의 Y축 눈금을 Linear 척도와 Log 척도 중에서 선택할 수 있도록 하여 진공시험에 있어서 기기의 특성을 연구하는데 유리하도록 하였다. 측정자료의 저장은 측정시간, 측정값, 기기 상태 등의 내용이 정

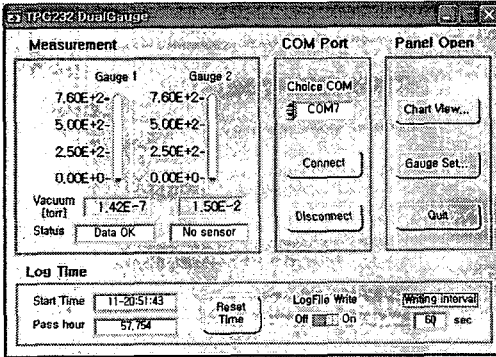


(A)

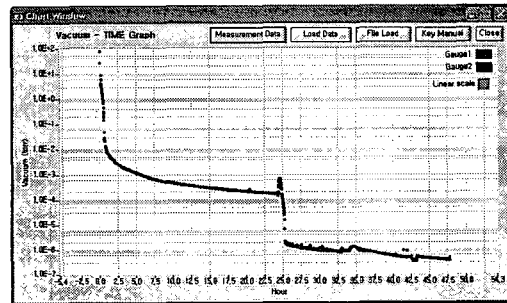


(B)

그림 4. 온도모니터와 온도제어기의 제어 프로그램. 냉각시험 시 실행중인 프로그램의 모습이다. (A)는 제어판 창의 모습이고 (B)는 도표 출력창의 모습이다.



(A)



(B)

그림 5. 진공모니터의 제어 프로그램. 냉각시험 시 실행중인 프로그램의 모습이다. (A)는 제어판 창의 모습이고 (B)는 도표 출력창의 모습이다.

해진 양식의 문서 파일로 저장되도록 하였고 기록시간의 간격을 초의 단위로 조정할 수 있도록 하였다.

3. KASINICS의 냉각시험

KASINICS의 모든 냉각 및 진공 시험은 새롭게 개발한 온도·진공 모니터 시스템을 이용하여 수행되었다. KASINICS 냉각계의 제작은 2006년 초에 완성되었으며 현재까지 총 9번의 냉각시험과 1번의 적외선 시험관측을 수행하였고, 9번의 냉각시험 중에 가장 대표적인 결과를 보인 2차 냉각시험의 온도곡선을 그림 6에 나타내었다. KASINICS에서 냉각기 첫 번째 접촉단(1st stage cold head)은 냉각상자(Cold box)와 연결되어 있고 필터휠상자(Filter box)와 광학계상자(Optics)는 냉각상자를 통하여 냉각기 접촉단과 연결되어 있다. 그림 6에서는 냉각기 첫 번째 접촉단의 온도가 떨어짐에 따라 냉각상자, 필터휠상자, 광학계상자의 온도가 떨어지는 모습을 볼 수 있다. 냉각기 첫 번째 접촉

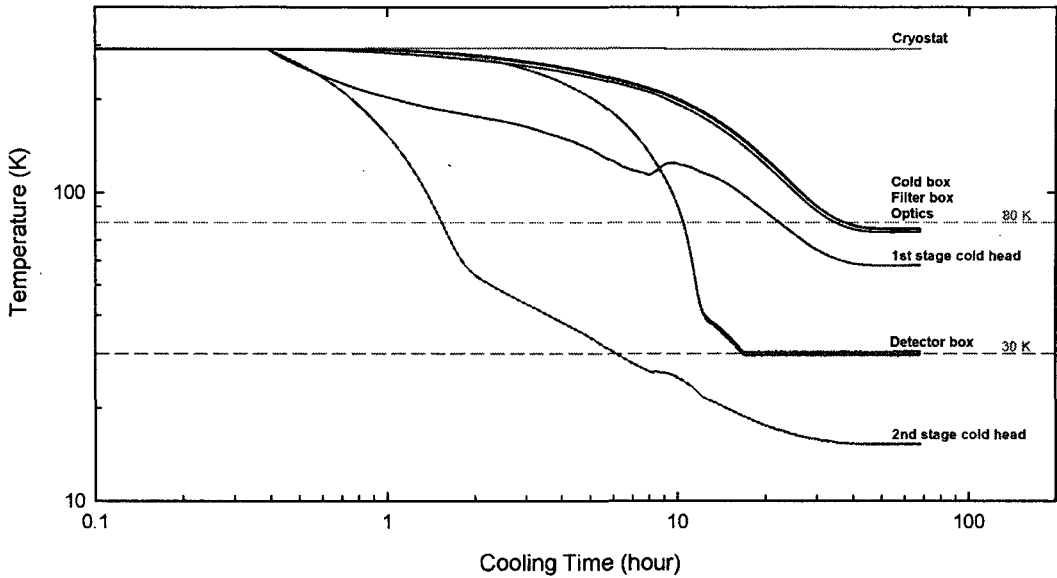


그림 6. KASINICS 2차 냉각시험의 온도곡선. 냉각시간에 따른 각 부품들의 온도를 나타낸 도표로서 가로 축 시간과 세로 축 온도의 눈금을 Log 척도로 나타내었다. 상온으로 유지되는 곡선은 냉각용기(Cryostat)의 온도 추이이다. 냉각상자(Cold box)와 내부의 부품들은 약 38시간 경과 후 냉각 목표온도인 80K에 도달하는 것을 볼 수 있다. 검출기상자(Detector box)는 18시간 만에 30K으로 냉각되었다.

단의 온도는 55K까지 내려가지만 외부의 열 유입에 의해 냉각상자와 내부부품들은 약 80K의 온도를 유지하였다. 마찬가지로 냉각기 두 번째 접촉단(2nd stage cold head)의 온도는 약 18K까지 떨어지지만 검출기상자의 온도는 히터를 사용하여 작동온도인 30K을 유지하는 것을 볼 수 있다. 필터휠상자와 냉각상자의 냉각 속도에 비해 광학계상자의 냉각 속도가 빠른 이유는 광학계상자와 냉각기 첫 번째 접촉단사이의 연결 길이가 가장 짧기 때문이다. 우리는 KASINICS 개발의 선행연구 과정으로 수행된 관측하늘의 배경복사 연구(문봉곤 외 2004)와 KASINICS의 열해석을 통하여 100K을 냉각 목표온도로 가정하고 냉각시간의 예상치를 구한결과 약 50시간의 값을 얻은 바 있다(강지나 외 2004). KASINICS의 실제 냉각 목표온도는 다른 근적외선 카메라와 같이 냉각기의 용량이 허락하는 범위 내에서 내부 열복사를 최대한 줄이기 위해 80K으로 결정하였다(Cha et al. 2006, Fischer 2002, Nagayama et al. 2002). KASINICS의 3차 냉각시험까지의 결과는 목표온도 80K까지 도달하는 냉각시간이 40시간 이하로서, 100K까지의 예상 냉각시간인 50시간보다도 10시간가량 빠르게 냉각되는 것을 보였다. 최근의 냉각시험결과에서는 목표온도까지의 도달시간이 60시간 이상으로 증가하는 결과를 보인다. 냉각시간이 늘어난 원인과 9차 냉각시험까지의 자료분석은 현재 진행 중에 있으며 이 논문의 후행 연구로 진행될 계획이다. 진공시험은 냉각시험과 함께 이루어졌다. 그림 7은 9차 냉각시험과 병행된 진공시험의 측정 자료를 도표로 나타낸 것이다. 진공도는 냉각 전에는 약 10^{-5} torr이었으나 냉각 후에는 약 10^{-7} torr의 값을 유지하는 결과를 보였다. 냉각이 진행되면서 진공도가 좋아진 현상은 내부 기체 입자들의 온도가 떨어지면서 압력이 낮아졌기 때문이기도 하지만 상대적으로 온

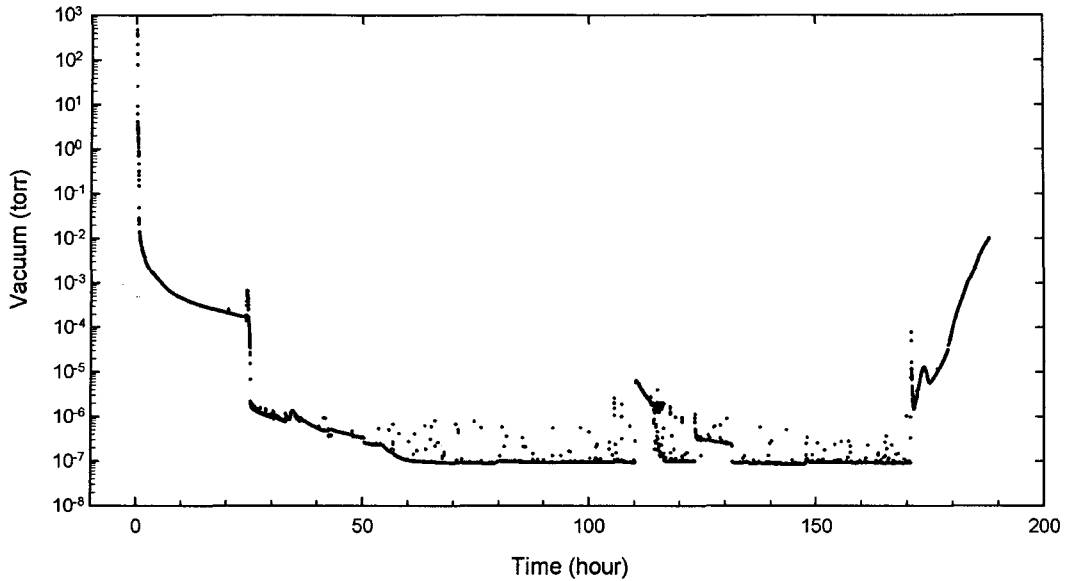


그림 7. KASINICS 9차 진공시험의 진공도곡선. 9차 냉각시험과 병행된 진공시험에서 얻은 자료로서 진공펌프 동작시간에 따른 진공도를 나타낸 도표이다. 가로 축 시간은 Linear 척도이고 세로 축 진공도는 Log 척도이다. 진공시험 23시간 경과 후 냉각이 시작된 시점에서 내부압력이 급격히 떨어지는 것을 볼 수 있다.

도가 낮은 냉각기 두 번째 접촉단에 흡착제의 역할을 하는 숯을 설치한 것이 또 다른 요인으로 작용한 결과이다. 흡착제는 표면적이 상당히 넓기 때문에 냉각이 되었을 때 표면과 접촉하는 입자의 열을 흡수하여 많은 입자들을 잡아둘 수 있다.

냉각 및 진공 시험을 10차례에 걸쳐 수행하면서 시스템이 안정적으로 동작함은 물론 적외선카메라의 시험 및 운용에 있어서 매우 효율적인 시스템이라는 것을 확인하였다. 네트워크의 불안정과 사용자의 실수에 의한 경우 데이터의 기록에 문제가 있었지만, 이 시스템의 자체적인 결함에 의한 오동작은 발생하지 않았다. 네트워크가 일시적으로 불안정하였다가 복구된 경우에는 PC에서 출력되는 자료의 온도 및 진공값이 변하지 않는 현상이 발생했지만, 소프트웨어에서 사용자에게 경고를 보내고 KMDM과의 통신 연결을 재접속 하도록 하여 문제를 해결하였다. 이 시스템은 측정자료를 실시간으로 PC의 화면에 숫자와 도표로 출력하기 때문에 실험의 진행 과정에서 온도 및 진공의 추이를 한 눈에 확인할 수 있어 실험 중 발생하는 문제에 대해 빠른 대처가 가능하였다. 또한 실험의 진행방향을 능동적으로 결정할 수 있어 KASINICS의 냉각 및 진공 시험에 큰 도움이 되었다. 이 시스템은 적외선 관측프로그램에 응용되어 실제 관측에 유용하게 이용될 것이라 예상된다. 뿐만 아니라 극저온 냉각을 요하는 모든 기기에 이 시스템을 적용할 수 있기 때문에 다양한 분야에서 이 시스템이 활용되리라 기대한다.

4. 요약

우리는 적외선카메라의 냉각시험과 효율적인 운용을 위한 온도·진공 모니터 시스템을 개발하였

다. 이 시스템은 온도와 진공도의 측정자료를 실시간으로 PC에서 숫자와 도표의 형태로 출력하고 정해진 양식의 문서 파일로 저장할 수 있도록 구성되었다. 한국천문연구원에서 개발 중인 근적외선 카메라 KASINICS의 모든 냉각 및 진공 시험은 이 연구에서 새롭게 개발된 온도·진공 모니터시스템을 이용하여 수행하였다. KASINICS의 냉각 목표온도인 80K까지 도달하는데 걸린 시간을 강지나 외(2004)의 선행연구를 통해 얻은 100K까지의 예상 냉각시간과 비교한 결과, 초기 냉각시험에서는 10시간가량 짧은 약 40시간의 냉각시간을 보였다. 최근까지의 냉각시험 결과에 대한 분석은 향후 이루어져야 할 과제이다. KASINICS의 냉각 및 진공 시험을 10차례에 걸쳐 수행하면서 우리가 개발한 모니터 시스템이 안정적으로 동작함은 물론 적외선카메라의 시험과 운용에 있어서 매우 효율적인 시스템이라는 것을 확인할 수 있었다. 또한 이 시스템의 하드웨어 구성과 이를 운용하기 위해 개발된 프로그램은 KASINICS와 같은 적외선카메라 뿐만 아니라 극저온 냉각을 요하는 모든 기기에 적용할 수 있기 때문에 관련 분야에서의 많은 활용이 기대된다.

감사의 글: 이 연구는 한국천문연구원의 ‘적외선 관측기술 개발’ 연구 사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 강지나, 이성호, 진호, 박수중, 문봉곤, 김상호, 박장현 2004, 한국우주과학회지 21, 467
- 문봉곤, 이성호, 박수중, 진호, 김용하, 육인수, 한원용 2004, 한국우주과학회지 21, 453
- 박성계, 홍용주, 김효봉, 김양훈 2004, 대한설비공학회, 2004 하계학술발표대회논문집, 1103
- 박수중, 한원용, 남옥원, 박장현, 육인수, 진호, 선광일, 이대회, 경재만, 천무영, 김영수, 성언창, 이성호, 문봉곤, 공경남, 강지나, 한정열, 장유성, 박영식, 손종대 2004, 적외선관측기술개발 사업 보고서 (대전: 한국천문연구원)
- 박수중, 진호, 육인수, 이성호, 남옥원, 한원용, 박장현, 이대회, 경재만, 박영식, 문봉곤, 공경남, 한정열, 조승현, 차상목, 목승원 2005, 적외선관측기술개발II 사업보고서 (대전: 한국천문연구원)
- 육인수, 이성호, 진호, 선광일, 박수중, 이대회, 남옥원, 문봉곤, 차상목, 한정열, 경재만, 김건희, 양진석 2005, 한국천문학논총, 20, 1
- 이성호, 육인수, 진호, 박수중, 한정열, 이대회, 공경남, 조승현, 박영식, 박장현, 한원용 2005, 한국천문학논총, 20, 151
- Cha, S., Jin, H., Yuk, I., Lee, S., Nam, U., Moon, B., Mock, S., Han, J., Lee, D., Park, J., Kyeong, J., Pak, S., Kim, G., & Kim, C. 2006, in *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy*, ed. McLean, I. & Iye, M. (Bellingham: SPIE), p.62694W
- Cho, S., Jin, H., Nam, U., Lee, S., Kong, K., Yuk, I., Park, Y., Pak, S., Han, W., & Kim, S. 2006, in *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy*, eds. I. McLean & M. Iye (Bellingham: SPIE), p.62695Y
- Fischer, J., Vrba, F., Toomey, D., Lucke, R., Wang, S., Henden, A., Robichaud, J., Onaka, P., Hicks, B., Harris, F., Stahlberger, W., Kosakowski, K., Dudley, C., & Johnston, K. 2002, in *Instrument Design and Performance for Optical/Infrared Ground-based Telescopes*, eds. M. Iye & A. Moorwood (Bellingham: SPIE), p.564

- Jin, H., Yuk, I., Nam, U., Pak, S., Lee, S., Moon, B., Kong, K., Han, J., Cha, S., Cho, S., Kyeoung, J., & Kim, G. 2006, in *The 9th Asian pacific regional meeting (IAU)*, eds. W. Sutantyo, P. W. Premadi, P. Mahasena, T. Hidayat, & S. Mineshige (Paris: IAU), p.280
- McLean, I. 1997, *Electronic Imaging in Astronomy* (Chichester: Praxis publishing Ltd), pp.195-229
- Nagashima, C. 2003, PhD Thesis, Nagoya University
- Nagayama, T., Nagashima, C., Nakajima, Y., Nagata, T., Sato, S., Nakaya, H., Yamamuro, T., Sugitani, K., & Tamura, M. 2002, in *Instrument Design and Performance for Optical/Infrared Ground-based Telescopes*, eds. M. Iye & A. Moorwood (Bellingham: SPIE), p.459
- Offner, A. 1975, *Opt. Engineering*, 4, 130
- Raytheon Co. 2006, *Aladdin 1024×1024 User's Guide* (Waltham: Raytheon), p.3