J. Astron. Space Sci. 21(4), 467–480 (2004)

적외선 카메라 KAONICS의 열해석

강지나[1†], 이성호[1,2], 진호[1], 박수종[1], 문봉곤[1,3], 김상호[4], 박장현[1]
[1]한국천문연구원
[2]서울대학교 지구환경과학부 천문학전공
[3]충남대학교 천문우주과학과
[4]한국항공우주산업(주)

A STUDY OF THERMAL ANALYSIS OF KAONICS

Jina Kang[1†], Sungho Lee[1,2], Ho Jin[1],Soojong Pak[1], Bongkon Moon[1,3], Sang-Ho Kim[4], and Jang-Hyun Park[1]
[1]Korea Astronomy Observatory, Daejeon 305-348, Korea
[2]Astronomy Program in SEES, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea
[3]Dept. of Astronomy and Space Science, Chungnam University, Daejeon 305-764, Korea
[4]Korea Aerospace Industries, Ltd., 48-6, Moonpyung, Daeduck, Daejeon 306-220, Korea
E-mail: cdiem@kao.re.kr

(Received October 26, 2004; Accepted November 30, 2004)

요 약

KAONICS(KAO Near Infrared Camera System)와 같은 적외선 카메라는 열잡음제거가 매우 중요하다. 입사창을 통해 들어오는 외부의 열복사 이외에도 카메라의 외벽을 통해 유입되는 열복사가 배경복사로서 검출기에 입사하여 시스템의 성능을 저하 시키며 그 양은 무시할 수 없다. 따라서 배경복사와 검출기 자체의 열잡음을 줄이기 위해서 카메라 내부의 광학계 전체와 검출기를 냉각해야만 한다. 이에 본 연구에서는 J, H, Ks, L 파장 대를 관측하기위한 내부 냉각온도를 정량적으로 결정하였으며 카메라 외부에서 유입되는 복사량을 추산하고 냉각에 필요한 냉각 열용량을 추정하여 냉각기를 선택하였다. 선택된 냉각기를 이용하여 냉각할 때 Cold-Box가 목표온도에 도달하는 시간과 최종 냉각 온도를 계산하여 시스템 제작에 반영하였다.

ABSTRACT

It is very important to eliminate thermal background radiation for the near infrared camera system such as KAONICS (KAO Near Infrared Camera System). Thermal background radiations which come from window and cryostat wall influence IR detector and decrease IR system performance. Therefore the cold box which contains optics and detector housing must be cooled down to eliminate thermal background radiation. We carried out quantitative analysis to determine internal cooling temperature to reduce thermal noise in the J, H, Ks, and L bandpass. Additionally, we estimated the incoming heat load and then chose the cryocooler adequate to KAONICS's requirements. The cooling time and the final cooling temperature of the cold box were calculated. These results were also implemented to the system design.

Key words: instrumentation, thermal analysis, infrared camera

[†]corresponding author

1. 서 론

적외선은 가시광선에 비해 성간먼지에 의한 흡수의 영향을 상대적으로 적게 받기 때문에 은하 중심방향이나 별 형성 영역 등의 천체뿐만 아니라, 저온의 천체를 관측할 수 있다. 최신 적외선 array 검출기의 개발 및 고해상도의 적외선 관측 기기의 개발과 더불어 적외선 관측 분야는 꾸준한 발전이 이루어지고 있다. 그러나 현재 국내에는 운용되고 있는 적외선 관측 장비가 없다. 이에 한국천문연구원에서는 국내 망원경 활용과 함께 적외선 파장에 대한 연구 분야의 확대를 위하여 적외선 카메라를 개발하고 있다. KAONICS(KAO Near Infrared Camera System)라고 명명된 이 적외선카메라는 J, H, Ks, L 파장 대를 관측할 수 있도록 설계 되고 있으며 소백산 천문대의 61㎝ 광학망원경에 설치할 예정이다.

적외선 관측의 경우 대기의 수증기량과 관측 장비의 열복사가 관측한계의 주요원인으로 작용한다(McLean 1997). 관측지의 기상조건은 불가항력적이나 관측 장비에 의한 열복사는 정량적인 분석을 통해 최대한 낮추도록 설계 제작하는 것이 가능하다. 따라서 적외선 카메라를 제작하는 경우 열해석은 매우 중요한 부분으로 장비설계 전에 가장 먼저 수행해야 하는 연구이다.

KAONICS와 같은 적외선 카메라는 카메라 외부로부터 유입되는 열복사가 배경복사로서 검출기에 입사하게 되며 그 양을 무시할 수 없다. 이러한 적외선 관측의 저해 요소인 배경복사와 검출기의 잡음을 줄이기 위해서 광학계 전체와 검출기를 냉각해야만 한다(Nagashima 2003). 한편, KAONICS 구조는 그림 1과 같이 외부는 진공 용기인 Cryostat, 그리고 내부는 광학계, 필터 휠, 검출기 등을 포함하는 Cold-Box로 크게 나눌 수 있다. 따라서 우리는 KAONICS의 광학계와 필터 휠, 검출기 등을 진공용기 안의 Cold-Box 안에 넣어 단열하기로 하고, 광학계 정렬의 용이함과 장치의 소형화를 목적으로 직육면체의 Cryostat를 제작하기로 했다. 이러한 KAONICS 냉각시스템 개발의 선행 연구로서, 첫째, 카메라 외부에서 발생되는 배경복사량 계산을 통해 카메라의 냉각 목표온도를 결정하고, 둘째, 카메라의 내부로 유입되는 열용량을 계산하여 KAONICS에 적절한 냉각기를 선택하였다. 마지막으로, 선택된 냉각기로 냉각하였을 때 냉각목표온도에 도달하는 시간이 얼마나 소요되는지 정량적으로 계산 하였다.

2. 냉각목표 온도 결정

KAONICS의 외부로부터 유입되는 배경복사를 줄이기 위해서 광학계 전체를 냉각해야만 한다. 따라서 우리는 진공용기안의 Cold-Box 내부에 배치된 광학계와 검출기를 냉각하기위한 선행 연구로서 냉각 목표온도를 결정해야만 한다. 이를 위해, 검출기에 감지되는 배경복사량 계산을 통해 외부에서 유입되는 복사량에 비해 내부에서 발생하는 복사량이 작아지는 냉각 온도를 도출하였고, 최대 노출 가능시간, 즉 총 배경 복사량이 최소가 되는 때의 냉각 온도를 계산하였다.

외부에서의 복사원으로는 대기의 열적복사, 대기의 OH airglow, 망원경 주경과 부경, vacuum window의 열적복사, 그리고 내부에서의 복사원으로는 카메라 Offner 광학계의 주경과 부경과 카메라 내벽(필터 투과 전·후로 구분)의 열적복사를 고려하였다. 이 때, 외부 잡광 및 내부 산란광은 완전히 차단하거나 흡수한다고 가정하였다.

망원경 주경과 부경, vacuum window의 열적 복사량 계산의 기준이 되는 카메라 외부 온도는 소백산 천문대의 기온과 같다고 가정하였으며, 크게 겨울과 여름으로 나누어 1월은 평균 영하 10°, 7월

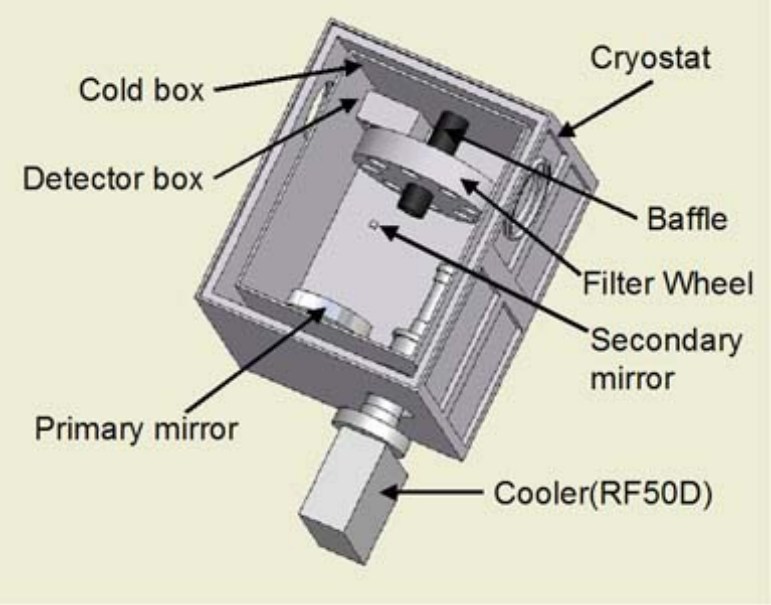

그림 1. KAONICS의 구성.

은 평균 영상 20°를 적용하였다(심경진과 한원용 1982). 대기의 열적복사의 가장 중요한 원천인 수증기의 대기권 전체에 대한 유효 온도는 지표면에 비해서 20° 정도 낮은 것으로 알려져 있다(McLean 1997). 본 연구에서는 소백산 천문대의 고도(1.4km; http://www.kao.re.kr/~sobaek 참조)와 대류권 내의 수직 온도 변화율(–6.5°/km; 민경덕 외 1999)을 감안하여, 대기권 전체의 유효 온도를 소백산 천문대에서 측정한 기온에 비해 10° 낮은 것으로 가정하였다.

카메라 내부의 온도 조건은 크게 필터 투과 전과 투과 후로 나누어지는데, 필터 투과 후에 해당하는 detector baffle은 검출기와 직접 접촉하므로 검출기 작동 온도(표 1 참조)인 30K로 냉각한다. 필터 투과 전의 영역에 포함되는 나머지 구성 요소들의 온도는 본 연구의 목적 중 하나로서 아래의 계산 과정을 통해 도출한다. 이 때, 카메라 외부와 내부의 온도는 각각 자체적으로 등온 상태인 것으로 가정하였다.

계산은 적외선 파장 밴드 J, H, Ks(Mauna Kea Filter System; Tokunaga et al. 2002), L(Standard Filter System; Simons & Tokunaga 2002), 각각에 대해 수행하였고 계절별로는 겨울(1월)과 여름(7월)에 대해 계산하였다. 각 소스에 대한 배경 복사 플럭스 계산을 위해 다음의 식을 사용하였다.

$$N_{photon} = \left[\int \frac{B_\lambda(T)}{hc/\lambda} \epsilon \ d\lambda \right] A\Omega \ \ TF \tag{1}$$

여기서 N_{photon}은 단위 시간당 검출기 픽셀 하나로 들어오는 광자의 개수, $B_\lambda(T)$는 온도 인 흑체에서 방출되는 단위 파장 당 복사세기, hc/λ는 파장 λ의 광자에너지(플랑크 상수 $h = 6.623 \times 10^{-34}$ J · s, 광속도 $c = 3.00 \times 10^8$ m/s), ϵ은 방사율(emissivity), A는 픽셀 면적, Ω는 검출기 픽셀에서 보이는 소스의 입체각, TF(Transfer Function)은 광학계의 전달함수이다. 계산 과정 중 사용된 상세한 파라

표 1. 냉각목표온도 계산 조건.

분류	내용
Solid angle & Pixel area($A\Omega$)	외부·카메라 Offner mirrors 공통: $(A\Omega)_{beam} = (A\Omega)_{telescope}$ $= \pi \left[\left(\frac{D_{primary\ mirror}}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_{cassegrain\ hole}}{2} \right)^2 \right] (pixel\ scale)^2$ 필터: $(A\Omega)_{filter} = (pixel\ size)^2 \pi \left(\frac{D_{filter}/2}{distance\ to\ detector} \right)^2$ (distance to detector = 50[mm]) 필터 투과 전의 카메라 내벽: $(A\Omega)_{wall\ before\ filter} = (A\Omega)_{filter} - (A\Omega)_{beam}$ 필터 투과 후의 카메라 내벽: $(A\Omega)_{wall\ after\ filter} = ((pixel\ scale)^2 2\pi) - (A\Omega)_{filter}$
Transfer Function (TF)	Mirror reflectance (망원경 주/부경, 카메라 Offner 주/부경 공통, Aluminum): 0.95 at J, H, Ks and 0.9 at L Vacuum window transmittance (CaF_2): 0.95 Filter transmittance (투과 복사량/입사 복사량) J-band: 0.7 at passband($1.17 \leq \lambda \leq 1.33 \mu m$)[1], 10^{-5} at stopband($\lambda < 1.17 \mu m$, $\lambda > 1.33 \mu m$) H-band: 0.7 at passband($1.49 \leq \lambda \leq 1.78 \mu m$)[1], 10^{-5} at stopband($\lambda < 1.49 \mu m$, $\lambda > 1.78 \mu m$) Ks-band: 0.8 at passband($1.99 \leq \lambda \leq 2.31 \mu m$)[1], 10^{-5} at stopband($\lambda < 1.99 \mu m$, $\lambda > 2.31 \mu m$) L-band: 0.7 at passband($3.20 \leq \lambda \leq 3.80 \mu m$)[1], 10^{-4} at stopband($\lambda < 3.20 \mu m$, $\lambda > 3.80 \mu m$)
Emissivity(ε)	Atmosphere, Mirror, Windows: 1 - (transmission or reflectance) Atmospheric transmission : ATMO 모델 계산[3] PWV(Precipitable Water Vapour) = 4.2mm(1월) & 25mm(7월)[4], 천정거리 = 30° 필터: 1 (worst case) 카메라 내벽: 1 (black baffle)
Telescope (소백산 61cm)	Diameter of primary mirror = 0.6096m Diameter of secondary mirror = 0.17m Diameter of Cassegrain hole = 0.19m Focal length = 8.24m Black focal length = 0.495m Distance between primary and secondary = 1.59m
Detector (Raytheon Aladdin III InSb[5])	Physical size of pixel = 2.7E-5m Pixel scale = 0.676 arcsec Quantum efficiency = 0.9 (worst case for the maximum exposure time) Full well depth of pixel = 2.0E5 (electrons) Detectable wavelength range : 0.4∼5.5μm Optimal operating temperature = 30K

[1]Tokunaga et al. 2002
[2]Simons & Tokunaga et al. 2002
[3]Grossman 1989
[4]문봉곤 외 2004
[5]홈페이지 http://www.raytheon.com/products/astronomy_sensors 참조

미터는 표 1에 제시하였다. 그리고 대기의 OH airglow의 플럭스 값은 표 2에 제시된 것과 같다. 또한 최대 노출가능시간(τ_{max})은 다음의 식을 사용하여 계산하였다.

$$\tau_{max} = \frac{well\ \ depth}{N_{photon}\ \ QE} \tag{2}$$

표 2. J, H, Ks 밴드에 대한 대기의 OH airglow의 플럭스(J & H: Cox 2000, Ks: Matsumoto et al. 1994).

	J	H	Ks
대기 복사량(mag arcsec^{-2})	15.6	13.8	15.5
Detector 입사량(photons s^{-1} pixel^{-1})	100	500	60

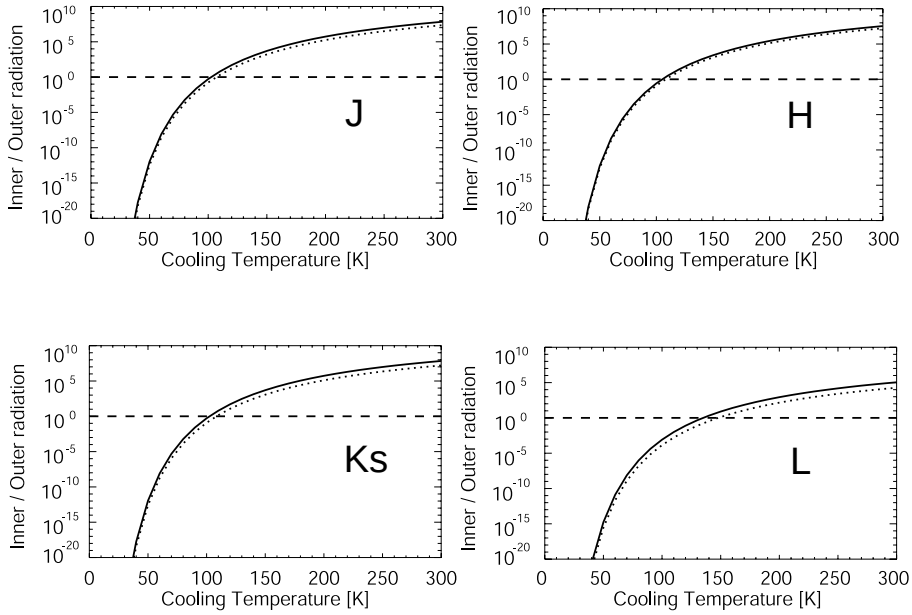

그림 2. 냉각 온도에 대한 카메라 내부와 외부의 배경 복사량의 비. 실선은 겨울, 점선은 여름.

여기서 *well depth*는 검출기 픽셀의 전하 저장 용량(full well depth of pixel; 표 1)이고 QE(Quantum Efficiency)는 검출기의 양자효율이다.

식 (1)을 이용하여, 냉각 온도에 대한 카메라 내부와 외부의 배경 복사량의 비를 계산하고 그 결과를 그림 2에 보였다. 외부에서 유입되는 복사량에 비해 내부에서 발생하는 복사량이 작아지는 냉각 온도는, 계절에 따른 차이를 포함하여, J, H, Ks 밴드에서 90∼100K, L 밴드에서 120∼140K임을 볼 수 있다. 그리고 식 (2)를 이용한 계산 결과, 최대 노출 가능시간이 최고치에 이르는(총 배경 복사량이 최소가 되는) 냉각 온도는 J, H, Ks 밴드에서 90∼100K, L 밴드에서 120∼130K임을 볼 수 있다(그림 3). 따라서 우리는 그림 2와 3의 결과로부터 모든 파장 밴드에 대한 요구 조건을 공통적으로 만족시키는 냉각 온도는 평균 95K라는 결론을 얻고, 유효 숫자를 감안하여 KAONICS의 적절한 냉각 목표온도를 100K로 설정하였다.

3. 열 유입량 계산

냉각 목표 설정 온도 계산의 결과에서처럼, 우리는 KAONICS의 Cold-Box를 약 100K로 냉각해야 한다. 따라서 어느 정도의 냉각용량을 가진 냉각기를 사용할 것인지 결정하기 위해 Cold-Box에

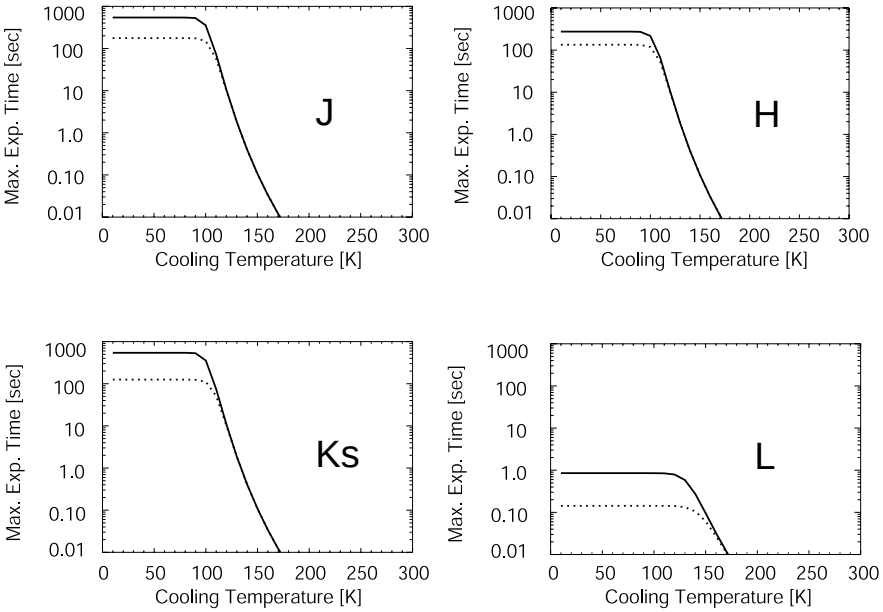

그림 3. 냉각 온도에 대한 최대 노출 가능시간. 실선은 겨울, 점선은 여름.

표 3. 입사창으로의 열 유입량 계산의 조건.

분류	물리량
입사창의 면적 S	$\pi \times 40 \times 40$ [mm^2]
주위 입사창의 온도 T_1	300 [K]
Cold–Box의 온도 T_2	80 [K]
주위 입사창의 방사율 ε_1	1
Cold–Box 내벽의 방사율 ε_2	1

의 열 유입량을 추측할 필요가 있다. 먼저 Cold–Box에 들어오는 열복사는 크게 입사창, 진공용기 내벽, 단열 지지판으로부터의 열 유입과 Cold–Box 내부의 검출기 박스로의 열 유입으로 나눌 수 있다. 이러한 열 유입량 계산들은 다른 적외선 카메라의 경우에서도 비슷한 가정을 하고 있다(Nagashima 2003).

3.1 입사창으로의 열 유입량

고온에서 면적 S를 통과해 저온으로 유입되는 열량 Q는 다음 식에서 계산할 수 있다.

$$Q = \sigma S \left(T_1^4 - T_2^4\right) \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2 - \epsilon_1 \epsilon_2} \tag{3}$$

여기서 σ는 스테판 볼츠만 상수이며 T_1, T_2는 각각 고온 측, 저온 측의 온도이며 ϵ_1, ϵ_2는 각각 고온 측, 저온 측의 방사율(emissivity)이다. 300K의 대기로부터 입사창을 통해 Cold–Box에 유입하는 열량의 경우, 입사창에 사용되는 적외선 소재는 일부 파장대만 투과하며 투과하지 않는 파장에 대해서는 입사창 자신이 열로서 방출한다. 따라서 모든 파장에 대해 고온 측의 방사율을 1로 가정하였다. 입사창으로의 열 유입량을 계산하기위해, 표 3과 같이 가정하고, 식(3)을 이용하여 계산한 결과, 입

표 4. 진공 용기 내벽으로부터의 열 유입량 계산의 조건.

분류	물리량
진공 용기 내벽의 면적 S	0.87 [mm^2]
진공 용기의 온도 T_1	300 [K]
Cold–Box의 온도 T_2	80 [K]
진공 용기 내벽의 방사율 ε_1	0.02∼0.08
Cold–Box 내벽의 방사율 ε_2	0.02∼0.08

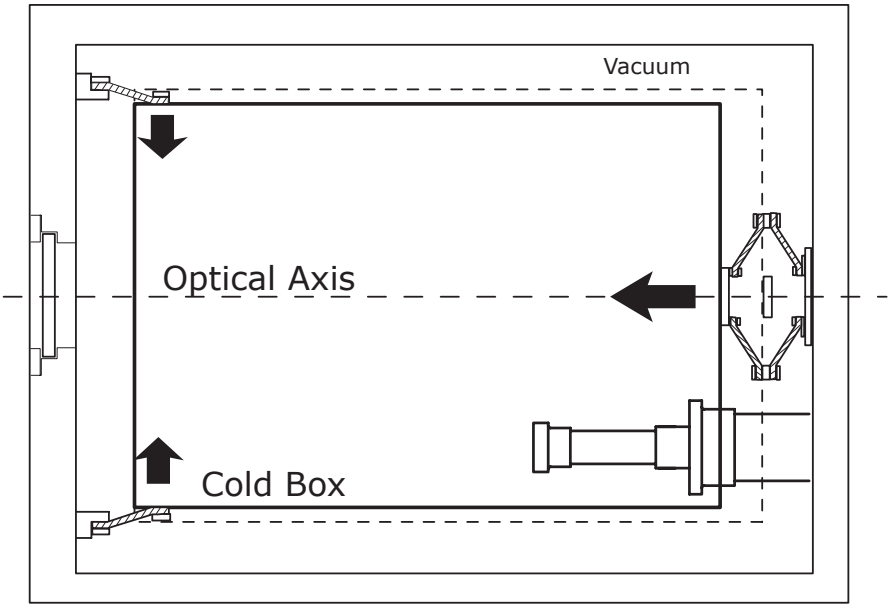

그림 4. Cold–Box 지지 방법(단면도). 점선은 상온에서의 Cold-Box 수축 전 모습, 굵은 실선은 수축 후 모습. Cold–box를 지지하고 있는 Fiberglass로부터의 열 유입량을 고려하였음.

사창으로부터의 열 유입량, $Q_w = 2.3$W의 결과를 얻었다.

3.2 진공 용기 내벽으로부터의 열 유입량

진공 용기 내벽으로부터 열 유입량은 입사창으로의 열 유입량과 마찬가지로 식(3)을 이용하여 계산할 수 있다. 진공 용기의 내벽과 Cold–Box의 외벽은 알루미늄을 연마한 면이며, 연마한 직후는 방사율이 낮아 0.02 정도이지만 표면이 거칠어지면 방사율이 높아져, 0.08 정도가 된다. Cold–Box와 내벽 사이에 MLI(Multi–Layer Insulation) 등과 같은 절연체를 넣어 효율을 높일 수 있으나 여기에서는 다음의 두 가지 경우에 대해 계산에 보았다. 표 4의 조건을 대입하여 방사율을 0.02로 가정했을 경우와 0.08로 가정했을 경우 모두에 대해 열 유입량 Q_i를 계산하였을 때, $Q_{i(0.02)} = 4$W, $Q_{i(0.08)} = 17$W의 결과를 얻을 수 있었다.

3.3 단열 지지판으로부터의 열유입량

Cold–Box는 그림 4와 같이 전·후방 각각 4개로, 총 8개의 지지판으로 진공 용기와 연결되어 있

표 5. 단열 지지판으로부터의 열 유입량 계산의 조건.

분 류	물리량
진공 용기 내벽의 면적	0.87 [mm^2]
Cold-Box의 온도 T_2	300 [K]
단열재의 단면적 A	2×30 [mm^2]
단열재의 길이 L (전방지지 도구)	40 [mm]
단열재의 길이 L (후방지지 도구)	50 [mm]

표 6. Cold-Box에 유입하는 열량.

분 류	알루미늄 방사율 0.02	알루미늄 방사율 0.08
입사창으로의 열유입량 Q_W	2.3 W	2.3 W
진공용기 내벽으로부터의 열유입량 Q_i	4 W	17 W
단열 지지판으로부터의 열유입량 Q_s	1.08 W	1.08 W
합 계	7.4 W	20.4 W

다. 그림 4의 사선 부분은 열전도율이 작은 fiberglass로 된 얇은 판이며, Cold–Box와 진공 용기를 단열하는 역할과 Cold–Box의 열 수축 부분이 광축에 영향을 미치지 않도록 흡수하는 역할을 가지고 있다. fiberglass의 단열판으로 유입되는 열량은 식(4)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$Q = \frac{A}{L}\int_{T_2}^{T_1} \kappa(T)dT \tag{4}$$

여기서 A, L은 각각 단열판의 단면적과 길이를 나타낸다. $\kappa(T)$는 물질의 열전도율이며 아래와 같이 정의한다(Nagashima 2003).

$$\int_{80K}^{300K} \kappa(T)dT = 1.80 \times 10^2 \ \ [W/m] \tag{5}$$

한편 fiberglass의 $\kappa(T)$의 값은 epoxy 혼합률에 의해 달라지므로 우리 계산에는 유리의 값으로 대신하였다. 표 5의 조건을 이용하여 식 (4)에 대입해 계산하면 전방의 한 곳은 0.07W, 후방의 한 곳은 0.20W이다. 따라서 전·후방 각각 4개의 지지판이 있으므로 지지판으로부터 총 열 유입량은 $Q_s = 1.08$W이다.

각각의 식에 대입해 계산한 입사창으로의 열 유입량과 진공 용기 내벽으로부터의 열 유입량, 그리고 단열 지지판으로부터 열 유입량을 계산한 결과를 표 6에 정리하였다. 또한 KAONICS에 있어, 각각의 열 유입량에 대한 전체적인 흐름을 그림 5에 도식적으로 표현하였다.

3.4 검출기로의 열 유입량

검출기 박스 및 검출기로의 열전달을 최소화시키기 위한 목적의 부품 선정을 위해 Cold–Box 내부에 배치되어 있는 검출기 박스에서 예상되는 열 유입량이 제시되어야 한다. 그리고 InSb 검출기로 L-band까지의 관측을 수행하기 위해서는 검출기 박스의 온도는 30K 정도로 매우 안정되어야 한다(http://www.raytheon.com/product/astronomy_sensors 참조). 따라서 우리는 검출기 박스로의 열 유입량 조건을 알아보고 그 양을 추정하였다.

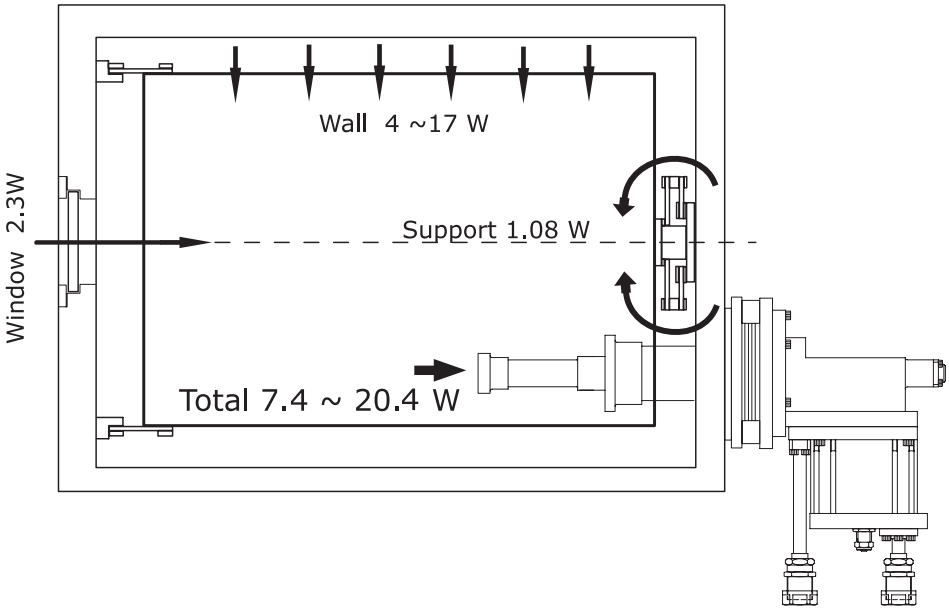

그림 5. Cold-Box 열 유입량(단면도).

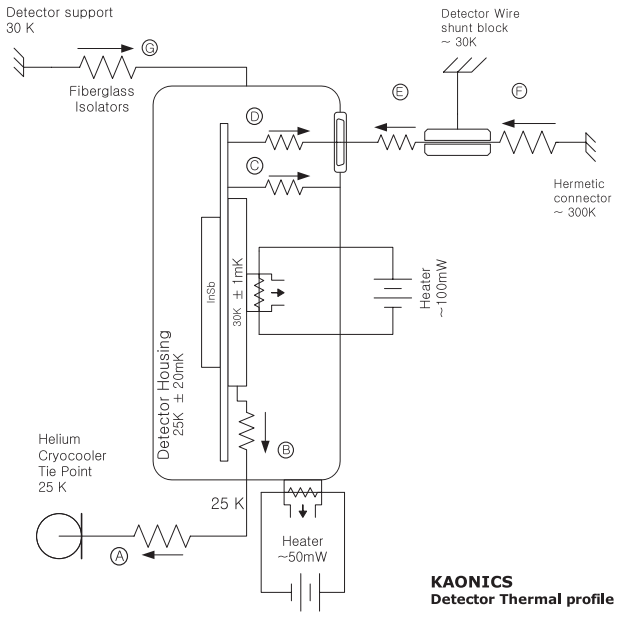

그림 6. 검출기 박스구조에서의 열 흐름 개념도. 각 지점에 대한 상세한 파라미터는 표 7에 제시.

표 7. 검출기로의 열 유입량 계산 결과.

Node	Material	t[m]	h[m]	l[m]	T1[K]	T2[K]	Q[mW]	Note
A	OFHC Copper	0.0005	0.01	0.15	25	20	6.40	
B	OFHC Copper	0.0005	0.01	0.1	30	25	9.60	
C	Fiberglass	ϕ 0.003		0.01	30	25	0.56	$\times 4$
D	OFHC Copper	0.00005	0.0004	0.07	30	25	0.30	$\times 60^1$
	Teflon	0.0003	0.15	0.07	30	25	0.35	
E	OFHC Copper	0.0005	0.0004	0.12	30	25	0.51	$\times 60^1$
	Teflon	0.0003	0.15	0.12	30	25	0.59	
F	OFHC Copper	0.0005	0.0004	0.12	300	70	305.49	$\times 60^1$
	Teflon	0.0003	0.15	0.12	300	70	3.21	
G	Fiberglass	ϕ 0.005		0.02	70	30	0.64	$\times 4$
	Total						327.65	

[1] 배선의 수

그림 6은 검출기 박스로의 열 유입에 대한 도식도이다. 이러한 단순화된 형태를 바탕으로, 다음의 식을 이용하여 열 유입량을 계산하였다(Barron 1999).

$$Q = S \int_{T_C}^{T_H} \kappa_t dT \tag{6}$$

S는 Conduction shape factor로서 A(x)/Δx로 정의되며, 우리의 경우는 1차원 평면에 대해 계산하기 때문에 A(x)는 일정한 상수 A, Δx는 물체의 두께라 가정하였다. κ_t는 열전도율로써 $\kappa_{copper} = 385.0$ W/m·K, $\kappa_{teflon} = 0.1075$ W/m·K, $\kappa_{fiberglass} = 0.04$ W/m·K의 값을 사용하였다.

$$Q = \frac{t \cdot h}{l} \int_{T_C}^{T_H} \kappa_t dT \tag{7}$$

$$Q = \frac{\pi t^2}{l} \int_{T_C}^{T_H} \kappa_t dT \tag{8}$$

그림 6의 A, B, D, E, F는 전기 신호선으로, 폭 t, 넓이 l, 높이 h의 육면체로 가정하여 식 (7)을 이용해 계산하였으며, C, G는 fiberglass를 사용한 지지구조물로서, 지름 t, 높이 l인 원통으로 가정하여 식 (8)을 이용하여 계산하였다. A에서 F까지의 각 지점에 대한 세부적인 사항은 표 7에 제시되어 있다. 위 계산에 따라 검출기 박스로의 총 열 유입량은 $Q_d = 0.3$W의 결과를 얻었다.

Cold-Box와 검출기 박스에 유입되는 열용량 계산을 통해 Cold-Box에서 요구되는 냉각 용량이 최소 7.4W에서 최대 20.4W가 되는 것을 알 수 있으며, 검출기 박스에서 요구되는 냉각 용량은 약 0.3W 임을 알 수 있다. KAONICS에서 사용할 검출기인 InSb 검출기에서의 열 발생률은 다른 부분의 열 유입 요소에 비해 극히 작은 값이기 때문에 고려하지 않았다.

4. 냉각기

4.1 냉각기 결정

KAONICS와 같은 적외선 카메라 외부와 내부에서 발생하는 배경 열복사를 줄이기 위해서는 Cold-Box를 100K 정도 까지 냉각할 필요가 있음을 앞의 냉각 목표 온도 계산에서 알 수 있었다.

표 8. Suzuki Shokan의 2단계 냉각기 RF50D의 사양(Suzuki Shokan Co., Ltd 2004).

Cryocooler		RF50D
Compressor		C103K
Cooling Capacity	1st(80K)	18W
(50/60Hz)	2nd(20K)	4.7W
Lowest temperature		< 12K
Power		3 phase 200V, 60 Hz
	Power consumption	1.9W
Ambient temperature		$4 \sim 38°$C
Maintenance interval	Cryocooler	16,000hrs

KAONICS에서 사용할 검출기의 최적 작동 온도는 약 30K이며, 3장의 열 유입량의 계산 결과에서처럼, 검출기만을 보다 낮은 온도에 도달시킬 필요가 있으므로 냉각기는 2단식의 것을 고려하였다. 이러한 냉각 목표 온도나 열 유입량, 냉각계의 무게, 열용량 그리고 진동을 고려하여 Suzuki Shokan의 냉각기인 RF50D(Compressor: C103K)를 사용하기로 했다. 3장에서의 계산 결과는 열 유입량에 대해 최악의 경우를 가정하여 계산하였기 때문에, 우리는 KAONICS에서 요구되는 열 유입 용량을 계산된 결과의 최소 값, 7.4W와 최대 값, 20.4W의 평균값인 약 14W 정도로 예상하고 있다.

냉각기의 냉각 능력은 헤드의 유입 온도에 따라 달라진다. 1단계, 2단계의 헤드에 각각 열량 Q_1[W], Q_2[W]가 유입했을 때, 헤드의 온도가 T_1[K], T_2[K]로 평형 상태가 되었다고 하면, 헤드의 온도 T_1, T_2에서의 냉각 능력은 Q_{e1}, Q_{e2}가 된다. 우리가 고려한 냉각기는 2단계의 냉각 헤드를 갖고 있으며 1단계는 80K으로 18W, 2단계는 20K으로 4.7W의 냉각 능력이 있다(표 8). 냉각 능력이 큰 1단계에서 전체 Cold-Box를 냉각하고 더 낮은 온도까지 냉각할 수 있는 2단계에서 검출기를 냉각할 것이다. KAONICS에서 예상되는 유입 열량 Q_1[W], Q_2[W] 보다 선택된 냉각기의 Q_{e1}, Q_{e2}가 높기 때문에 냉각에 문제는 없다.

4.2 냉각시간과 도달 온도

Cold-Box로의 열 유입량은 검출기 부분에 비해 매우 큰 편이기 때문에, 본 논문에서는 Cold-Box의 냉각에 1단계의 냉각시간과 도달온도만 고려하였다. KAONICS의 Cold-Box는 실제로 복잡한 구조를 가지고 있지만 본 계산에 있어 필요한 부분들의 질량을 최대한 고려한 모델을 만들었으며, 열전도를 위해 Cold-Box와 냉각기를 이어주는 구리로 된 편조선에 대한 열전도만을 고려하였다.

Cold-Box 내부의 질량 산출을 위한 세부적인 사항들은 표 9와 같다. Cold-Box 내부 물질들의 물리량은 표 10과 같고, 알루미늄과 구리의 비열과 열전도율은 온도에 의해 변하지만 본 논문에서는 상온의 값을 사용하였다. 열전달을 위한 구리 편조선의 세부사항은 표 11에 제시되어 있으며, 1m를 3~4개로 나누어 사용한다고 가정하여 질량이 763g인 등가의 사각형 박스를 고려하였다. 길이는 3개로 나눈다고 가정하면, 약 330mm 정도 되지만 접촉면을 고려하여 약 150mm로 설정하였다. 구리를 기준으로 길이는 150mm, 단면적은 $24\text{mm} \times 24\text{mm} = 0.000576\text{m}^2$의 박스를 사용할 경우 무게는 0.769kg이 되므로 이 형태의 박스를 고려하여 계산하였다.

초기 온도 조건을 300K로 하고 구리 편조선과 냉각기가 연결되는 부분은 냉각기 RF50D의 냉각 온도인 80K로 설정하였다. 냉각 시간의 추이를 보기위해 복사 열해석 모델프로그램인 RadCAD를

표 9. Cold-Box 내부 질량 산출. 예상되는 최대 값으로, 실제 제작에서는 보다 적은 무게가 예상된다.

No	Item	Material	Weight[g]	추정요건
1	Cold box	AL6061–T6	10,000	바닥 10mm, 외벽 5mm
2	Baffle	AL6061–T6	35	전체길이를 고려하여 하나의 원통으로 가정
3	Image Housing	AL6061–T6	0.97	폭을 줄여 계산(내부 채움)
4	Filter wheel	AL6061–T6	5.43	폭을 줄여 계산(내부 채움)
5	Optic Housing	AL6061–T6	86.5	원통 예상 값
6	Optic	AL6061–T6	853	주경 크기 확장 부경은 없음
7	Cover	AL6061–T6	731	얇은 판으로 가정
8	Etc	AL6061–T6	1,000	볼트 등
	Total	AL6061–T6	12,700	

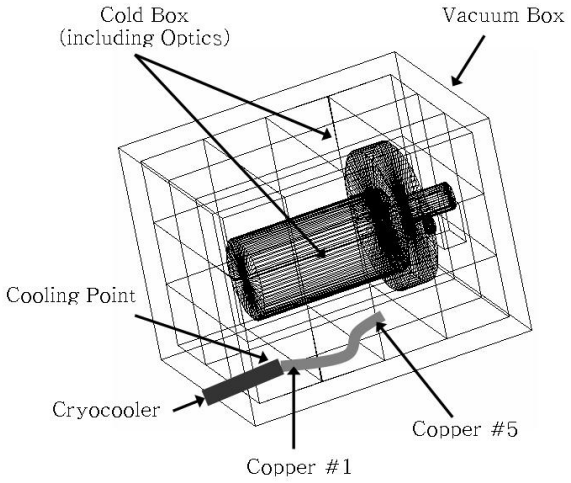

그림 7. 냉각시간 계산 모델(Cold–Box내부).

이용하여 제시된 조건들을 바탕으로, 현재 진행되고 있는 KAONICS 설계 자료와 가장 가까운 등가 모델을 만들고(그림 7) 해석조건을 설정하였으며 Sinda 프로그램을 통해 해석하였다. 이와 같은 모델을 가지고 첫째, Cold–Box, 둘째, 냉각기와 구리 편조선이 연결되는 부분, 마지막으로 구리 편조선이 Cold–Box와 연결되는 부분으로 나누어 냉각시간 추이를 계산하였다. Cooling point를 기준으로 계산 결과를 비교해 보면 처음 가정하였던 조건을 변함없이 적용했을 경우에 냉각 시간은 약 50시간이 소요되었고(그림 8a), 구리 편조선의 양을 2배로 늘였을 때는 약 30시간(그림 8b), 구리 편조선의 양을 4배로 늘여주었을 때는 약 20시간 정도가 소요됨을(그림 8c) 알 수 있다. 이러한 결과를 통해, 우리는 구리 편조선의 양이 냉각 시간에 많은 영향을 준다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 그림 8로부터 편조선의 양을 2배 이상 늘여주었을 경우에 KAONICS의 목표 도달온도인 100K은 충분히 달성될 수 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 냉각 목표온도 달성을 위해서는 처음 제시된 것 보다 열전도체 영역을 더 넓혀야 함을 알 수 있다.

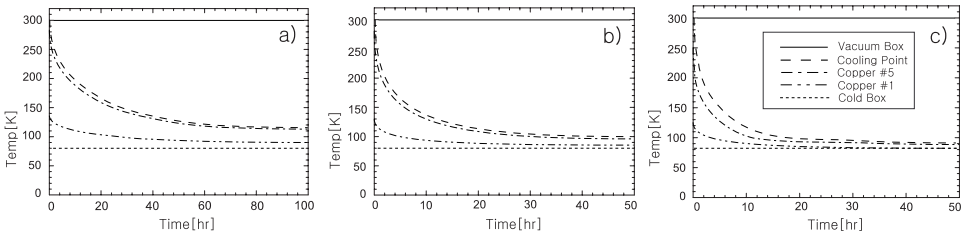

그림 8. 그림 7의 각 지점별 냉각 시간계산 결과. (a) 기준 편조선을 사용할 경우 (b) 편조선의 양이 2배일 경우 (c) 편조선의 양이 4배일 경우.

표 10. 냉각시간 계산에 사용한 값.

	물리량	
열유입량	20.4[W] (알루미늄 방사율 0.08)	
	7.4[W] (알루미늄 방사율 0.02)	
알루미늄의 비열(200K)	8.0×10^2[J/K · kg]	
구리의 비열(200K)	3.57×10^2[J/K · kg]	
알루미늄의 열전도율(173K)	241[W/m · K]	
구리의 열전도율(173K)	420[W/m · K]	
	Solar Absorptivity	IR Emissivity
Optics	0.02	0.02
Black painting (Cold-Box 내벽)	0.96	0.88
Polished Gold (Cold-Box 외벽)	0.30	0.05
Super Insulation (Vacuum Box 내벽)	0.004	0.02

표 11. 구리 편조선의 세부 사양.

Nominal cross section	Construction	Design [mm^2]	Width(±5%) ×Thickness	Net Weight[g/m]	Current [A]	Packing Roll
80	48/148/0.12	80.3	42×4	10000	257	30

5. 결론 및 토의

적외선 카메라 KAONICS의 선행 연구로서 우리는 카메라 냉각을 위한 목표온도를 계산하였고, Cold-Box로의 열 유입량 계산과 설계된 기계 구조부 자료를 통해 냉각목표에 도달하는 시간을 계산하였다. 또한 이 결과를 이용하여 KAONICS에 적절한 냉각기를 선택하였다. 열 유입량을 계산한 결과, KAONICS는 7.4W에서 최대 20.4W까지 열이 유입될 수 있음을 알 수 있었다. 무게, 열용량 그리고 진동을 고려하여 우리가 최종적으로 선택한 냉각기인 RF50D의 냉각 용량은 계산된 열 유입량의 최대 값을 만족하지 못한다. 그러나 열 유입량의 최대 값은 Cold-Box에 아무런 처리를 하지 않은 최대의 악조건을 가정하였을 때의 값이기 때문에, 우리는 KAONICS의 열 유입량이 최소·최대 값의 평균인 약 14W 정도가 될 것이라 예상하고 있다. 이러한 이유로 선택된 냉각기는 KAONICS의 냉각 용량을 충분히 만족시킬 수 있을 것이라 생각된다. 이 냉각기를 통해 과연 얼마나 빠른 시간에 목표온도로 카메라를 냉각시킬 수 있는 지에 대한 계산 결과, 냉각기와 연결된 구리 편조선의 양을 처음 예상 보다 2배 이상 늘여야 안정되게 목표온도에 도달할 수 있음을 알 수 있었다.

따라서 냉각 시간 단축을 위해 구리 편조선의 사용을 늘이는 방법, 그리고 열 유입량을 최대한 막기 위해 진공 용기와 Cold–Box 사이에 radiation shield 용으로 MLI(Multi–Layer Insulation)를 사용하는 방법이 가능하다. 또한 진공 용기와 Cold–Box의 내·외벽의 효율적인 반사율을 얻기 위해 검은 페인트 및 금 코팅 등의 처리를 고려하고 있다. 앞으로, 우리는 이와 같은 정량적인 고찰과 연구 결과를 통해 KAONICS의 효율적인 설계와 냉각 능력을 기대할 수 있을 것이다. 또한 다른 천문 관측기기의 열잡음 해석에 있어서도 이러한 연구가 매우 중요하게 활용될 것으로 생각된다.

감사의 글: 이 연구는 한국천문연구원의 '적외선 관측기술 개발' 연구 사업의 지원으로 수행되었습니다. 또한 이 연구에서 대기투과율 계산에 이용된 ATMO 모델 사용을 협조해 주신 Texas Austin 대학의 Dr. Greg Doppmann에게 감사드립니다.

참고문헌

문봉곤, 이성호, 박수종, 진호, 김용하, 육인수, 한원용 2004, 한국우주과학회지, 21, 453

민경덕, 강인식, 김경익, 김영섭, 김유근, 문영수, 변희룡, 안중배, 윤일희, 이광목, 이광호, 이동규, 이재규, 이태영, 이화운, 임규호, 전종갑, 정영근, 정형빈, 최효 1999, 대기과학개론(서울: 시그마프레스), p.7

심경진, 한원용 1982, 국립천문대 논문집, 5, 41

Barron, R. F. 1999, Cryogenic Heat Transfer (Philadelphia: Taylor & Francis), pp.42-47

Cox A. N. 2000, Allen's astrophysical quantities, 4th ed. (London: AIP press), pp.143-167

Grossman, E. 1989, AT program, Ver. 1.5, Air Head Software, unpublished

Matsumoto T., Matsuura S., & Noda M. 1994, PASP, 106, 1217

McLean, I. 1997, Electronic Imaging in Astronomy (Chichester: Praxis publishing Ltd), pp.195-229

Nagashima C. 2003, PhD Thesis, Nagoya University

Simons, D. A. & Tokunaga, A. T. 2002, PASP, 114, 169

Suzuki Shokan Co., Ltd. 2004, Catalog of Cryocooler Series (Tokyo: Suzuki Shokan Co., Ltd.), pp.1-2

Tokunaga, A. T., Simons, D. A., & Vacca, W. D. 2002, PASP, 114, 180