

<응용논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.2.213

# 액체헬륨을 이용한 위성시험용 극저온패널 냉각시스템 개발 및 검증<sup>§</sup>

조혁진<sup>\*†</sup> · 문귀원<sup>\*</sup> · 서희준<sup>\*</sup> · 이상훈<sup>\*</sup> · 홍석종<sup>\*</sup> · 최석원<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> 한국항공우주연구원 우주환경시험팀

## Development and Validation of Cryopanel Cooling System Using Liquid Helium for a Satellite Test

Hyokjin Cho, Guee-Won Moon, Hee-Jun Seo, Sang-Hoon Lee, Seok-Jong Hong and Seok-Weon Choi

<sup>\*</sup> Space Environment Test Department, Korea Aerospace Research Institute (KARI)

(Received September 21, 2009 ; Revised November 15, 2009 ; Accepted November 16, 2009)

**Key Words :** LHe(액체 헬륨), Cryopanel(극저온패널), Satellite(위성), Dewar(용기)

**초록:** 인공위성 적외선 탑재체의 열싱크 역할을 위해, 액체헬륨을 이용하여 극저온패널(가로 약 800 mm, 세로 약 700 mm)을 4.2 K까지 냉각시키는 시스템을 설계, 개발, 검증하였다. 유효직경 8 m, 유효 깊이 10 m의 대형열진공챔버에서 검증된 본 냉각시스템은 500리터 용량의 액체헬륨용기 두 개(극저온 패널로의 액체헬륨 또는 저온헬륨가스 주 공급용기 및 주공급용기로의 재충진용기)를 사용하였는데, 목표인 극저온패널의 냉각 및 온도제어는 주 공급용기 내부의 미세압력조절을 통해 액체헬륨 공급유량을 제어함으로써 이루어졌다. 극저온패널에 공급된 후 배기되는 저온 헬륨가스는 특별히 설계, 제작된 사중진공배관의 제3층을 흐르며 열차단막의 역할을 수행함으로써, 액체헬륨 공급 라인인 제1층(중심배관)으로의 열유입을 최소화하였다. 극저온패널을 상온에서 40 K(합성표준불확도 194 mK)까지 냉각시키는데 약 3시간이 소요되었으며, 20 W의 열을 발산하는 극저온패널을 40 K 주변 온도에서 1 K 이내의 온도균일도를 가지며 유지할 수 있었다.

**Abstract:** A cooling system utilizing liquid helium to chill the cryopanel (800 mm × 700 mm dimensions) down to 4.2 K was designed, implemented, and tested to verify the role of the cryopanel as a heat sink for the payload of a spacecraft inside the large thermal vacuum chamber (effective dimensions : 8 m (Φ) × 10 m (L)) of KARI (Korea Aerospace Research Institute). Two LHe (Liquid Helium) Dewars, one for the main supply and the other for refilling, were used to supply liquid helium or cold helium gas into this cryopanel, and flow control for the target temperature of the cryopanel within requirements was done through fine adjustment of the pressure inside the LHe Dewars. The return helium gas from the cryopanel was reused as a thermal barrier to minimize the heat influx on the core liquid helium supply pipe. The test verified a cooling time of around three hours from the ambient temperature to 40 K (combined standard uncertainty of 194 mK), the capacity for maintaining the cryopanel at intermediate temperatures, and a 1 K uniformity over the entire cryopanel surface at around 40 K with 20 W cooling power.

- 기호설명 -

$C_{p,HeG}$  : 헬륨가스의 비열 (5.2 J/g/K)  
 $FL_{LHe}$  : 액체헬륨 유량 (L/hr)

$Q_{pipe}, Q_{LHe}$  : 액체헬륨에 유입되는 열량 (W, W/L)  
 $\sigma$  : Stefan-Boltzmann 상수 ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ )  
 $A_{equ}$  : 배관의 대표 면적 ( $\text{m}^2$ )  
 $\epsilon$  : 방사율 (emissivity)  
 $h_{fg,LHe}$  : 액체헬륨의 잠열 (20.9 kJ/kg)

### 1. 서론

최적의 극저온 냉각 방식은 대상이 되는 시편이 요구하는 냉각 온도와 냉각 용량, 온도 분포의 균일도에 따라 결정된다. 본 연구에서는 진공챔버 내에서 위성의 광학 탑재체 방열판의 극저온 냉각(20

<sup>§</sup> 이 논문은 2009년도 열공학부문 춘계학술대회(2009. 5. 20-22, BEXCO) 발표논문임

<sup>†</sup> Corresponding Author, wittycho@kari.re.kr

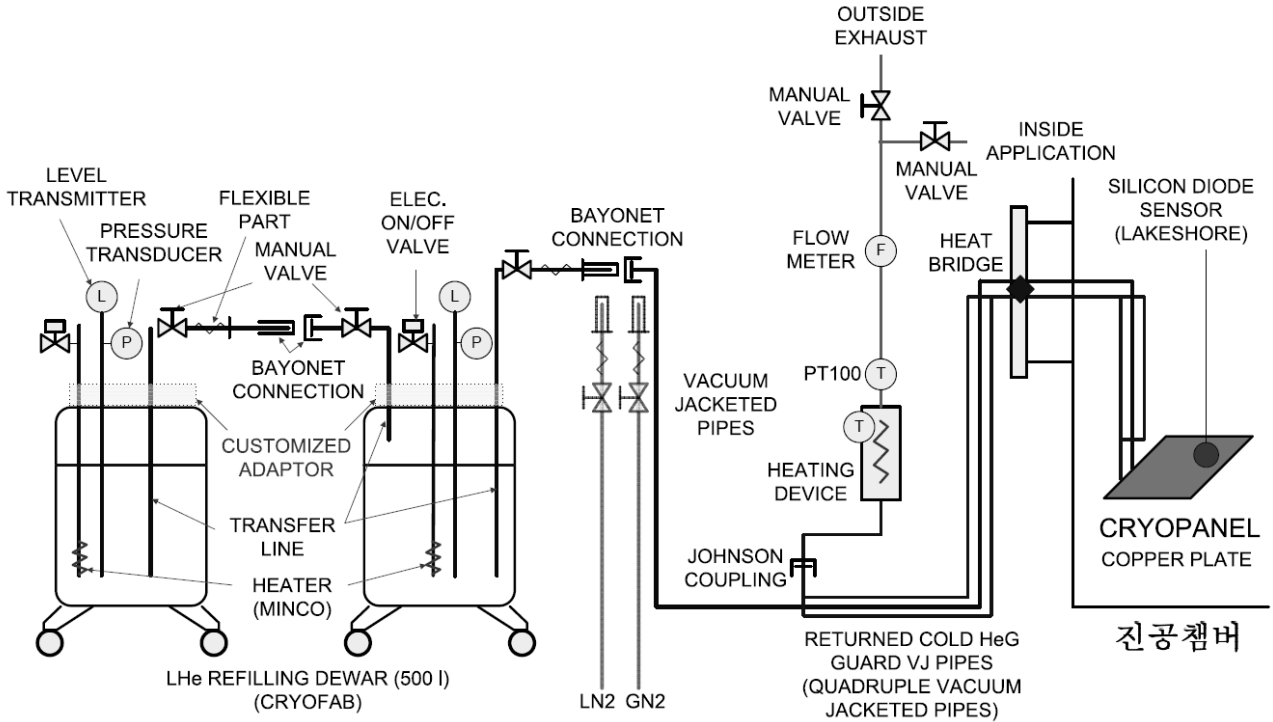


Fig. 1 Schematic of cryopanel cooling system

W @ 85 K)을 위해서, 방열판에서 일정거리만큼 떨어져 설치된 가로 약 800 mm, 세로 약 700 mm, 두께 약 7 mm의 극저온패널을 40 K이하로 냉각시키고, 극저온패널 전 표면에 대하여 1 K 이내의 균일한 온도 분포를 갖도록, 액체헬륨 Dewar를 이용해 액체헬륨을 직접 극저온패널에 공급한 뒤 외부로 배출하는 방식을 적용하였다.

냉각 시스템의 선정시, 상용의 G-M 냉동기의 콜드헤드를 이용해 열전도 링크로 시편을 연결하는 방법과 압축된 헬륨가스를 G-M 냉동기의 콜드헤드와 열교환시켜 순환시키는 방법, 액체헬륨 액화기를 이용한 방법 등이 고려되었으나, 열용량과 시편 표면의 온도분포도, 사용 빈도, 제작 기간 등을 고려하여 경제성과 효율성을 최우선으로 하여 최종 액체헬륨 Dewar를 사용하는 방법이 선택되었다.

액체헬륨 Dewar를 사용해 직접 액체헬륨을 시험대상에게 공급하는 경우, 사용된 액체헬륨을 외부로 그대로 배기하여 소모하기 때문에 시험 요구 조건을 만족시키는 범위 내에서 공급 유량을 최소화하여 액체헬륨의 소비를 최소화하는 것이 시스템 효율화의 가장 중요한 목표가 된다.

## 2. 냉각 시스템의 설계

### 2.1 냉각 시스템의 구조

액체헬륨을 이용한 극저온패널 냉각시스템은 액

체헬륨 공급을 위한 Dewar 공급부와 Dewar 에서 챔버 내부까지의 유체 흐름을 가능하게 하는 다중 진공배관부, 극저온패널을 포함한 진공챔버 내부의 극저온부로 구성되어 있다. (Fig. 1)

Dewar 공급부는 극저온패널에 액체헬륨을 지속적으로 공급하는 주 공급 Dewar 와, 시험 도중 주 Dewar 의 액체헬륨 소진으로 인해 시험이 중단되지 않도록 주 공급 Dewar 후단에서 액체헬륨을 주 공급 Dewar 에 공급하는 재충진 Dewar 로 구성되어 있다.

다중진공배관부는 Dewar 공급부에서 진공챔버 피드스루(feedthrough)까지 연결되는 배관부로서, 챔버쪽으로 유체가 공급되는 라인과 극저온패널을 지나 외부로 배기되는 배기라인으로 구성되어 있다. 자세한 구조는 2.3.2 항에서 다루었다.

챔버 내부 극저온부는 본 시험장치의 목적이 되는 극저온패널과 진공챔버 내부에서의 다중배관으로 이루어져 있다.

### 2.2 시스템의 작동 원리

액체헬륨의 공급을 통해 극저온패널을 냉각시키는 본 시스템의 경우, 주 공급 Dewar 에서 극저온패널로의 액체헬륨 공급 유량을 조절하는 것과, 시험이 진행되는 중간에 시스템으로의 영향 없이 재충진 Dewar 에서 주 공급 Dewar 에 액체헬륨을 충전하는 것, 그리고 10 미

터 이상의 액체헬륨 공급라인의 열유입을 최소화 하는 것이 시스템 작동의 핵심이 된다.

주 공급 Dewar 에서 극저온패널로의 액체헬륨의 공급은 Dewar 내부에 설치된 히터와 Dewar 외부로 연결되는 자동단속밸브를 이용하여 Dewar 내부의 압력을 10 mbar 이상으로 일정하게 유지함으로써 구현하였다. 공급된 액체헬륨은 진공층과 배기 저온 헬륨가스 라인, 최외각의 진공층으로 둘러싸인 다중진공 배관을 통해 열유입을 최소화하며 진공챔버 내부로 전달되도록 하였으며, 진공챔버 내부로 공급된 액체헬륨 및 기화된 헬륨가스는 챔버 내부의 진공을 이용한 특수 배관을 통해 최종 극저온패널에 도달하게 하였다.

극저온패널을 거친 헬륨가스는 다시 공급되는 액체헬륨을 진공층을 안에 두고 감싸며 최종적으로 챔버 외부로 배기되도록 하였다.

액체헬륨을 공급하기 전, 시험 비용의 저감을 위해 액체질소를 공급하여 예냉(pre-cooling)하는 방법을 검토하였으나, 예냉 과정으로 절약할 수 있는 액체헬륨의 양이 크지 않고, 예냉 과정을 적용할 경우 예냉 후 배관에 남아 있는 액체질소의 배기를 위한 퍼지(Purge) 등 추가 작업 필요성이 대두되어 실제 시스템에는 적용되지 않았다.

2.3 냉각 시스템의 구조

2.3.1 액체헬륨 Dewar

액체헬륨의 공급을 위해서, 대형 액체헬륨 액화기를 이용한 공급 방식과 상용 Dewar 를 이용한 공급 방식, 그리고 T.Takeda et al.의 연구결과(1)와 같은 헬륨분배와 G-M 냉동기를 이용하여 하루에 5.5 리터의 액체헬륨을 생산하는 특수 소형 액화기를 이용하는 방식 등이 적용될 수 있는데, 본 시스템의 경우 실제 평형상태에서 시간당 약 6 리터의 다량의 액체헬륨이 소모되나, 해당 시험시만



Fig. 2 LHe main dewar and refilling dewar

적용되는 단발성의 시스템이기 때문에, 적절한 용량의 Dewar 를 이용한 액체헬륨 공급 방식이 가장 적합한 것으로 판단되어 최종 적용되었다.

사용된 Dewar(Fig. 2)는 CryoFab CSMH 500 모델로써 500 리터의 액체헬륨보관 용량 및 0.7%의 자연증발 소모율을 갖는다.

Dewar 의 상단 플랜지(외경 75 mm)에는 Fig. 3 과같이 transfer line, 레벨센서, 히터, 압력센서, 자동단속밸브를 설치한 전용 어댑터를 장착하였고, 액체헬륨 공급 유량의 조절은 Dewar 내에 설치된 히터로의 전원 공급 주기와 Dewar 외부로 연결된 자동단속밸브의 개폐 주기를 변화시키며 Dewar 내부의 압력을 일정하게 유지시킴으로써 가능하게 하였다.

주 공급 Dewar 의 액체헬륨 소진시 사용되는 재충진 Dewar 는, 충전 모드에서 주 공급 Dewar 내부의 압력보다 약 20 mbar 에서 80 mbar 까지 높게 설정함으로써, 극저온패널을 40 K 이하로 유지시키며 재충진 Dewar 에서 주 공급 Dewar 로의 액체헬륨 이동이 가능하도록 하였다.

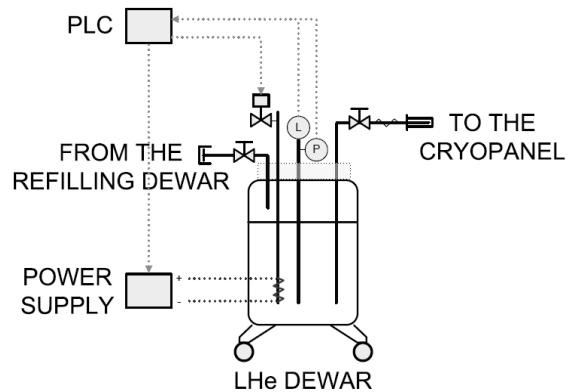


Fig. 3 Pressure control inside LHe dewar

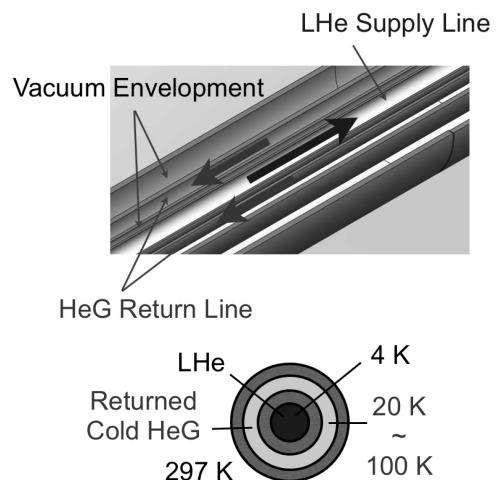


Fig. 4 Structure of quadruple vacuum jacketed pipe

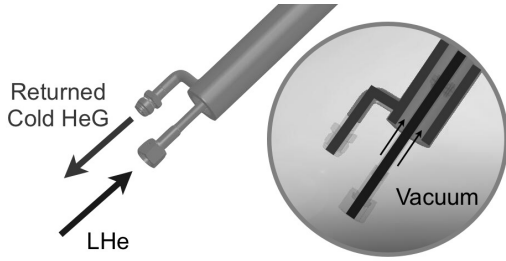


Fig. 5 Pipe design inside vacuum chamber

2.3.1 다중 진공 배관

액체헬륨의 공급라인에는 액체헬륨으로의 열유입을 최소화 하기 위해 다중 진공 배관이 적용되었다. 중심부의 액체헬륨라인과 그 외부의 진공층, 진공층을 감싸고 있는 저온 헬륨배기가스 층과 최외각의 진공층으로 구성되어 있다.

다중진공배관을 적용으로 다층박막단열재의 효율( $e_{MLI}$ )이 95%인 조건에서 배기되는 저온 헬륨가스의 온도가 100 K 인 경우, 내외부 배관의 온도 및 직경이 각각  $T_{in}$ ,  $T_{out}$ ,  $D_{in}$ ,  $D_{out}$  일 때, 식 (1)에 의하여 일반적인 이중진공배관의 경우보다 액체헬륨으로의 열유입을 1/70 이하로 줄일 수 있었다.

$$Q_{Pipe} = A_{equ} \times \sigma \times \frac{T_{out}^4 - T_{in}^4}{\frac{1}{e_{MLI} \times \epsilon_{in}} + \frac{1 - \epsilon_{out}}{\epsilon_{out}} \left(\frac{D_{in}}{D_{out}}\right)} \quad (1)$$

진공챔버 내부의 배관은 챔버 내부가 진공환경임을 이용하여 Fig. 5 와 같이 구성하여 챔버 외부의 다중배관과 동일한 성능을 가지도록 하였다. 챔버 외부의 배관과 챔버 내부의 배관, 챔버 내부의 배관과 극저온 패널 배관과의 연결은 VCR 피팅 연결 방식을 적용하였다.

3. 시스템의 검증

3.1 극저온패널의 설치

구리관에 은납을 이용해 구리튜브가 납땜된 극저온패널에는 Lakeshore 실리콘다이오드 센서(DT-670-SD)를 총 8 개 설치하여 온도 분포 및 변화를 확인할 수 있도록 하였고, 냉각시스템이 40 K 이하에서 20 W 이상의 냉각용량을 갖는지를 검증하기 위하여, 극저온패널의 양면에 다층박막단열재(MLI)를 덮고 극저온패널에 설치된 히터에 전원공급기를 통해 전원을 공급하였다.

3.2 극저온 시험 수행

극저온패널에 대한 극저온 시험은 한국항공우주

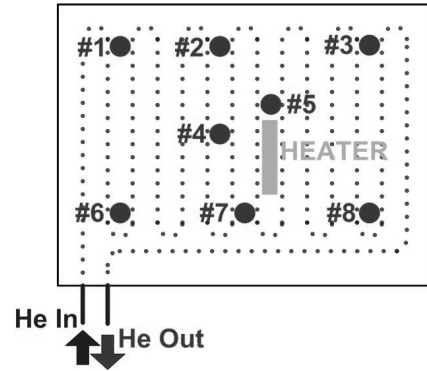


Fig. 6 Temperature sensors and heater on cryopanel

연구원에서 보유한 유효직경 8 미터, 유효 깊이 10 미터의 대형열진공챔버(LTVC, KARI TVC-5)에서 수행되었다. 우선 진공챔버에 설치된 진공펌프를 가동하여 챔버 내부의 압력을  $10^{-5}$  mbar 이하로 낮춘 후, 주 공급 Dewar 에서 액체헬륨을 공급하면서 극저온 시험을 시작하였다. 초기에 공급되는 액체헬륨은 모두 배관 및 극저온패널을 냉각시키는데 사용되어 기화된 헬륨가스만이 공급되며, 이는 배관내부에 존재할 수 있는 수분을 제거하는 역할을 수행한다.

본 시험을 통하여 40 K 이하로 냉각시 소요되는 시간과 헬륨 소모량, 최저 도달 온도, 극저온패널의 40 K 이하에서의 온도 유지 성능 및 헬륨 소모량, 재충진 Dewar 에서 주 공급 Dewar 에 헬륨 충전시 극저온패널의 온도 유지 성능을 확인하였다.

3.3 시험 결과

Dewar 를 이용한 액체헬륨 공급을 통해 약 800 mm×700 mm×7 mm(두께)의 극저온패널에 대한 냉각 시험을 수행한 결과, Fig. 7 과 같이 약 3 시간 만에 상온에서 40 K 이하(합성표준불확도  $u_c=194$  mK)의 온도에 도달할 수 있었으며, 최저 4.2 K ( $u_c=32$  mK)의 온도까지 냉각될 수 있음을 확인하였다. 냉각 후 20 W 의 열을 극저온패널에 부과하며 40 K 이하( $u_c=194$  mK)의 온도를 유지시킬 경우, 총 8 곳의 온도가 모두 1 K 이내의 균일도를 가짐을 확인하였다.(Fig. 8) 상온에서 40 K( $u_c=194$  mK)까지 냉각시 실제 소요된 액체헬륨은 약 70 리터이며, 20 W 조건에서 40 K 이하( $u_c=194$  mK)로 온도 유지시 소모되는 액체헬륨량은 시간당 약 6 리터로 확인되었다.

재충진 Dewar 를 주 공급 Dewar 에 연결하여 액체헬륨을 충전하는 경우, 충전에 따른 주 공급

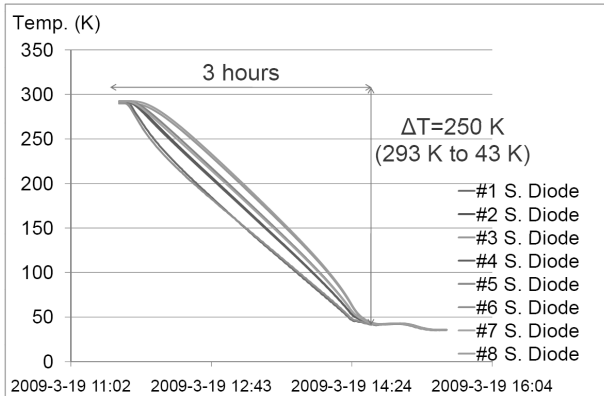


Fig. 7 Cooling down of cryopanel with LHe supply

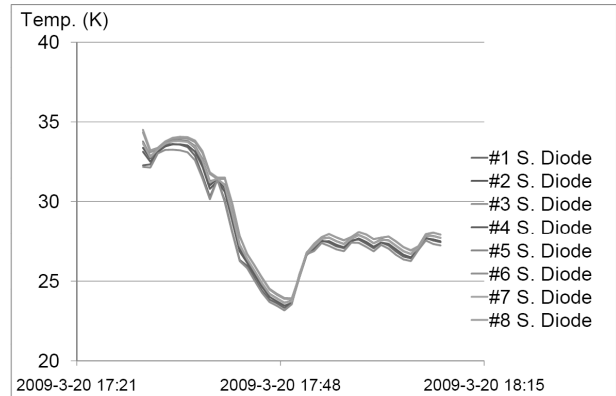


Fig. 9 Temperature fluctuation during LHe refill

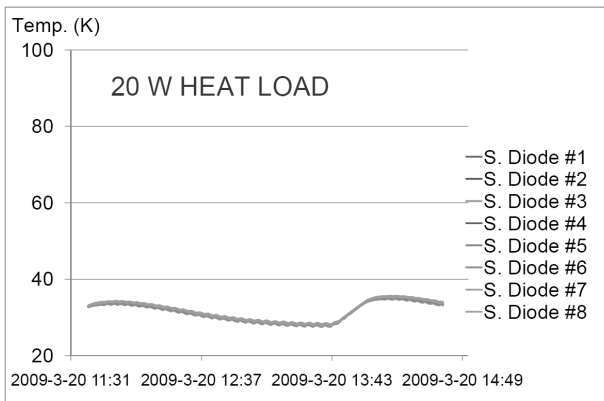


Fig. 8 Temperature control with 20 W heat load

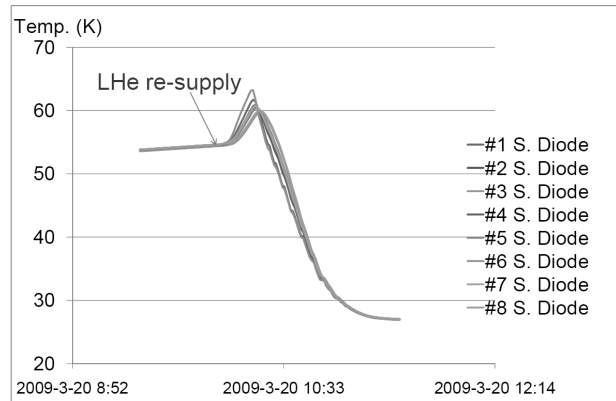


Fig. 10 Temperature fluctuation during LHe refill

Dewar 내부의 압력 변화로 인하여 극저온패널 표면에서 10 K 정도의 온도 변동이 있었으나, 모두 40 K 이하( $u_c=194$  mK)의 온도 유지조건을 만족하였다.(Fig. 9)

극저온패널로의 액체헬륨 공급이 중단되었다가 일정 기간 후에 다시 공급이 재개될 경우, 온도가 높아진 배관 내부를 지나 기화된 헬륨가스와 잔류하고 있던 상대적으로 높은 온도의 가스가 섞여 공급됨으로써 극저온패널의 온도가 상승했다가 다시 냉각되는 현상을 확인할 수 있었다.(Fig. 10)

#### 3.4 결과의 분석

공급된 액체헬륨이 모두 극저온패널의 냉각에 사용되며 최종 상온으로 배기되는 이상적인 경우에 필요한 액체헬륨량은 계산 결과 약 19 리터인 반면, 실제 액체헬륨의 사용량은 70 리터로써 약 27%의 시스템 효율을 갖는다. 이는 극저온패널 이외의 배관 및 장치에서의 열유입과 Dewar 압력 조절시 밸브를 통해 배기되는 헬륨가스, 극저온

패널의 온도가 낮아지면서 배기되는 헬륨가스의 온도도 같이 낮아지는 것에 기인한다.

단위부피의 액체헬륨이 기화되어 40 K 까지 온도가 상승되는데 필요한 에너지는 식 (2)과 같이 계산되며, 40 K 이하로 극저온패널의 온도를 유지하며 20 W의 열을 소산시키기 위한 시간당 액체헬륨 소모량 식 (3)에 의해 약 3 리터임을 알 수 있다. 실제 소모된 시간당 액체헬륨량인 약 6 리터를 고려하면, 극저온패널 냉각 결과에만 한정하여 평가한 본 시스템의 전체 효율은 50%임을 확인할 수 있다.

$$Q_{LHe} = \rho_{LHe} \times (h_{fg,LHe} + C_{p,HeG} \times (40K - 4.2K)) \quad (2)$$

$$FL_{LHe} = 20W / Q_{LHe} \quad (3)$$

#### 4. 결론

한국항공우주연구원에서는 액체헬륨 Dewar 두

대를 이용하여 약  $800\text{ mm} \times 700\text{ mm} \times 7\text{ mm}$ (두께)의 극저온패널을 40 K 이하( $u_c=194\text{ mK}$ )에서 1 K 이하의 온도 균일도를 갖도록 하는 냉각용량 20 W 이상의 극저온 냉각 시스템을 개발하여 그 성능을 검증하였으며, 향후 대형인공위성의 극저온 환경시험에 적용하여, 우주에서 사용되는 극저온 탑재체에 대한 검증을 수행할 계획이다.

#### 참고문헌

- (1) Tsunehiro Takeda, Masayoshi Okamoto, Kazuhiro Atsuda, Akihiro Kobayashi, Takashi Owaki, and Keishi Katagiri, 2008, "An Efficient Helium Circulation System with Small GM Cryocoolers," *Cryogenics*, Vol. 48, pp. 6~11.
- (2) Randall F. Barron, 1985, *Cryogenic Systems*, Second Edition, Oxford University Press, New York, pp. 474~484.