

## 技術論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2012.40.3.237>

## 미소진동저감용 진동절연기의 성능유지를 위한 극저온 냉각용 압축기 조립체 열제어 설계

오현웅\*, 이경주\*, 정석용\*, 신소민\*

### Thermal Design of Cryogenic Compressor with Strategies for Keeping Performance of Micro-vibration Isolation System

Hyun-Ung Oh\*, Kyung-Joo Lee\*, Suk-Yong Jeong\* and Somin Shin\*

#### ABSTRACT

Spaceborne pulse tube-type cryogenic compressors are widely used for space applications. To guarantee cooling performance of the compressor, mission life time and micro-vibration stability, suitable thermal control of compressor is required. Micro-vibration of the compressor is the one of the sources to degrade the pointing performance of observation satellite. In the present work, on-orbit thermal design of compressor in order not to degrade the performance of micro-vibration isolation system keeping the thermal control performance has been proposed and investigated through thermo-mechanical analysis.

#### 초 록

극저온이 요구되는 우주용 탑재장비의 냉각을 위해 일반적으로 Pulse Tube-type 압축기가 적용되고 있으며, 궤도상에서 압축기의 냉각성능, 임무수명 및 비대칭 온도분포에 의한 미소진동발생 방지를 위해 압축기를 허용온도 범위로 유지하는 열제어가 필요하다. 압축기는 궤도 운용 시 미소진동을 발생하여 관측성능이 요구되는 탑재체의 지향성능을 저하시키는 원인으로 작용한다. 본 논문에서는 압축기의 미소진동 방지를 목적으로 적용된 진동절연기의 성능유지 및 압축기의 허용온도범위 유지를 위한 열제어 성능을 동시에 만족하는 우주용 압축기 조립체의 열설계를 제안하였으며, 설계의 유효성을 해석적으로 입증하였다.

**Key Words** : Compressor(압축기), Micro-vibration(미소진동), Vibration Isolator(진동절연기), Thermal Control(열제어)

#### 1. 서 론

극저온 구현이 필요한 주요 임무 탑재장비 냉각용 Pulse Tube-type 압축기는 저비용, 메커니

† 2011년 11월 15일 접수 ~ 2012년 2월 14일 심사완료

\* 정회원, 국방과학연구소 영상정보체계개발단

교신저자, E-mail : ohlee314kr@yahoo.co.kr

대전시 유성구 유성우체국 35-5호

즘의 단순성 그리고 고신뢰도 등의 장점을 갖는다[1-3]. 또한 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 Stirling-type 압축기와는 달리 Pulse Tube-type 압축기는 기구적 구동부가 없기 때문에 냉각을 위한 구동 시 저진동 구현이 가능하여 관측지향성능이 요구되는 위성에서 널리 적용되고 있다[3].

압축기를 허용온도 범위에서 유지하기 위한

열제어는 압축기의 냉각성능을 비롯해 신뢰도 및 임무수명을 위해 중요한 기술분야이다. 압축기 자체의 온도분포를 최소화하는 적절한 열제어는 비대칭 온도분포로부터 발생할 수 있는 미소진동 증가 원인을 최소화 할 수 있다. 압축기가 발생하는 미소진동은 위성체 주요 구조물의 주파수와 의 커플링으로 인해 관측 지향성능을 저하시키는 원인으로 작용하며, 고해상도 임무요구조건 충족을 위해 압축기에 진동절연기를 장착하여 미소진동이 주요 탑재장비로 전달되지 않도록 하는 방법이 적용되고 있다. 압축기의 허용온도 범위 유지를 위한 열제어 설계를 위해서는 열제어 성능을 비롯해 압축기의 미소진동 감쇠를 위해 적용된 진동절연기의 성능을 유지할 수 있는 설계가 필요하다.

본 논문에서 제안한 압축기의 열제어는 극저온 냉각 시 발생하는 압축기의 열수송을 위한 히트파이프, 히트파이프에 의해 수송된 열을 심해 우주로 방열하기 위한 라디에이터, 그리고 압축기 비작동 시 온도하강을 방지하여 저온의 허용온도범위 유지가 가능한 히터로 구성된다. 압축기의 진동절연을 위해 발사환경에서는 고강성으로 발사환경에서의 구조건전성 확보가 가능하고, 궤도환경에서는 저강성으로 압축기의 미소진동이 주요 탑재장비에 전달되지 않도록 하는 비선형 특성의 수동형 진동절연기를 적용하였다. 히트파이프 설계 시에는 열제어 측면 이외에도 궤도환경에서 진동절연기의 성능을 유지할 수 있는 히트파이프 형상설계를 제안하였으며, 히트파이프 손상상시에도 압축기의 비대칭 온도분포에 의한 미소진동 증가를 최소화하는 히트파이프 배치 설계를 제안하였다. 또한 라디에이터 설계에 있어서는 열제어 성능유지와 함께 무게 최소화가 가능한 최적화 설계를 제안하였으며, 압축기 진동절연기의 성능 유지가 가능한 우주용 압축기 열설계의 타당성을 궤도 열해석을 통해 입증하였다.

## II. 본 론

### 2.1 압축기 조립체 형상

Figure 2는 주요 임무장비의 극저온 냉각을 위한 Pulse Tube-type 압축기의 형상을 나타낸다. 압축기 조립체는 압축기의 구조적 지지를 위한 하우징, 냉각용 헬륨가스가 통과하는 transfer line 그리고 발사와 궤도환경에서 비선형 특성을 갖는 압축기 미소진동 절연용 진동절연기로 구성된다. 압축기의 발생 열을 라디에이터까지 전송

하기 위한 히트파이프가 장착되는 열접속부는 압축기 상단에 위치하며, 압축기와 하우징 사이의 열저항값은 0.034K/W이다.

압축기 조립체의 무게는 5.5kg (압축기: 3.9kg, 진동절연기 조립체: 1.6kg) 이며, 압축기 구동시 EoL (End of Life)에서의 발열량은 35W로 비상시의 비작동 모드를 제외하고는 상시 발열을 한다. 압축기의 작동과 비작동 시의 허용온도 범위는 각각  $-15^{\circ}\text{C}/45^{\circ}\text{C}$ ,  $-30^{\circ}\text{C}/65^{\circ}\text{C}$ 이며, 압축기의 냉각성능과 임무수명기간 동안의 신뢰도 만족을 위해 압축기는  $35^{\circ}\text{C}$  이하로 유지되어야 한다.

미소진동저감용 진동절연기의 성능유지를 위한 설계 목표치를 Table 1에 요약하였다.

Table 1. Summary for Design Target

Items	Target Values
Target temperature for thermal control	$\leq 35^{\circ}\text{C}$
Temperature gradient on the compressor when 1 heat pipe is failed	$\leq 3^{\circ}\text{C}$
Thermal deformation of heat pipe	$\leq 0.5\text{mm}$

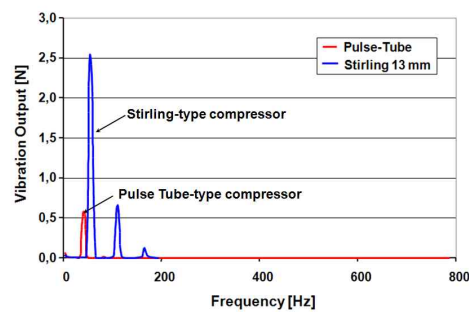


Fig. 1. Vibration Output of Pulse Tube and Stirling Type Compressor[3]

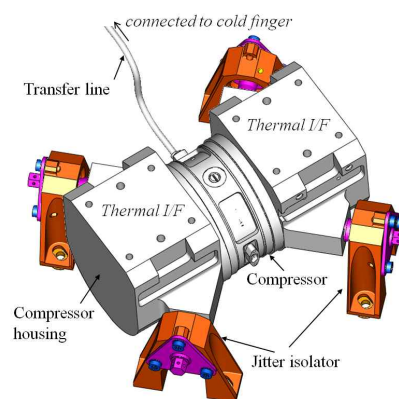


Fig. 2. Configuration of Pulse Tube-type Compressor Assembly

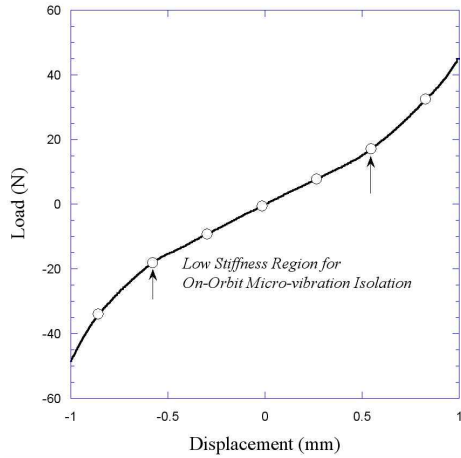


Fig. 3. Characteristic of Non-linear Compressor Micro-vibration Isolator (Displacement-Load)

### 2.2 압축기 미소진동 저감용 진동절연기

압축기가 발생하는 미소진동 감쇠를 위해 변위에 따라 강성특성을 달리하는 수동형 비선형 진동절연기를 적용하였으며 진동절연기는 발사환경에서 압축기의 모멘트 발생에 따른 transfer line의 손상을 방지하기 위하여 압축기의 동일 중심면상에 4개의 진동절연기를 배치하고 있다. Fig. 3은 진동절연기가 결합된 압축기 조립체의 정하중 시험결과를 나타낸다. 진동절연기는 변위가 작은 영역에서는 28N/mm의 저강성 특성을 나타내며, 변위가 큰 영역에서는 95N/mm의 고강성의 비선형 특성을 갖고 있음을 알 수 있다. 상대적으로 변위가 큰 발사환경에서는 고강성 및 고감쇠의 진동절연기 특성을 이용해 압축기의 구조 건전성을 확보하고, 외력이 작용하지 않고 비교적 변위가 작은 영역에서 운용되는 궤도 환경에서는 진동절연기의 저강성 특성을 이용하여 미소진동 전달력 감쇠가 가능하다. 상기의 발사 및 궤도환경에서 비선형 특성을 갖는 진동절연기를 적용함에 따라 발사시 별도의 구속/분리장치 없이도 구조건전성 확보가 가능한 장점을 갖는다.

### 2.3 압축기 조립체 열제어계 구성

Figure 4는 압축기 조립체의 열제어계 구성을 나타내며, 열제어계는 궤도상에서 압축기 허용온도 범위를 만족함과 동시에 압축기 성능유지를 위해 도출된 35°C 이하 온도제어를 목적으로 한다. 구조적으로는 압축기의 비대칭 온도분포로 인해 발생할 수 있는 미소진동증가 방지 및 미소진동저감을 위한 진동절연기의 성능 유지관점에서

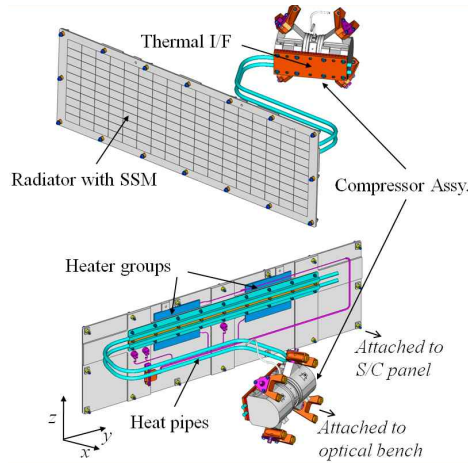


Fig. 4. Thermal Design Configuration of Compressor Assembly

서 설계되었다.

압축기 조립체 열제어계는 압축기가 발생하는 열을 수송하기 위한 히트파이프, 히트파이프에 의해 수송된 열을 심해우주로 방열하기 위한 라디에이터 ( $\alpha=0.24, \epsilon=0.8$  at EoL) 그리고 압축기 온도하강시 저온의 허용온도 범위 유지를 위한 히터로 구성된다. 타 장비와의 열적 단열을 위해 방열원인 압축기와 라디에이터 후면부는 다층박막단열재(MLI)가 장착되며, 히터는 압축기 공간상의 제약으로 라디에이터 후면부에 위치한다. 히트파이프는 지상에서의 열성능 시험검증을 위해 지면과 평행하게 배치 되었으며, 조립공차 완화 및 진동절연기 성능유지를 위해 유연성이 부가된 벤딩 히트파이프를 적용하였다.

### 2.4 압축기 열제어계 구조/열 설계

#### 2.4.1 히트파이프

히트파이프는 열제어 측면을 비롯해 진동절연기의 성능유지 및 압축기의 온도균일도 유지를 고려한 구조적 측면에서 설계되었다.

Figure 5는 진동절연기와 열제어용 히트파이프를 갖는 압축기 조립체의 1자유도 모델을 나타낸다.  $k_{HP}$ 는 히트파이프의 강성,  $k_{TL}$ 은 transfer line의 강성,  $k_V$ 는 궤도상에서의 진동절연기의 저강성 그리고  $m$ 은 압축기의 질량을 나타낸다. 압축기의 궤도 운용중 발생하는 미소진동은  $k_{HP}$ ,  $k_{TL}$  그리고  $k_V$ 를 통해 주구조체에 전달되며, 주 전달력은 Fig. 3에서 보여주는 바와 같은 진동절연기의 저강성  $k_V$ 에 의해 감소된다. 열 수송능력

이 높은 히트파이프는 비교적 직경이 큰 히트파이프로 이를 적용할 경우, 열제어적 관점에서는 유리할 수 있으나 히트파이프의 강성  $k_{HP}$ 가 진동절연기의 성능을 제한하는 요소로 작용한다. 또한 히트파이프를 통한 미소진동 전달력의 증가 원인으로도 작용한다. 따라서 진동절연기의 성능을 유지함과 동시에 히트파이프를 통한 미소진동 전달력을 최소화하고 열수송 능력을 최대화 하기 위하여 Table 2의 특성을 갖는 9mm 히트파이프를 적용하였다. 히트파이프에 유연성 부가를 위해 최대한 벤딩이 부가된 저장성의 히트파이프를 구현하였다.

상기의 목적으로 제작된 벤딩 히트파이프는 유연성으로 인해 조립시 조립공차 완화가 가능하다. 그리고 궤도상에서 히트파이프 열변형에 의해 발생하는 전달력 최소화로  $\pm 0.5\text{mm}$ 의 진동절연기의 저장성 영역을 유지 할 수 있는 장점을 갖는다. Fig. 6은 히트파이프의 궤도상에서의 열탄성 해석결과로 열해석으로부터 도출된 worst 경계온도 조건을 고려한 경우, 최대변위는  $0.097\text{mm}$ (Lateral)로 히트파이프의 열변형 시에도 진동절연기의 저장성 영역 유지가 가능함을 알 수 있다.

압축기의 비대칭 온도분포는 미소진동을 증가시키는 원인으로 작용하며, 하나의 히트파이프 손상시에도 비대칭 온도분포가 최소화 가능하도록 히트파이프는 배치되어야한다. Fig. 7은 본 논문에서 제안한 히트파이프 장착 시 압축기의 온도분포를 나타낸다. Fig. 7(a)는 두 개의 히트파이프 정상작동시, Fig. 7(b)는 하나의 히트파이프 손상시 각각의 압축기 온도분포를 나타낸다. 압축기가 35W 발열시 히트파이프의 응축부 경계온도를  $25^{\circ}\text{C}$  적용하여 해석을 수행하였다. 본 논문에서 제안한 히트파이프 장착방법은 히트파이프 손상 시에도 압축기의 균일한 온도분포 구현이 가능함을 알 수 있다. Fig. 8은 압축기의 길이 방향이 Fig. 4에서의 z축과 일치할 경우의 해석 결과를 나타낸다. 즉 압축기의 좌측과 우측의 열접속부가 각각 하나의 히트파이프로 제어될 경우를 나타낸다. Fig. 8(a)에서 보는바와 같이, 히트파이프가 정상작동을 할 때는 Fig. 7(a)와 같이 균일한 온도분포를 나타내나 Fig. 8(b)의 하나의 히트파이프가 손상 시에는 압축기의 좌측과 우측간에 약  $4^{\circ}\text{C}$  온도차가 발생함을 알 수 있다. 상기의 해석결과로부터 본 논문에서 제안한 히트파이프 장착방법은 온도구배 최소화에 의한 미소진동 안정화 관점에서 유효함을 알 수 있다.

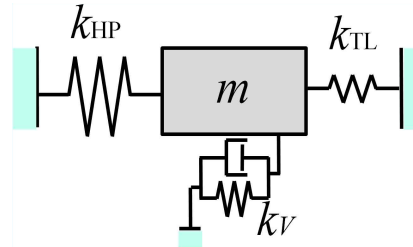


Fig. 5. Schematics of Compressor Assembly with Isolator, Transfer Line and Heat Pipe

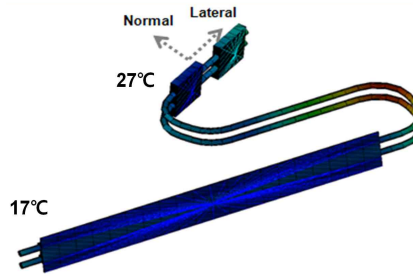


Fig. 6. Thermo-elastic Analysis Result

#### 2.4.2 라디에이터

히트파이프 플랜지가 장착되는 라디에이터 열접속부는 설치 공간 제약상의 이유로 Fig. 4에서 보는바와 같이 라디에이터의 중심으로부터 z 방향으로 이격된 곳에 위치한다. 히트파이프 플랜지가 이와 같이 라디에이터 중심으로부터 이격된 위치에 배치된 경우, 라디에이터 상의 온도구배로 열제어 성능 저하 원인으로 작용한다. 열제어 성능 저하 최소화 및 무게 최적화를 위하여 rib 구조를 적용하였으며 Fig. 9에 최적화된 라디에이터 형상을 나타낸다.

Figure 10은 히트파이프 플랜지가 라디에이터 중심에 위치한 경우, 이격된 위치에 존재하는 경우, 그리고 최적화된 라디에이터 적용시 압축기의 온도와 라디에이터의 무게를 나타낸다. 라디에이터 두께를 증가시킴에 따라 압축기의 온도제어는 유효하나 라디에이터의 무게 증가를 유발하고, 히트파이프 플랜지가 중심부에 위치한 경우는 이격된 위치에 존재하는 경우에 비해 효율적인 온도제어가 가능함을 알 수 있다. Fig. 9와 같이 rib를 적용한 경우, 히트파이프 플랜지가 중심으로부터 이격된 위치에 존재함에도 불구하고 무게 측면에서 그리고 온도 제어측면에서도 유효함을 알 수 있다.

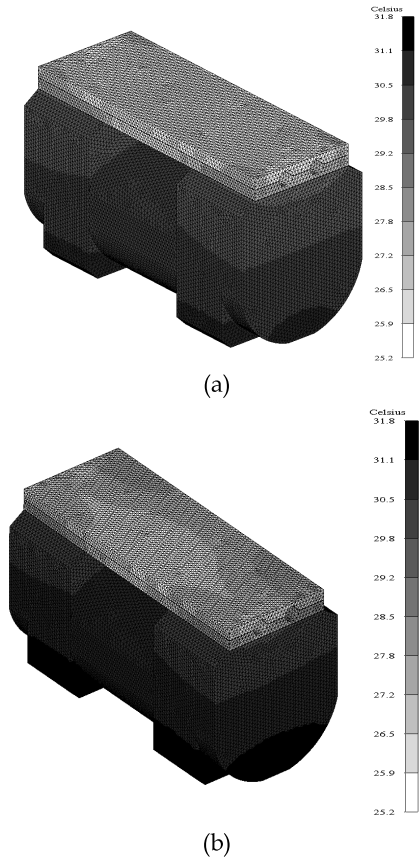


Fig. 7. Temperature Distribution on the Compressor, Horizontal Configuration ((a): without failure, (b): with failure)

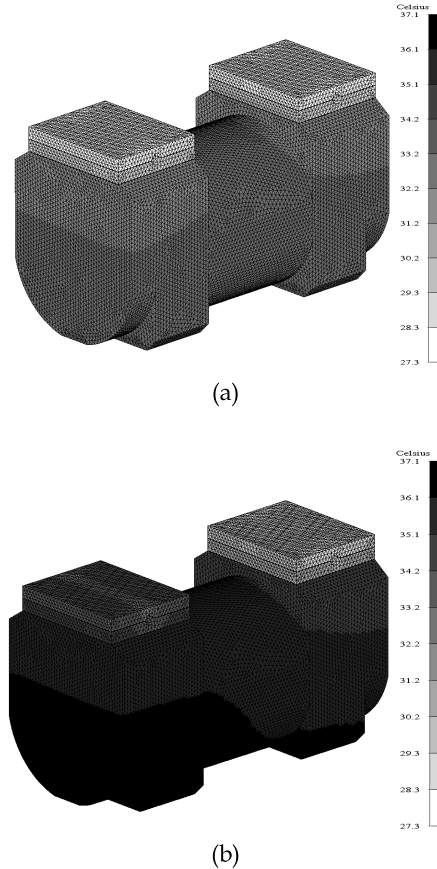


Fig. 8. Temperature Distribution on the Compressor, Vertical Configuration ((a): without failure, (b): with failure)

### 2.4.3 궤도 열해석

Figure 11은 열설계 타당성 검증을 위해 worst Hot과 Cold 조건에서의 궤도 열해석 결과로 압축기와 라디에이터의 온도프로파일을 나타낸다. 해석에 적용된 열물성치는 열모델 검증을 위한 열평형 시험[4]으로부터 도출된 물성치를 적용하였으며, 열해석시 압축기의 온도마진은 35°C 이하 요구조건에 대하여 4°C를 고려하였다. 그리고 압축기의 열해석을 위해 궤도 열해석 상용 S/W를 이용하였으며, GMM(Geometric Mathematical Model)은 Thermal Desktop [5]으로 구축하였고, 궤도 열해석에는 SINDA/ FLUENT와 RADCAD [6]를 적용하였다. 열해석 결과로부터 본 논문에서 제안한 압축기 열설계는 압축기 냉각성능, 임무수명 및 신뢰도 유지를 위한 목표 허용온도(35°C 이하) 유지를 위해 타당함을 나타낸다. 저온에서의 압축기의 온도는 저온허용온도에 대하여 약 12°C의 마진이 있으므로 정상운용모드에서의 히터설계는 적용하지 않았다.

Table 2. 9mm Heat Pipe Specification

Specification	9mm heat pipe
Type	Fixed conductance axial groove
Working fluid	NH <sub>3</sub> (99.99%)
No. of grooves	20
Outer diameter	9 mm
Inner diameter	6.70 mm
Conductivity	2.58 W/m-k
Operating Temp.	-20°C/55°C

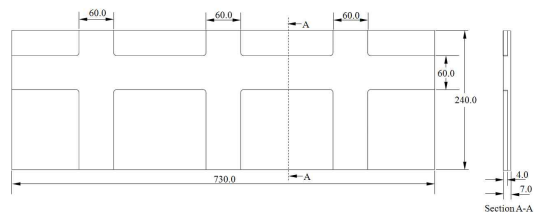


Fig. 9. Configuration of the Optimized Radiator(unit: mm)



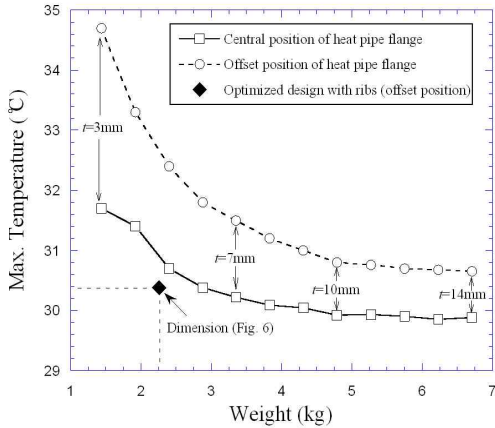


Fig. 10. Maximum Compressor Temperature and Weight for Various Design of the Radiators

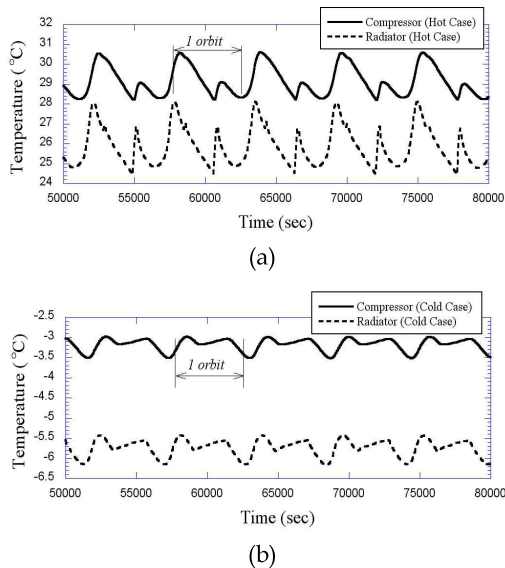


Fig. 11. On-Orbit Thermal Analysis Results for Compressor Assembly ((a)Hot Case, (b)Cold Case)

### III. 결 론

우주용 압축기의 미소진동저감을 위해 장착된 진동절연기의 성능유지와 압축기의 냉각성능 및 임무수명 유지를 위해 필요한 온도요구조건 충족을 위한 열설계를 제안하였다. 본 논문에서 제안한 히트파이프 장착방법은 하나의 히트파이프가 손상되었을 경우에도 미소진동 증가의 원인중 하나인 압축기의 비대칭 온도분포 최소화 가능하며, 밴딩 형상을 갖는 히트파이프는 궤도상에서 히트파이프 열변형하에서도 진동절연기의 성능유지에 유효함을 알 수 있다. 또한 히트파이프 플랜지가 장착되는 라디에이터 열접속부가 중심으로부터 이격된 위치에 존재함으로 인한 열제어 성능저하 방지를 위해 rib을 이용한 최적화 설계를 제안하였으며 이는 열제어 성능 및 무게 최적화 측면에서 유효함을 입증하였다. 열제어 성능검증을 위해 실시된 궤도 열해석 결과를 통해 압축기 열제어계 설계의 타당함을 검증하였다.

### 참고문헌

- 1) Ross, R.: Cryocooler Reliability and Redundancy Considerations for Long-life Space Missions, Cryocoolers 11, Newyork: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2001.
- 2) Ross, R. and Johnson D.: NASA's Advanced Cryocooler Technology Development Program, *Advanced Cryogenic Engineering*, Vol. 51, 2006.
- 3) Radebaugh, R.: Pulse Tube Cryocoolers for Cooling Infrared Sensors, *Proceedings of the SPIE*, Vol. 4130, 2000.
- 4) Gilmore, David G.: Spacecraft thermal control handbook, Vol 1: Fundamental Technologies 2<sup>nd</sup> edition, Aerospace Corporation, 2002.
- 5) Thermal Desktop User's Guide, Ver. 5.0, Network Analysis Associates, Tempe, AZ, 2006.
- 6) SINDA/FLUINT User's Guide, Ver. 5.0, Network Analysis Associates, Tempe, AZ, 2006.