

# Veritrek 소프트웨어를 활용한 그라파이트시트 기반 극저온 냉각기 열 제어 시스템 최적설계

채봉건<sup>1,2</sup> · 김혜인<sup>1,2</sup> · 오현웅<sup>2,†</sup><sup>1</sup>(주)스텝랩<sup>2</sup>한국항공대학교 항공우주 및 기계시스템공학과

## Optimal Design of Graphite Sheet based Cryogenic Cooler Thermal Control System using Veritrek Software

Bong-Geon Chae<sup>1,2</sup>, Hye-In Kim<sup>1,2</sup> and Hyun-Ung Oh<sup>2,†</sup><sup>1</sup>STEPLab., Ltd.<sup>2</sup>School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University

### Abstract

During the initial thermal design process, determining the thermal effect of various design variables in a complex orbital thermal environment is time-consuming. To save time in the initial design phase, it is necessary to quickly derive optimal design parameters and predict the temperature. To address these challenges, Veritrek, a software specialized in optimal design using a reduced-order model (ROM), was released in 2018. In this paper, we utilized the Veritrek software to build a reduced-order model, conduct sensitivity analysis, and perform optimal design analysis for a graphite sheet-based cryogenic cooler thermal control system. The goal was to determine the optimal design values for the number of graphite sheet layers, radiator area, and thickness that would meet the allowable temperature of the cryogenic cooler.

### 초 록

초기 열설계 과정의 경우 복잡한 궤도 열 환경 조건에서 다양한 설계 변수에 따른 열적 영향성 판단을 해야 하므로, 열 설계/분석에 많은 시간이 소요된다. 따라서, 초기 설계 단계에서 시간을 효율적으로 단축시키기 위해서는 최적의 설계 변수 도출과 이에 따른 온도 예측이 신속히 이루어져야 한다. 상기 문제점에 기인하여 차수축소모형을 활용한 최적 설계 전문 소프트웨어인 Veritrek이 2018년에 출시되었다. 본 논문에서는 Veritrek 소프트웨어를 활용하여 그라파이트시트 기반 냉각기 열 제어 시스템에 대해 차수축소모형 구축과 민감도 분석, 최적 설계 분석을 수행하여 냉각기의 허용온도를 만족할 수 있는 그라파이트시트의 적층 수, 방열판 면적 및 두께에 대한 최적설계 수치를 도출하였다.

**Key Words** : Cryogenic Cooler(극저온 냉각기), Graphite Sheet(그라파이트시트), Optimal Design(최적설계) Reduced Order Model(차수축소모형), Thermal Analysis(열해석), Thermal Control System(열 제어 시스템)

## 1. 서 론

위성의 열 제어는 고 진공 및 극심한 온도 변화를 갖는 우주궤도 열환경 조건에서도 성공적인 임무를 수행할 수 있도록 하기 위해 탑재 구성품을 허용온도 이

내로 유지하도록 하는 열 설계 방안을 적용하는 것을 의미한다. 이러한 인공위성 열 제어 시스템에는 탑재 구성품의 허용온도를 유지하기 위해 다양한 열 제어 방식이 존재하며 크게 수동형 열 제어 기법과 능동형 열 제어 기법으로 나뉜다. 수동형 열 제어 기법은 물질의 고유 특성을 기반으로 제어하는 기법으로 전력을 소모하지 않고 제어가 가능하다. 이와 같은 열 제어 기법은 적용 방식이 단순하며, 신뢰성 측면에서 우수한 장점을 가지나 정밀한 온도제어에는 한계가 있다. 상기 열 제어 기법 예로는 표면처리, 방열판, 다층박막

Received: Oct. 10, 2023 Revised: Feb. 13, 2024 Accepted: Feb. 14, 2024

† Corresponding Author

Tel: +82-62-345-0611, E-mail: ohu129@kau.ac.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

단열재 (Multi-Layer Insulation, MLI), 써멀 스트랩, 히트파이프 등이 있다. 반면, 능동형 열 제어 기법은 수동적인 방식으로 제어에 한계가 있을 경우 외부 열 환경 변화에 전력을 소모하여 제어되는 기법으로 예로 히터, 루버, 루프 히트파이프 등이 있다. 이러한 능동형 열 제어 기법의 경우 정밀한 온도제어가 가능한 장점이 있지만 위성체의 전력을 소모하고, 무게증가 및 시스템 복잡성을 야기하여 중국에는 신뢰성을 확보하는데 어려움이 있는 단점이 존재한다. Figure 1은 앞서 설명한 수동형 열 제어 기법과 능동형 열 제어 기법의 적용 예시를 나타낸다[1, 2].

탑재 구성품의 온도 요구조건을 유지하기 위해 앞서 설명한 열 제어 기법을 토대로 열 설계를 수행하게 되는데 이러한 열 제어 기법의 경우 발사 이후부터는 설계 수정이나 교체가 불가능 하기 때문에 위성 개발 초기단계부터 여러 궤도 열 환경 조건에 대한 수치해석이 필수적으로 수행되어야 한다. 이러한 초기 열 해석의 경우 요구조건 만족하는 결과가 도출될 때까지 엔지니어의 경험과 직관에 많은 부분 의존하여 반복해석을 수행하는 것이 보편적이다.

위와 같이 반복 해석에 기반한 최적 열 설계 안 도출의 경우 적게는 수백번에서 많게는 수천번의 해석을 수행해야 하며, 시스템 수준에서의 비정상상태 궤도 열 해석의 경우 하나의 조건 당 해석 시간이 수십시간 까지 소요될 수 있다. 이렇듯 최적 설계와 민감도 분석에 대한 초기해석 소요 시간이 크므로 업무에 매우 비효율적임을 알 수 있다.

이러한 설계 한계점에 입각하여 최근 미국 Redwire Space社에서 최적 열설계 및 민감도 분석이 가능한 소프트웨어인 Veritrek을 개발하였다. 상기 소프트웨어는 열해석 소프트웨어인 Thermal Desktop & SINDA/FLUINT를 활용하여 차수축소모델(Reduced Order Model, ROM) 기반의 해석 소프트웨어로 NASA JPL 프로젝트 중 일환인 화성 탐사 로버 퍼시비어런스에 탑재된 화성 헬리콥터 인저뉴어티 초기설계에 활용되어 화성 열환경에서의 열적 최적 설계를 수행하였으며, 우주분야 민간 기업 SNC(Sierra Nevada Corporation)에서 개발 중인 Dream Chaser 개발에 열적 민감도해석 및 최적 설계에 활용되고 있다. 이외에도 다양한 우주관련 기업에서 적극 활용하는 등 상기 소프트웨어의 활용도가 점차 증가하고 있는 추세이다[3].

본 논문에서는 앞서 언급한 Veritrek 소프트웨어를 활용하여 그라파이트시트 기반 우주용 냉각기 열 제어 하드웨어에 대한 민감도 분석 및 최적설계를 수행하고 이를 통해 설계 유효성을 확인하고자 한다.

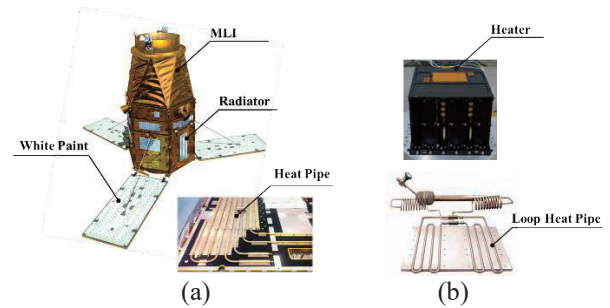


Fig. 1 Thermal control methodology of spacecraft  
(a) Passive control, (b) Active control [2]

## 2. 설계 개요 및 열해석 모델 구축

### 2.1 그라파이트시트 기반 우주용 냉각기 열 제어 시스템 설계 개요

종래에는 우주용 냉각기의 열원을 방열판으로 전달하기 위한 매개체로 히트파이프를 적용하여 열전달 경로를 확보하고 있다. 적용된 히트파이프의 강성 최소화를 위해 기계적 곡률 반경을 갖는 Bent-shaped 히트파이프를 적용하고 있으나, 초소형 위성과 같이 탑재 공간이 협소해질 경우, 굽힘을 충분히 부여하기에 한계가 있어 히트파이프 강성증가가 불가피하다. 이러한 강성증가는 중국에 냉각기의 미소진동 요구조건을 충족하기 위해 적용된 진동절연기 특성에 영향을 미치므로 히트파이프와 같은 열 제어 하드웨어의 강성 최소화가 요구된다. 이와 같이 히트파이프의 한계점을 보완하기 위해 적용 방식이 단순하고 열전달 성능이 우수하면서, 유연성, 저강성 특성을 갖는 그라파이트시트 기반의 열제어 시스템을 제안하였다[4]. 아울러, 그라파이트시트의 경우 히트파이프와 달리 별도의 작동 유체가 불필요하여 지상시험 시 역구배로 인한 성능저하의 위험성이 낮음에 따라 히트파이프 대비 냉각기의 배치가 용이한 장점이 있다. Figure 2는 본 논문에서 제안한 그라파이트시트 기반 우주용 냉각기 조립체 형상을 나타낸다. 냉각기 조립체는 냉각용 헬륨가스 공급을 위한 Transfer Line, 미소진동 절연을 위한 진동절연기, 냉각기에서 발생하는 열을 방열판까지 전달하기 위한 고 열전도 특성을 갖는 적층 된 그라파이트시트와 심우주로 열원을 방출하기 위한 방열판으로 구성된다. 그라파이트시트는 냉각기에서 발생하는 열원을 균일하게 방열시키기 위해 냉각기 상하부에 각각 적용하였다. 또한, 냉각기와 방열판 사이의 거리는 종래 널리 사용되던 Bent-shaped 히트파이프 적용이 어려운 최소 거리인 100 mm 로 설계하였다. Table 1은 그라파이트시트의 제원을 나타낸다[5].

본 논문에서는 냉각기의 열원을 심우주로 원활히 방

출하고 허용온도를 유지할 수 있는 최적의 방열판 크기와 그래파이트시트의 최적의 적층 수를 산출하고자 설계변수로 설정하였으며, 기본적으로 그래파이트시트의 적층 수에 따른 열전도도 산출방안은 식 (1)과 같다[6].

$$C_{GS} = \frac{1}{R_{GS}} = \left( \frac{k_{GS}}{l_{GS}} \right) N_{GS} \times \delta_{GS} \times W_{GS} \times \eta_S \times \eta_E \quad (1)$$

여기서,  $k_{GS}$ 는 그래파이트시트의 열전도도,  $l_{GS}$ 는 시트 길이,  $N_{GS}$ 는 시트 적층 수,  $\delta_{GS}$ 는 그래파이트시트 두께,  $W_{GS}$ 는 시트 폭,  $\eta_S$ 는 형상 효율 (0.8),  $\eta_E$ 는 중단 효율(0.8)을 의미한다.

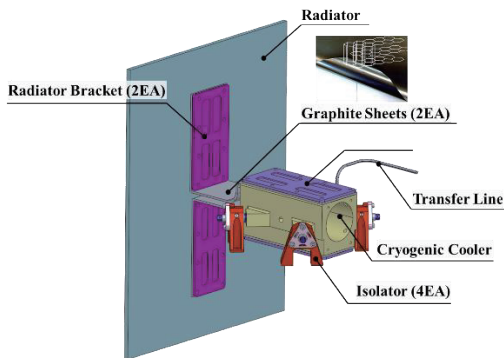



Fig. 2 Configuration of cryogenic cooler system based on graphite sheets

Table 1 Specification of graphite sheet [5]

Item	Specification
Configuration	
Thickness [ $\mu\text{m}$ ]	$25 \pm 3$
Thermal Conductivity [W/m/K]	$1,350 \pm 150$
Thermal Diffusion [ $\text{mm}^2/\text{sec}$ ]	$850 \pm 0.1$
Density [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	$2 \pm 0.1$
Specific Heat [J/g/K]	$0.8 \pm 0.1$

## 2.2 열해석 모델 및 해석조건 개요

앞서 설명한 바와 같이 해석 모델 구축 및 해석의 경우 열 해석 상용 소프트웨어를 활용했으며, 상기 소프트웨어는 크게 기하학적 열모델 (Geometrical Mathematical Model, GMM) 구축을 위한 Thermal

Desktop, 수치 열해석 모델 (Thermal Mathematical Model, TMM) 기반으로 복사 열전달 해석을 위한 RadCAD와 온도분포계산을 위한 SINDA/FLUINT로 구성된다. RadCAD와 SINDA/FLUINT에서 계산하는 수식은 식 (2) ~ (4)와 같으며, 각각 노드에 기반한 에너지 보존 방정식과 전도, 복사 방정식을 의미한다.

$$m_i c_p \frac{dT_i}{dt} = \dot{P}_{i,int} + \dot{P}_{i,ext} - \sum_{j=1}^n C_{ij}(T_i - T_j) - \sum_{j=1}^n R_{ij}\sigma(T_i^4 - T_j^4) \quad (2)$$

$$C_{ij} = \frac{kA}{L} \quad (3)$$

$$R_{ij} = \varepsilon_i F_{ij} A_i \quad (4)$$

여기서, 식 (2) 열에너지 보존 방정식으로 좌변항은 시간 당 노드  $i$ 에 저장할 수 있는 에너지를 나타내고,  $\dot{P}_{i,int}$ 는 시간 당 노드  $i$ 에서 발생하는 열에너지,  $\dot{P}_{i,ext}$ 는 시간 당 노드  $i$ 에 유입되는 외부열에너지, 세번째, 네 번째 항은 각각 노드  $i$ 에서 근접노드  $j$ 로 전도 및 복사로 방출되는 열에너지를 의미한다. 식 (3)은 열전도 열전도도 산출 수식으로 기하학적 형상에 따라 산출 수식이 상이하나 본 논문에서는 형상이 평면으로 단순하여 평면수식만 고려되었다. 여기서,  $k$ 는 열전도도,  $A$ 는 열전달경로 단면적,  $L$ 은 노드와 노드간 거리를 나타낸다. 식 (4)는 Stefan-Boltzmann 법칙의 수식으로  $\varepsilon_i$ 는 표면  $i$ 의 방사율,  $F_{ij}$ 는 노드  $i$ 와  $j$  사이의 형상계수,  $A_i$ 는 표면  $i$ 의 면적을 나타낸다[7, 8].

Figure 3은 그래파이트시트 기반 냉각기 시스템의 열해석 모델을 나타내며, 위성체 진행방향에 배치되었을 경우로 가정하여 구축하였다. 해당 열해석 모델은 냉각기, 방열판, 브라켓으로 구성된다. 그래파이트시트의 경우 설계 변수로 기하학적 형상이 아닌 노드와 노드간 열전도도 값을 고려하였고, 방열판과 냉각기가 장착되는 위성체 패널의 경우 경계온도조건으로 부여하였다. 냉각기의 경우 IR 센서의 초점면을 80K으로 냉각시키기 위해 궤도상에서 항시 35W의 발열하며, 열모델 상에서는 Heat Load로 구현하였다. 아울러, 냉각기의 허용온도범위는  $-15 \text{ }^\circ\text{C} \sim 45 \text{ }^\circ\text{C}$ 이며, 냉각성능, 임무수명 및 신뢰도 유지를 위해 목표 허용온도 범위를  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ 이하로 설정하였다[9].

상기 시스템과 위성체 내부간 복사열전달을 최소화하기 위해 방열판 내부 및 냉각기 시스템에는 MLI의 유효 광학 물성치를 적용하였으며, 방열판 외부는 심우주로 열을 방출하기위해 이차면경 (Second Surface Mirror, SSM)을 적용하였다. Table 2는 궤도해석에 적용된 광학 물성치 및 체적 물성치를 나타낸다. Figure 4은 최악의 조건을 고려한 궤도 조건 형상을 나타내며,

최악 저온조건인 경우 베타각이 0°로 위성 진행방향이 지속적으로 심우주를 지향하고 있는 상태이며, 최악 고온조건은 일시적이지만 방열판에 직접적으로 태양복사에너지를 받는 베타각 90°조건으로 가정했다. Table 3은 궤도해석 조건을 나타낸다.

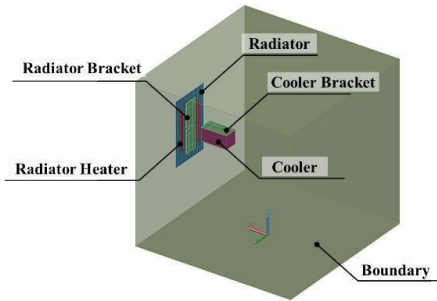
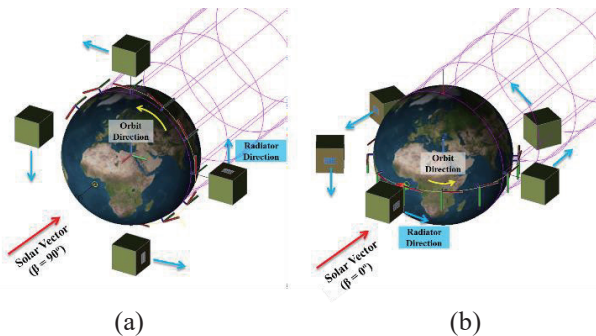


Fig. 3 Configuration of TMM



(a) Worst Cold Case, (b) Worst Hot Case

Fig. 4 Configuration of orbit profile

Table 2 Thermal properties for thermal analysis

Thermal Physical Properties			
Item	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Conductivity [W/mK]	Specific Heat [J/kgK]
Al-6061	2,700	171	920
Graphite Sheet	2,000	1,350	800
Thermal Optical Properties			
Item	Solar Absorptivity [α]	IR Emissivity [ε]	
SSM BOL	0.100	0.800	
SSM EOL	0.240	0.800	
MLI*	0.014	0.005	

\* Effective Value

Table 3 Information of orbit analysis parameters

Parameter	Orbit Condition	
	Worst Cold	Worst Hot
Altitude [km]	500	
Solar Flux [W/m <sup>2</sup> K]	1,287	1,420
Albedo	0.30	0.35
Earth IR Flux [W/m <sup>2</sup> K]	227	249

### 3. 차수축소모델 구축

#### 3.1 열 설계 변수 및 데이터 설정

본 논문에서는 냉각기의 목표 허용온도 범위(35 °C 이하)를 만족을 위해 식별된 핵심 열 설계 변수는 방열판 가로길이, 세로길이, 두께, 그라파이트시트 열전도도 및 히터전력 총 5가지로 식별하였다.

먼저 방열판의 면적과 두께의 경우 방열판의 무게와 직접적인 연관이 있기에 중요한 설계 요소이다. 방열판 가로, 세로길이는 그라파이트시트 장착면을 고려하여 가로 250mm ~ 500mm, 세로 400mm ~ 700mm, 두께는 4 ~ 7mm로 고려하였다. 그라파이트시트 열전도도는 열 수송성능의 척도로 식 (1)을 기반으로 산출되며, 그라파이트시트 적층 수를 최대 두께 5mm를 한계치로 설정하여 최소 30 층에서 최대 200 층에 대한 열전도도를 산출하여 적용하였다. Figure 5는 적층수에 따른 열전도도 값에 대한 그래프를 나타낸다. 아울러, 최악 저온 조건에서도 냉각기의 허용온도를 유지하기 위한 히터 전력의 범위를 10W ~ 50W 로 설정하였으며, On/Off 온도를 -13 °C/-10 °C로 설정하였다. Table 4에 해당 열 설계 변수에 대해 상세히 정리하였다.

Veritrek의 차수축소모델은 통계적 샘플링을 기반으로 구축되며, Thermal Desktop해석 모델에 맞는 데이터를 피팅하는 방식으로 구축된다. 상기 구축방식은 일련의 학습데이터를 통한 고충실도 시뮬레이션을 활용하여 차수축소모델을 구축한다는 점에서 노드기반 차수축소모델 구축방식과는 차이가 있다. 차수축소모델의 샘플링 방식은 변수 공간을 효율적으로 분석하는 라틴하이퍼큐브 추출(Latin Hypercube Sampling, LHS) 기법을 적용하고 있다. LHS 방식은 일정 범위 내에서 무작위로 추출하는 몬테 카를로 방식(Monte-Carlo Method)과는 다르게 일정 구획을 분할하여 서로 중복되지 않도록 선택함으로써 정확도를 향상시킨 방식이다. 아울러, 회기 분석의 경우 비모수적(Non-parametric) 확률 회기방식으로, 데이터 사이의 상관관계를 활용하여 연속적인 함수를 근사화 하는데 사용되는 랜덤 프로세스의 한 종류인 가우시안 프로세스(Gaussian Process, GP) 회기 방식을 적용하고 있다 [10].

본 논문에서는 차수축소모델 구축을 위해 4가지의 설계 변수에 대해 180개 해석 조합을 추출하였으며, 학습 데이터로 160개, 검증용 데이터로 20개로 구성하였다.

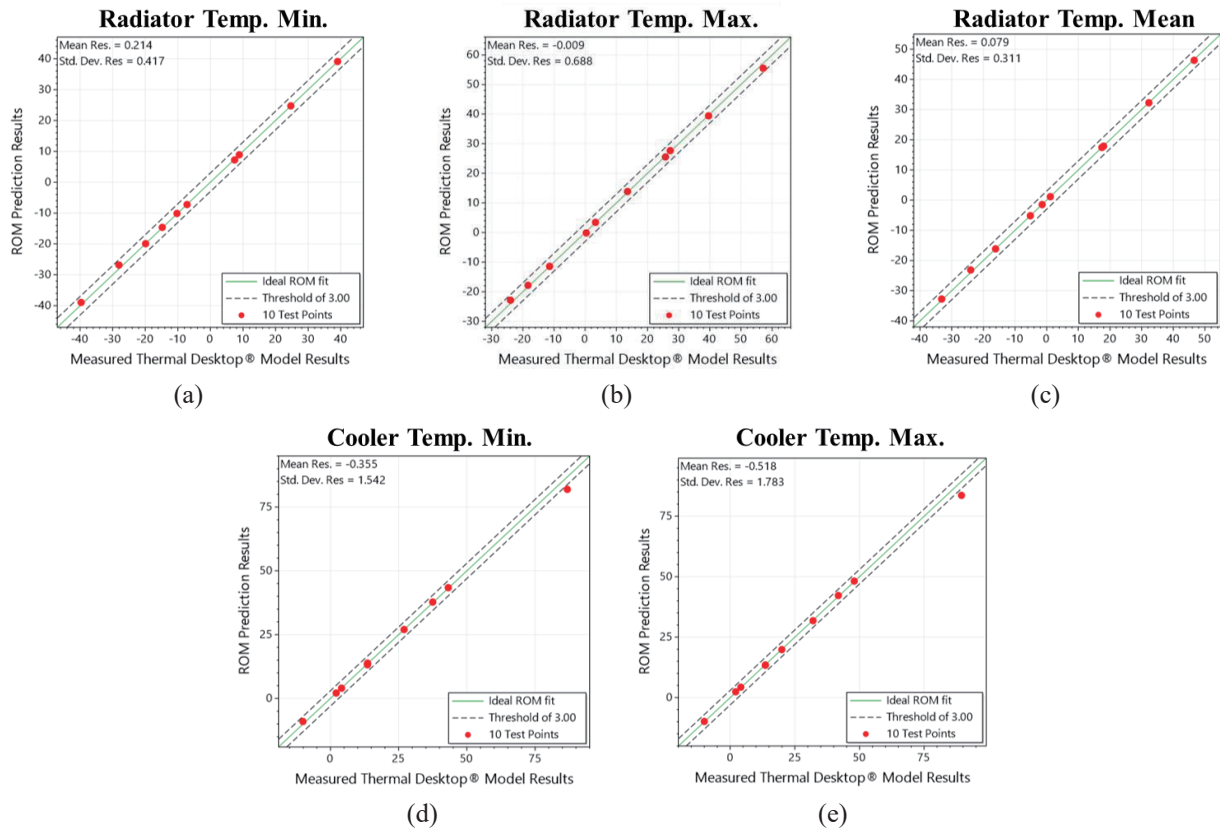


Fig. 5 Validation results of ROM output data ((a)Radiator minimum. temperature, (b)Radiator maximum temperature, (c)Radiator mean temperature, (d)Cooler minimum temperature, (e)Cooler maximum temperature)

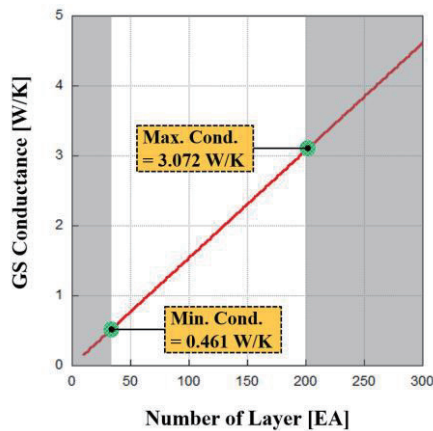


Fig. 6 Cond. by number of graphite sheet layer

Table 4 Thermal design input parameters

Input Parameters	Value	
	Min.	Max.
Radiator Width [mm]	250	500
Radiator Length [mm]	400	700
Radiator Thickness [mm]	4	7
Graphite Sheet Conductance [W/K]	0.461	3.072

### 3.2 차수축소모델 구축 결과

차수축소모델 예측 결과와 Thermal Desktop모델에 대한 테스트 해석 결과를 비교하여 차수축소모델을 검증하게 되며, Veritrek의 Creation 툴을 이용하여 수행하게 된다. 검증은 사용자가 정의한 해석 횟수를 기반으로 구축된 차수축소모델을 사용하여 각 실행에 대한 출력을 예측하게 되고, 각 출력 응답에 대해 비교 그래프가 생성된다. 본 논문에서는 방열판의 최소, 최대, 평균 온도 및 냉각기의 최소, 최대 온도를 출력 데이터로 설정하였으며, Fig. 6은 출력 데이터에 따른 차수축소모델에 대한 검증결과 그래프를 나타낸다. 그래프에서 녹색선은 차수축소모델에 대한 예측 값을 나타내고, 빨간 점은 검증을 위해 수행된 테스트 해석 포인트를 의미한다. 차수축소모델에 대한 정확도 판단을 위해 식 (5)와 식 (6)을 통해 통계기반의 잔여평균 및 잔여 표준편차를 산출하였으며[11], Table 5는 출력 응답 즉, 각각의 출력 데이터에 대한 잔여평균 및 잔여 표준편차를 나타낸다. 차수축소모델에 대한 높은 정확

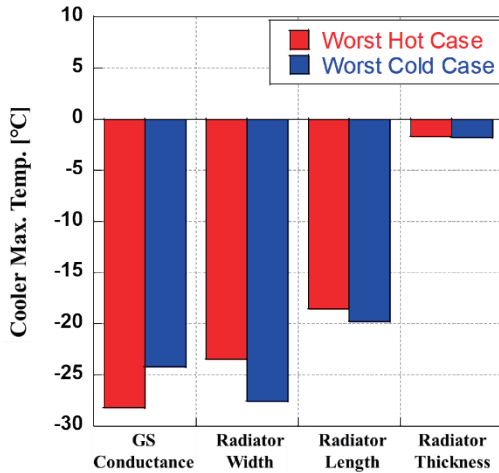


Fig. 7 Sensitivity of cooler temp. for preliminary optical design solution

도를 갖도록 잔여평균 1 °C 미만, 잔여 표준편차 3 °C 미만을 만족하도록 설정하였고[12], 분석 결과 잔여평균, 잔여 표준편차는 각각 최대 0.195 °C, 0.684 °C로 도출되어, 5개의 출력 응답 모두 목표치를 만족함을 확인하였다.

차수축소모델 구축 시 3.19 GHz의 동작속도를 가지는 Intel Core i9-12900K를 활용하였으며, 관련된 일련의 과정은 총 40분 소요되었다.

$$\text{Mean Res.} = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{ROMResults}[i] - \text{actualResults}[i])}{n} \quad (5)$$

$$\text{Std. Dev.} = \sqrt{(\text{ROMResults}[i] - \text{actualResults}[i])^2 - \text{Mean Res.}^2} \quad (6)$$

Table 5 Mean and standard deviation of the residual between ROM results and TD results

Output Response Parameters	Mean of the Residual	Standard Deviation of the Residual
Radiator Min. Temp. [°C]	0.214	0.417
Radiator Max. Temp. [°C]	-0.009	0.688
Radiator Mean Temp. [°C]	0.079	0.311
Cooler Min. Temp. [°C]	-0.355	1.542
Cooler Max. Temp. [°C]	-0.518	1.783

#### 4. 민감도 및 최적 설계 분석 결과

구축된 차수축소모델 기반으로 Veritrek의 사용자 툴인 Exploration을 활용하여 민감도 분석과 최적 설

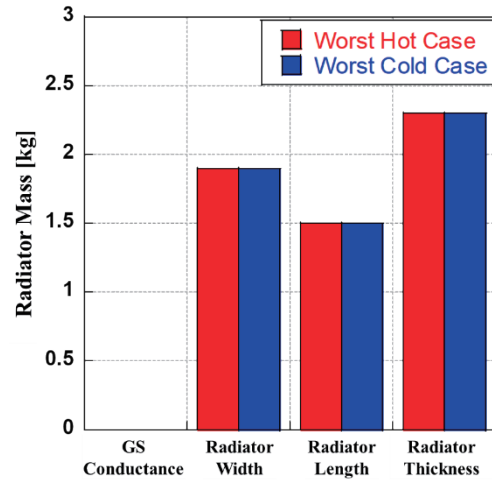


Fig. 8 Sensitivity of Radiator Mass for preliminary optical design solution

계분석을 수행하였다. 민감도 분석은 Table 4에서 정의한 범위에 따른 입력 값이 출력응답에 대한 민감도를 의미하며, 각 입력 요소의 평균영향은 해당 입력 요소의 낮은 값과 다른 입력 요소 값의 모든 조합을 취하고 출력 응답결과를 추적하여 평균값을 산출한 후, 해당 입력 요소의 높은 값과 다른 입력 요소 값의 모든 조합에 대해 동일한 작업을 수행하여 결정된다. 산출된 두 평균 간의 차이는 0으로 정규화 되며, 이러한 과정은 모든 입력 요소에 대해 반복하여 수행되어 Fig. 7, 8과 같이 도식화된다[13]. 여기서, x 축은 입력 파라미터를 나타내며, y 축은 입력 파라미터에 따른 출력 데이터에 대한 민감도 나타낸다. 민감도 분석결과 최악의 고온조건에서 그라파이트시트의 열전도도, 방열판의 폭, 길이 순으로 냉각기 온도에 민감한 반응을 보였으며, 방열판의 두께는 냉각기 온도에 큰 영향이 없음을 확인하였다. 반면, 최악의 저온조건에서는 방열판의 폭, 그라파이트시트 열전도도, 방열판의 길이 순으로 도출되었으며, 이는 방열판이 지속적으로 심우주를 바라보기 때문에 그라파이트시트의 열전도도 보다 민감하게 반응하는 것으로 판단된다. 아울러, Fig. 8에 나타난 바와 같이 방열판의 무게의 경우 কে도조건 및 그라파이트시트 열전도도에 영향없이 방열판의 두께, 폭, 길이 순으로 민감함 확인하였다. 이에 따라 상기 민감도 분석결과를 바탕으로 냉각기 온도변화에 둔감하면서, 방열판 무게에 민감한 방열판의 두께변수를 최저 수치인 4mm로 고정하였다. 그라파이트시트는 작업 및 조립성을 고려하여 상하부 각각 적층 수를 120장 이하로 설정하였으며, 방열판의 무게는 3 kg 이하로 설정하여 냉각기의 온도조건 35 °C미만을 만족하는 그라파이트시트의 열전도도 및 방열판 폭, 길이에 대

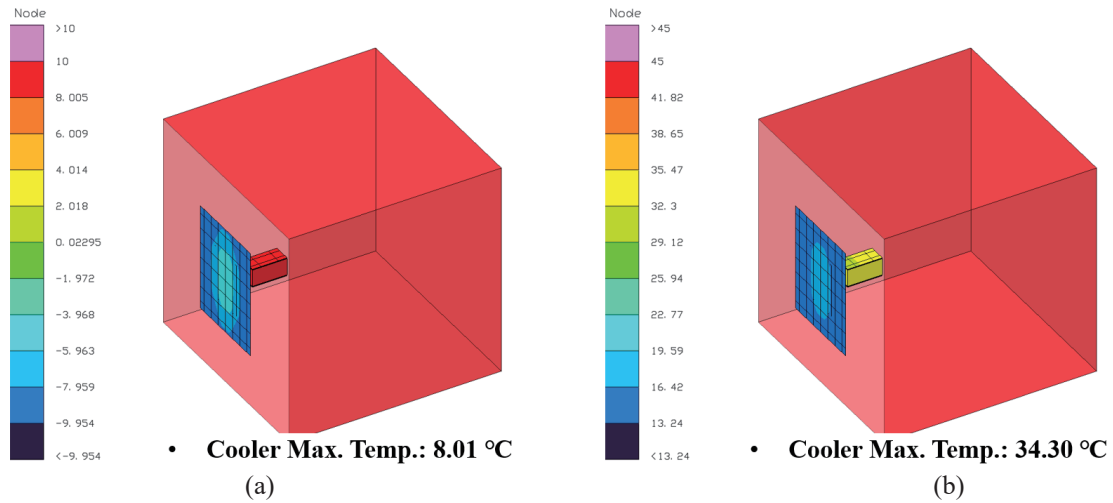


Fig. 10 Thermal distribution of worst condition ((a)Worst cold case, (b)Worst hot case)

한 최적의 설계변수를 찾으려 하였다.

최적 설계 시 최악의 고온조건에서 요구조건을 만족하는 설계 수치를 우선적으로 산출하였으며, 그 결과 Fig. 9와 같이 도출되었다. 상기 결과는 냉각기 온도에 따른 방열판 무게 그래프로 온도요구조건을 만족하면서, 방열판의 무게가 최소화되는 최적의 그래파이트시트 열전도도, 방열판 폭, 길이에 대한 최적 설계 값은 각각 1.533 W/K, 397.75 mm, 503.81 mm으로 산출되었다. 이때 그래파이트시트 열전도도 값에 따른 적층수는 108장이다. 산출된 결과값을 기반으로 최악의 저온조건에 대한 분석을 수행하였으며, 냉각기의 온도가 11 °C로 도출됨에 따라 온도 요구조건을 충족하고, 히터전력을 사용하지 않음을 확인하였다. Table 6은 최적 설계 결과에 따른 설계 변수에 대한 결과값을 나타내며, Fig. 10은 도출된 최적 설계 결과에 따른 온도 열해석 컨투어 맵을 나타낸다.

Table 6 Results of final optimal design

Optimal Design Parameter	Value
Graphite Sheet Conductance [W/K]	1.533
Radiator Width [mm]	397.75
Radiator Length [mm]	503.81
Radiator Thickness [mm]	4

### 5. 결 론

본 논문에서는 최적 열설계 전문 상용 소프트웨어인 Veritrek을 활용하여 그래파이트시트 기반 냉각기 열 제어 시스템에 대한 차수축소모델을 구축하고, 이를 통해 그래파이트시트 적층 수, 방열판 면적 및 두께에 대한 민감도 분석과 최적 설계를 수행하여 설계 유효성을 검토하였다. 열해석 모델 구축 및 해석은 전문 소프트웨어인 Thermal Desktop, SINDA/FLUINT, RadCAD으로 수행하였으며, 이를 기반으로 Veritrek의 차수축소모델 구축 용 Creation 툴을 활용하여 4가지의 설계 변수에 대한 180개의 열 설계 조합을 추출하였다. 이 중 160개는 학습용 데이터, 20개를 검증용 데이터로 차수축소모델에 대해 검증하였다. 차수축소모델의 대한 신뢰성확보하기 위해 출력 데이터의 잔여평균 및 잔여 표준편차에 대해 각각 1 °C, 3 °C 미만으로 설정하였으며, 냉각기 온도 출력 데이터에서 잔여평균, 잔여 표준편차 각각 최대 0.5 °C, 1.78 °C의 차이를 보여 요구수치를 만족함을 확인하였다. 신뢰성이 확보된 차수축소모델을 기반으로 Veritrek의 분석 전용 툴 Exploration을 활용하여 민감도 분석 및 최적 설계 분석을 수행하였다. 민감도 분석 수행결과 최악의 고온/저온 조건에서 모두 두께 변화에 따른 냉각기 온도변화가 가장 둔감하였으며, 상기결과를 바탕으로 최저 수치인 4 mm 로 고정하여 최적설계 분석을 수행

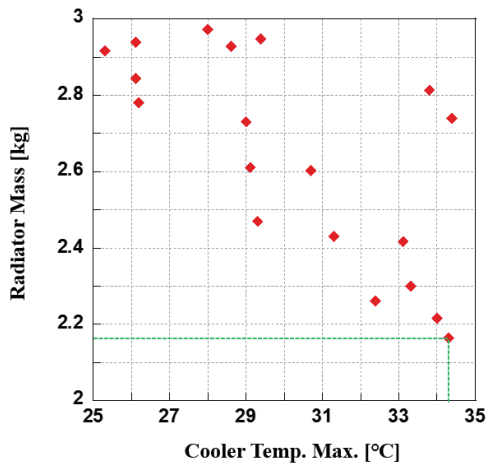


Fig. 9 Results of optimal design analysis at worst hot case

하였다. 최적 설계 분석 시 냉각기의 온도 요구조건 35 °C 미만을 만족하면서 그라파이트시트의 적층 수 120장 미만 및 방열판의 무게 3 kg 미만을 모두 만족하는 설계 파라미터를 추출하도록 하였다. 상기 분석 결과 그라파이트시트의 열전도도, 방열판 폭, 길이, 두께는 각각 1.533 W/K(적층 수: 108 장), 397.75 mm(폭), 503.81 mm(길이), 4 mm(두께)로 도출되었다. 차수축소모델을 구축하기위한 일련의 과정에 대한 소요시간은 총 40분이며, 예측의 경우 1초 미만이므로 거의 실시간으로 분석이 가능함을 알 수 있었다.

향후 그라파이트시트 열전도도가 냉각기 온도제어에 영향성이 가장 크다는 결과가 도출된 민감도 분석결과를 토대로 적층 수에 따른 열전도도 산출 실험을 수행할 예정이며, 열평형시험을 통해 고신뢰도의 열해석 모델을 구축하고자 한다.

## 후 기

본 연구는 한국항공대학교의 재원으로 2023교비학술연구(신진연구)의 지원을 받아 수행된 연구임.

## References

- [1] Gilmore, D., "Spacecraft Thermal Control Handbook, 2th Edition", *The Aerospace Press.*, USA, 2002
- [2] B. S. Hyun, H. K. Kim and J. J. Lee, "Spacecraft Thermal Control System Technology Trends", *Current Industrial and Technological Trends in Aerospace*, 5(1), pp. 32~38, 2007
- [3] [www.veritrek.com](http://www.veritrek.com)
- [4] H. I. Kim, M. Y. Kim and H. U. Oh, "Thermal Design of Cryogenic Cooler by Using Graphite Sheet for Enhancement of Micro-vibration Isolation Performance", *72th International Astronautical Congress (IAC)*, Dubai, United Arab Emirates, 25-29 Oct. 2021.
- [5] Guardnec Corporation Ltd, Introduction to Products, Graphite, GD-Series, [http://www.guardnec.com/en/product/product\\_view](http://www.guardnec.com/en/product/product_view), (accessed 26.09.21)
- [6] J Miao, Q Zhong, Q Zhao, X Zhao, "Spacecraft thermal control technologies", Beijing, China, 2021.
- [7] C&R Technologies, "Thermal Desktop User's Manual—A Cad Based System for Thermal Analysis and Design", Version 6.1
- [8] C&R Technologies, "SINDA/FLUINT User's Manual—General Purpose Thermal/Fluid Network Analyzer" Version 6.1
- [9] H. U. Oh, K. J. Lee, S. Y. Jeong and S. M. Shin, "Thermal Design of Cryogenic Compressor with Strategies for Keeping Performance of Micro-vibration Isolation System", *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, 40(3), pp. 237-242
- [10] D. W. Hengeveld and A. Biskner, "Enhanced data exploration through Reduced-Order Models", *47th International Conference on Environmental Systems*, Charleston, SC, 2017.
- [11] Veritrek, "Veritrek Creation Tool User's Manual" Version 4.0
- [12] "Assessment of the Mars Helicopter Thermal Design Sensitivities using the Veritrek Software", *Thermal & Fluids Analysis Workshop Conference 2018*, Houston, USA, pp. 1~18, August 2018.
- [13] Veritrek, "Veritrek Exploration Tool User's Manual" Version 4.0