J. Space Technol. Appl. 4(1), 27-47 (2024)
https://doi.org/10.52912/jsta.2024.4.1.27

우주기술과 응용
Journal of Space Technology and Applications
pISSN 2765-7469 eISSN 2799-3213

연구논문

인공위성 로봇팔 탑재체의 열 제어 설계 및 해석 개발 동향

신한섭[1,2], 김해동[1†]

[1]경상국립대학교 기계항공우주공학부 항공우주공학
[2]한국항공우주산업

Development Trends of Thermal Control Design and Analysis of Robotic Arm Payload for Spacecraft

Han-Seop Shin[1,2], Hae-Dong Kim[1†]

[1]Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea
[2]Korea Aerospace Industries, Sacheon 52529, Korea

Received: January 20, 2024
Revised: February 1, 2024
Accepted: February 7, 2024

†Corresponding author :
Hae-Dong Kim
Tel : +82-55-772-1641
E-mail : haedkim@gnu.ac.kr

Copyright © 2024 The Korean Space Science Society. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID
Han-Seop Shin
https://orcid.org/0009-0002-1235-6939
Hae-Dong Kim
https://orcid.org/0000-0001-9772-0562

요 약

뉴스페이스(New Space) 시대에 이르러 궤도상 서비싱(OOS, on orbit servicing) 임무를 수행하기 위한 인공위성들이 개발되고 있다. 궤도상 서비싱을 위한 다양한 임무는 고장수리, 재급유, 견인, 구성품 교체, 우주 상 건설 등의 여러 임무가 있으며, 이를 수행하기 위해 로봇팔 탑재체가 탑재되어야 한다. 로봇팔 탑재체는 기존 인공위성의 탑재체와 달리 고정된 상태로 움직이지 않는 것이 아니라 임무 수행을 위해 지속적으로 움직여야 하는 탑재체라는 특징이 있으며, 또한 인공위성의 구조체 내부에 존재하는 것이 아닌 우주공간에 직접적으로 노출된 상태로 임무 수행을 해야 한다는 특징이 있다. 이러한 탑재체의 특징으로 인해 극한의 우주 열환경에서 이상 없이 운용될 수 있는 열 설계 및 해석은 필수적이나, 로봇팔 열 설계 및 해석에 대한 논문은 그리 많지 않은 실정이다. 본 논문에서는 현재까지 개발된 로봇팔 탑재체에 대한 열 설계, 해석에 대한 사례들을 소개 및 정리하였으며, 마지막에는 앞으로 개발할 로봇팔 탑재체의 열 설계 및 해석에 대한 방향을 제시해 보고자 한다.

Abstract

In the New space era, satellites are being developed to perform on-orbit service (OOS) missions. Various missions for orbital service include failure repair, refueling, towing, component replacement, and space construction, and in order to do so, a robot arm payload must be mounted. Unlike conventional satellite payloads, the robot arm payload is not move in a fixed state, but is a payload that must move continuously to perform the mission. It is also characterized by the need to perform the mission while being directly exposed to outer space, rather than existing inside the structure of the satellite. Due to the characteristics of these payloads, thermal design and interpretation that can be operated smoothly in an extreme space thermal environment is essential, but there are not many papers on thermal design and interpretation of the robot arm. This paper introduces and summarizes cases of thermal design and interpretation of robot arm payloads developed so far, and finally, it intends to suggest directions for thermal design and interpretation of robot arm payloads to be developed in the future.

핵심어 : OOS(on-orbit servicing) 인공위성, 로봇팔, 열 설계 및 해석
Keywords : on-orbit servicing (OOS) spacecraft, robotic arm, thermal design and analysis

1. 서론

뉴스페이스(New Space) 시대에 이르러 궤도상 서비싱(OOS, on orbit servicing) 임무를 수행하기 위한 인공위성들이 개발되고 있다. 궤도상 서비싱을 위한 다양한 임무는 고장수리, 재급유, 견인, 구성품 교체, 우주 상 건설 등의 여러 임무가 있으며, 이를 수행하기 위해 로봇팔 탑재체가 탑재되어야 한다. 로봇팔 탑재체는 기존 인공위성의 탑재체와 달리 고정된 상태로 움직이지 않는 것이 아니라 임무 수행을 위해 지속적으로 움직여야 하는 특징이 있으며, 인공위성의 구조체 내부에 존재하는 것이 아닌 우주 공간에 직접적으로 노출된 상태로 임무 수행을 해야 한다는 특징이 있다. 또한 로봇팔의 관절 부분에는 허용될 수 있는 온도 범위가 상대적으로 좁은 전자적 구성품이 배치되어 있다. 이러한 로봇팔 탑재체의 특징으로 인해 극한의 우주 열환경을 고려하였을 때 탑재체의 성능/기능 및 구동 운용이 이상 없이 수행될 수 있도록 열 설계 및 해석과 시험을 통한 검증을 하는 것이 필수적이나, 로봇팔 열 설계, 해석 및 시험에 대한 논문은 그리 많지 않은 실정이다. 현재까지 개발된 로봇팔 탑재체 중 ERA (European robotic arm)에 대한 열 설계 및 해석 사례와 화성탐사로버 Phoenix 로봇팔에 대한 열 설계 및 해석 사례가 존재하였다. 또한, 중국에서 로봇팔의 관절 부분에 대한 열 설계 및 해석과 시험을 통한 검증 연구가 수행된 바 있다.

로봇팔 탑재체는 지속적으로 움직여야 하는 구조물이므로 일반적으로 고정된 인공위성 탑재체와 다르게 열구조적 관점에서 차이점이 있을 수 있으며, 열 설계 시 추가적으로 고려해야 할 사항들이 존재할 것으로 판단된다. 본 논문에서는 현재까지 수행된 로봇팔의 개발 및 연구 사례를 기반으로 앞으로 개발할 로봇팔 탑재체의 열 설계 및 해석에 대한 방향을 제시해 보고자 한다.

2. 로봇팔 탑재체 열 설계 및 해석 사례

2.1 ERA(European Robotic Arm) 로봇팔 열 설계 및 해석[1]

ERA 로봇팔은 러시아 MIR-2 우주정거장에서 사용되기 위해 처음 설계되었으나, 국제우주정거장(International Space Station, ISS)에 통합되어 국제우주정거장 상에서 궤도상 서비스를 지원하고 있다. 설계는 오래 전부터 수행되었으나, 2021년에 발사되어 처음으로 우주공간에서 선외 활동 지원용으로 사용되었다.

ERA 로봇팔은 Fig. 1 및 2와 같이 로봇팔 길이 11.3 m, 7 자유도로 Dutch Space사에 의해 개발되었으며, 10년간의 임무수명 동안 처할 수 있는 가능한 모든 열 환경에 대해서 작동되고 견딜 수 있어야 하기 때문에 다양한 케이스를 고려하여 열 해석이 수행되었고, 이를 기반으로 열 설계가 수행되었다.

2.1.1 ERA(European robotic arm) 로봇팔 구성

ERA 로봇팔은 Fig. 1과 같이 팔꿈치(elbow), 팔(limb), 팔목(wrist), 손(hand, end-effector and camera/lighting unit)로 구성되며, ERA 자체에 온보드 컴퓨터(on-board computer)가 탑재되어 있으므로, 국제우주정거장으로부터 독립적으로 작동할 수 있다. 로봇팔에 다양한 구성품들이 부착되어 있으며, 열적인 부분을 고려하여 열 설계가 수행되었다.

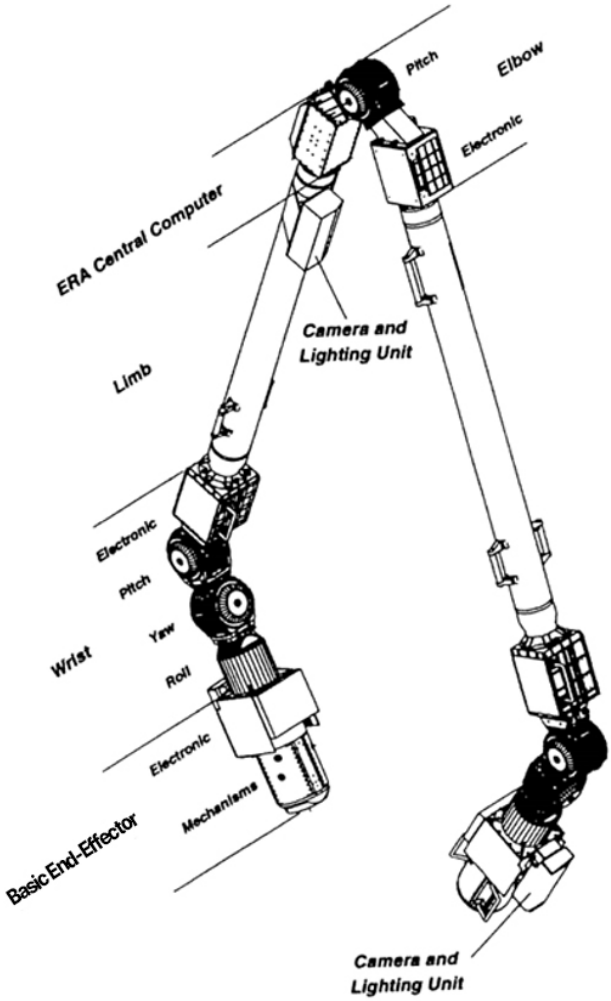

Fig. 1. Configuration of European robotic arm payload. ERA, European robotic arm.

2.1.2 ERA(European robotic arm) 로봇팔 운용 모드

ERA 로봇팔은 4,500시간 동안 작동될 수 있도록 설계되었으며 4,500시간 동안 '대기모드(stand-by mode; all electronics on, motor off)', '운용모드(full operation mode; motor on, all electronics peak power dissipation)', '동면모드(in hibernation mode; all units switched off but heater system switched on)'의 임무 모드로 운용된다.

2.1.3 ERA(European robotic arm) 로봇팔 특징

ERA 로봇팔의 주요한 특징은 Table 1과 같다.

2.1.4 ERA(European robotic arm) 로봇팔 요구조건

ERA 로봇팔의 열 설계와 관련 있는 요구조건으로는 10년간의 임무 수명 동안 작동 가능해야 하므로 임무 기간 동안 겪는 다양한 우주 열환경에 견딜 수 있어야 한다. 또한 10년 동안 국제우주정거장에서 동면 가능해야 하며, 동면하는 동안 히터 전력 사용량이 전력 버짓을 초과하지 않아야 한다.

Table 1. ERA key figures

Parameters	Values
Total length	11.3 m
Range / span	9.2 m
Degrees of freedom	7
ERA mass	580 kg
Peak power dissipation	800 W
Standby heat dissipation	240 W
Hibernation heater power consumption	250 W Max.
Accuracy (open loop)	±40 mm
Accuracy (closed loop)	±5 mm
Maximum moveable mass	8,000 kg
Maximum payload dimensions	3 × 3 × 8.1 m
Maximum speed of movement	0.2 m/s
Braking distance	0.15 m

ERA, European robotic arm.

2.1.5 ERA(European robotic arm) 로봇팔 열 설계 철학

위와 같은 요구조건과 ERA 로봇팔의 구성을 고려하였을 때, 열 설계를 위한 철학은 아래와 같다.

1. 각 부체계 구성품들은 독자적인 열 제어가 되어야 하며, 인접한 부체계와 열전달이 최소화되도록 단열 처리가 되어야 한다.
2. 적절한 능동 열 제어 시스템인 히터와 같이 수동 열 제어 시스템을 적용함으로써 신뢰성 있는 열 설계가 이루어져야 하며, 열 해석을 통해 예측 가능해야 함. 또한, 로봇팔의 설계의 변경이 이루어질 시 이를 수용할 수 있어야 한다.
3. 작동 시 계속적인 발열량을 가지는 전자기 구성품은 열적으로 방열판에 연결되어 있어야 한다. 짧은 순간에 높은 발열량을 가지는 모터와 같은 구성품은 단열되어야 하며, 주변 시스템의 열용량으로 수용 가능해야 한다.
4. 열 제어 시스템은 모든 구성품에 대해서 임무 기간 내내 스위치가 켜지는(switched-on) 온도 범위보다 높게 유지해야 한다. 따라서 ERA의 동면 기간 중에 언제든 구성품이 켜지고 최소한의 시간(30분) 이내에 작동될 수 있어야 한다.
5. 열 제어 설계는 로직에 따라 자동적으로 이루어질 수 있도록 설계되어야 하며, 따라서 단일 고장(single failure)로 인한 IVA(Internal vehicular activity) /EVA(External vehicular activity) 개입이 없도록 설계되어야 한다. 이는 히터의 보완 시스템인 핫 리던던시(hot redundancy) 개념으로 이루어질 수 있다.
6. 기능/성능적으로 중요한 구성품의 온도는 지속적으로 감시되어야 한다. 해당 부분의 측정 온도는 온도범위 조건과 비교되어야 한다. 만약, 온도 범위를 초과할 시 운용자(operator)는 즉시 알려야 한다.

위의 철학에 따라 ERA 로봇팔의 열 설계는 전력을 사용하는 능동 열제어 방식과 전력을 사용하지 않는 수동 열 제어 방식을 모두 고려하여 설계되었다.

2.1.6 ERA(European robotic arm) 로봇팔 열 설계

ERA의 로봇팔 열 설계 사항은 Fig. 2와 같으며, 아래와 같은 열제어 설계 사항들이 고려되었다.

2.1.6.1 방열판(radiator)

방열판(radiator)는 이차면경(SSM, second surface mirror) 또는 흰색 페인트(white paint)로도 적용될 수 있으며, 전자 구성품의 특정 패널에 방열판이 부착된다. 방열판 설계 시 ERA 로봇팔의 다양한 자세를 고려하여 면적 결정이 필요하며, 태양이 정면으로 직접 방열판을 바라볼 때 특히 고려되어야 한다.

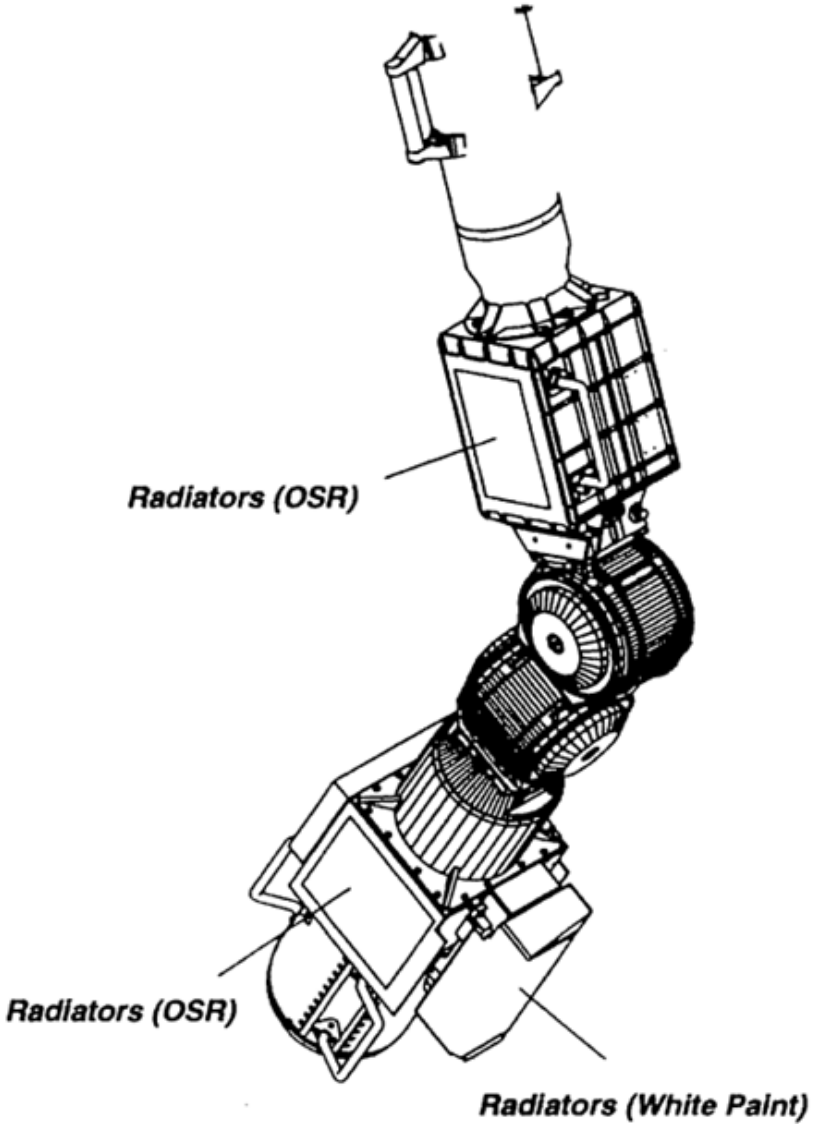

Fig. 2. Passive thermal design of European robotic arm payload.

Basic end-effector, manipulator joint, ERA control computer는 최적의 성능을 위해 방열판으로 덮어져야 한다. 카메라 및 광학 구성품(camera & lighting unit)에는 구성품의 기하학적 형상이 평평하지 않고 복잡하여 흰색 페인트가 칠해진다.

2.1.6.2 다층박막단열재(multi-layer insulation, MLI)

다층박막단열재는 radiator, optics, accessibility/clearance 제한조건이 적용된 부분을 제외한 모든 우주공간에 노출되는 외부 면적을 덮을 수 있도록 적용되어야 한다. 다층박막단열재는 0.25 mil aluminised mylar with dacron net spacers가 10번 적층된 layer로 구성되며, space에 노출된 최외각 층은 aluminised betacloth로 구성된다. 1 mil aluminised kapton layer는 betacloth 및 mylar layer 사이에 삽입되며, 로봇팔에 맞닿는 최내각 층은 0.5 mil aluminised nomex로 구성된다. MLI는 velcro를 이용하여 부착되며, 방열판 주변에는 양면테이프 등을 이용하여 빈틈이 없도록 부착하여 벤팅(venting)으로 인한 방열판의 오염도 방지한다.

2.1.6.3 단열 처리(thermal de-coupling)

카메라 구성품은 ERA 로봇팔과 단열 처리되어야 하며, EVA 중 카메라를 탈착 시 인접한 부체계에 영향이 없어야 한다. 단열 처리는 다층박막단열재를 이용하여 복사 열 전달을 단열, 단열 와셔(thermal washer)로 전도 열 전달을 단열시킨다. 카메라와 마운팅 브라켓(mounting bracket) 간에 단열 와셔가 적용되어 단열처리 되며, 핸드레일(handrail)은 ERA 로봇팔 간에도 단열 처리 되어야 한다. 구조적 강성 요구조건으로 인해 단열 와셔는 부체계 사이의 구조적 연결부위(ERA load)에는 부착되지 않는다. 팔 부체계(limb subsystem) 같은 경우, 열변형을 줄이고자 열전도율이 낮은 복합재나 티타늄을 사용하기 때문에 히터의 열 손실은 일어날 수 있다.

2.1.6.4 히터 및 온도 센서(히터 and temperature sensor)

히터 및 온도센서는 전력을 사용하는 능동 열 제어 방식이며, Fig. 3과 같다. ERA의 모든 구성품들은 ERA의 동면 상태일 때 스위치가 꺼지기 때문에 히터 시스템을 이용하여 허용온도범위 밑으로 벗어나지 않도록 해야 한다. 히터는 ERA의 모든 구성품들을 허용온도범위 이상 될 수 있도록 그 크기가 결정되어야 한다. 히터의 열 제어를 통해 ERA의 모든 구성품들은 언제든 온도 제약 없이 스위치가 켜질 수 있어야 한다. 모든 히터는 120 V에 연결되어 작동되며, 고장에 대비하여 히터 시스템은 모두 보상 시스템(redundant system)이 고려되어야 한다. 핫 리던던트(hot redundant) 히터 전력 라인은 보조 라인을 가져야 하며, 메인 및 보조라인은 항상 스위치가 켜져 있어야 한다. 주요 라인이 고장날 경우 보조라인이 바로 사용될 수 있어야 한다. 주요 히터와 보조 히터를 모두 켜 놓을 경우, 동시에 켜져서 히터 전력 버짓을 초과할 수 있으므로, 보조 히터를 위한 써모스탯(thermostat)의 on/off 설정 온도를 주 써모스탯보다 낮게 설정해 놓아야 한다. 주 써모스탯의 닫힘이 실패할 경우를 대비해 각각 2개의 써모스탯이 사용된다. 써모스탯이 열림이 실패될 경우, 보조 히터 시스템이 작동된다.

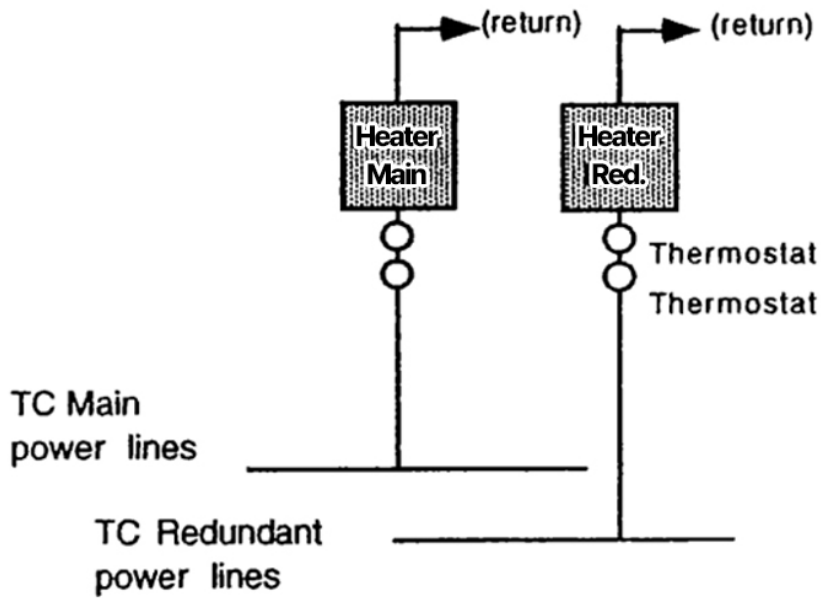

Fig. 3. Active thermal design concept of European robotic arm payload.

2.1.7 ERA(European robotic arm) 로봇팔 열 해석

ERA 로봇팔 열 해석을 위해 고려되어야 하는 변수들은 Table 2와 같다. ERA이 겪을 수 있는 모든 열 환경을 고려해야 하므로 열 해석 케이스 선정은 도전적이면서도 잘 고려되어야 하는 항목이다. 열 해석 선정을 위한 변수들이 많으나 모두 고려되어야 한다. ERA는 궤도상 운용 시기, 자세 등을 고려 시 매우 복잡한 우주 열 환경에서 운용되며, 그 중 국제우주정거장의 형상도 고려되어야 한다. ERA는 7 자유도의 복잡한 자체 형상과 ERA 재배치 및 이동 여부 등이 고려되어야 하며 이러한 요소가 열적 예측을 더 힘들게 한다. ERA 열 설계는 ERA의 작동에 필요한 사항을 충족시켜야 한다. 열 해석 케이스는 열 설계 옵션(finishes 선정, 방열판 방향, 열 반응 시간 등)에 따라 달라질 수 있으며, 열 설계 trade-off 및 열 해석 케이스 간 반복과정이 필요하다. 변수들의 조합은 결국 수많은 해석 케이스를 생성하게 하며, 이를 줄이기 위해 열 해석 자체를 최소한으로 모델링하여 수행해야 한다.

2.2 화성탐사로버 Phoenix 로봇팔 열 설계 & 해석[2]

2007년도에 발사된 화성 로버 탐사선 Phoenix에 탑재된 로봇팔 탑재체에 대한 열 설계 및 해석 내용 사례를 소개하였다.

2.2.1 화성탐사로버 Phoenix 로봇팔 열 설계

화성탐사를 위한 화성탐사로버 Phoenix는 Fig. 4와 같이 RA(robotic arm)를 탑재하고 있으며, Phoenix RA의 액츄에이터(actuator)와 베어링(bearing)은 화성의 추운 환경을 견뎌야 한다. RA 액츄에이터의 운용 중 최소 허용온도 제한은 -55℃이므로 히터 열 설계를 필요로 한다. 히터의 크기는 RA가 겪을 수 있는 모든 열 환경을 고려하여 설계 및 결정되어야 하며, 특히 손목(wrist)이나 관절(joint), 액츄에이터가 있는 부분에 히터 열 설계가 적용되어야 한다.

Table 2. Thermal analysis parameters of ERA payload

Parameters		Description
Orbit	Sun	Summer and winter solstices
	Albedo	Extreme values depending upon the thermal response time of the hardware.
	Earthshine	Extreme values depending upon the thermal response time of the hardware.
	Altitude	From 270 to 460 km
	Ascending node	Regarding the: – Eclipse time – Incident flux reflected by ISS – Incident flux variations – ISS shading
ISS	Attitude	Roll, yaw, pitch = ±15°, ±15°, ±15°
	Assembly stage	From ERA installation to ISS final assembly stage with and without docked space vehicles
	Configuration	Orientation of the solar arrays and of the gyrodine radiators
	Payload configuration	Large payload location
	Boundary T	Radiators temperatures. These depend upon ISS operations and are therefore treated as boundary temperatures
	Radiation case	BOL or EOL properties of the outer surface thermo-optical properties
ERA	Location on ISS	Basepoint positions
	Configuration	Hibernation position or any reference position taken by ERA during an operation
	S/S configuration	For the basic end effector: rigidised / non rigidised
	Radiation case	BOL or EOL properties of the outer surface thermo-optical properties
	Thermal response time	Each unit has a different thermal response time

Table 2. (Continued)

Parameters		Description
Operation	ERA operation mode	Hibernation – standby – peak modes
	Mission	Installation, maintenance and inspection missions defined by a sequence of reference tasks
	Time lines	Motor and electronics duty cycles total operating time
	Internal power dissipation	Maximum or minimum dissipation due to voltage variation and other uncertainties
	Constraints	Related to safety

ERA, European robotic arm; ISS, International Space Station; BOL, begin of life; EOL, end of life.

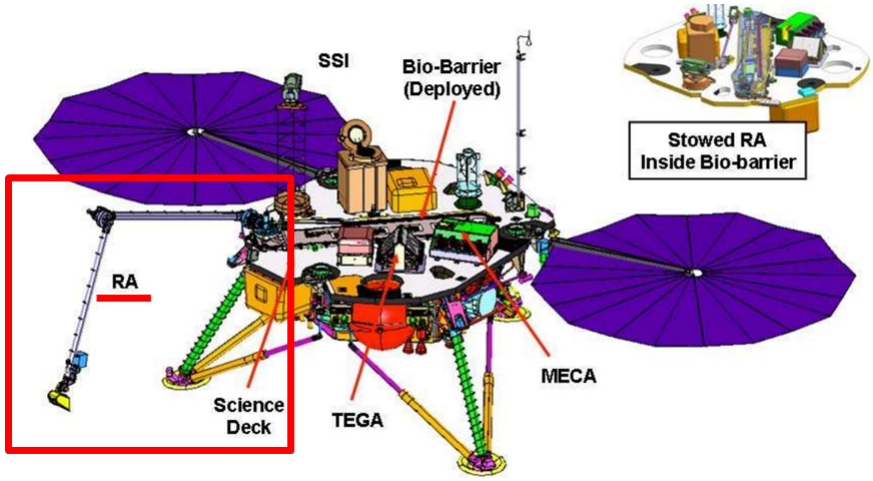

Fig. 4. Phoenix spacecraft in landed configuration. RA, robotic arm.

하지만, 히터 열 설계가 필요한 부분은 전자구성품이 포함된 관절 부분이며, 해당 부분은 기계적인 형상이 복잡하여 히터를 부착하기에 공간적인 제약이 따를 수 있다. 이러한 제약 조건과 복잡한 열 환경에도 불구하고 Phoenix RA의 히터 열 설계는 잘 이루어졌으며, 설계 요구조건을 만족시켰다. 추운 화성의 환경을 견딜 수 있는 열 설계를 고려하여, 모든 모터 구성품에 온도 센서 부착을 하였으며, 히터의 고장으로 인해 과열이 발생할 경우, 컷 오프 써모스탯(cut-off thermostat)을 통해 예방할 수 있게 설계되었다.

2.2.2. 화성탐사로버 Phoenix 로봇팔 기계적 형상

화성탐사로버 Phoenix 로봇팔 기계적 형상은 Fig. 5와 같으며, 접혀져 있는 형상이다.

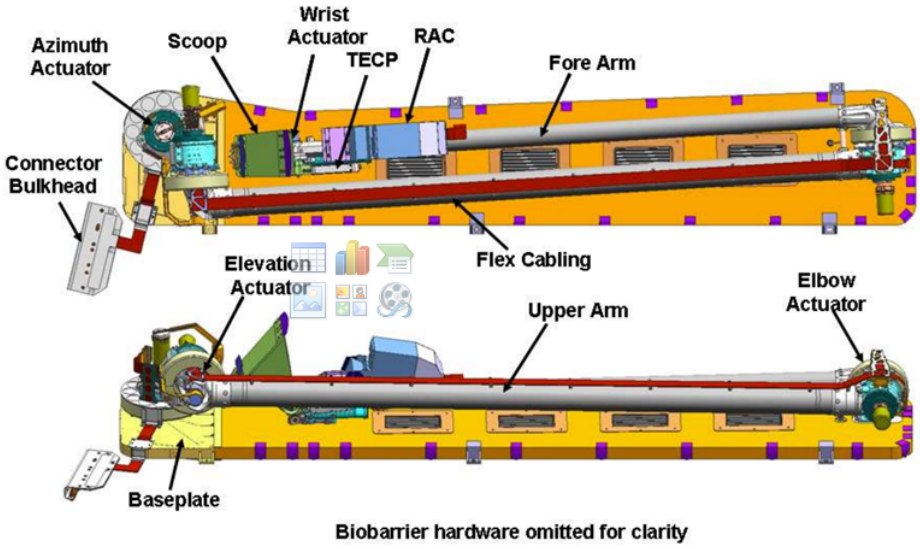

Fig. 5. Phoenix RA mechanical configuration. TECP, thermal and electrical conductivity probe; RAC, robotic arm camera; RA, robotic arm.

2.2.3 화성탐사로버 Phoenix 로봇팔 구성품 허용온도범위

화성탐사로버 Phoenix 로봇팔 기계적 형상은 Table 3과 같다.

Table 3. RA temperature requirements

RA component	Operating temp. range (℃)		Non-operating temp. range (℃)		Turn-on (℃)
	Min.	Max.	Min.	Max.	
Azimuth actuator	−55	25	−93	25	45
Elbow actuator	−55	25	−93	25	45
Elevation actuator	−55	25	−93	25	45
Wrist actuator	−55	25	−93	25	45
RA structure					
Arms & fittings	−70	25	−93	25	N/A
Baseplate	−70	25	−93	25	N/A
Flex cable	−70	25	−93	25	N/A
Scoop	−93	25	−93	25	N/A
Biobarrier					
Pre-deploy	N/A	N/A	−70	40	N/A
Just prior to & during deployment	−70	0	N/A	N/A	N/A

Table 3. (continued)

RA component	Operating temp. range (℃)		Non-operating temp. range (℃)		Turn-on (℃)
	Min.	Max.	Min.	Max.	
Post-deploy	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

RA, robotic arm; N/A, not applicable.

2.2.4 화성탐사로버 Phoenix 로봇팔 운용모드에 따른 형상

화성탐사로버 Phoenix 로봇팔 임무 형상은 3가지가 있으며 Fig. 6과 같다. In-trench 형상은 지면 밑까지 digging하는 형상이며, near-ground 형상은 지면에서 임무를 수행하는 형상이고, above-deck은 Phoenix보다 위에 로봇팔이 위치하는 형상이다.

각각의 임무 형상마다 외부 열환경과 내부 발열량이 달라져 히터의 사용량 등 열 설계 수행 사항이 잘 고려되어야 한다.

Near-ground 및 above-deck의 경우, 히터를 사용하여 1시간 이내로 액츄에이터의 온도를 −55℃ 이상으로 올려줘야 하며, in-trench의 경우 3시간 이내로 액츄에이터의 온도를 −55℃ 이상으로 올려줘야 한다.

2.2.5 화성탐사로버 Phoenix 로봇팔 열 설계

로봇팔의 구성품 중 관절에 해당하는 액츄에이터는 임무 수행 전 −55℃ 이상의 온도로 유지되어 있어야 하므로 Fig. 7과 같이 RA 액츄에이터에 패치 형태의 히터가 부착된다.

외부 열 환경과 임무모드에 따른 내부 발열량 등을 잘 고려하여 히터의 크기와 전력량 등을 결정해야 하며, 이때 액츄에이터의 형상 중 평평한 면이 히터 크기 결정 시 제약조건이 되므로 필요 시 액츄에이터의 형상 또는 히터의 형상이 수정되어야 할 필요성도 있을 것으로 판단된다.

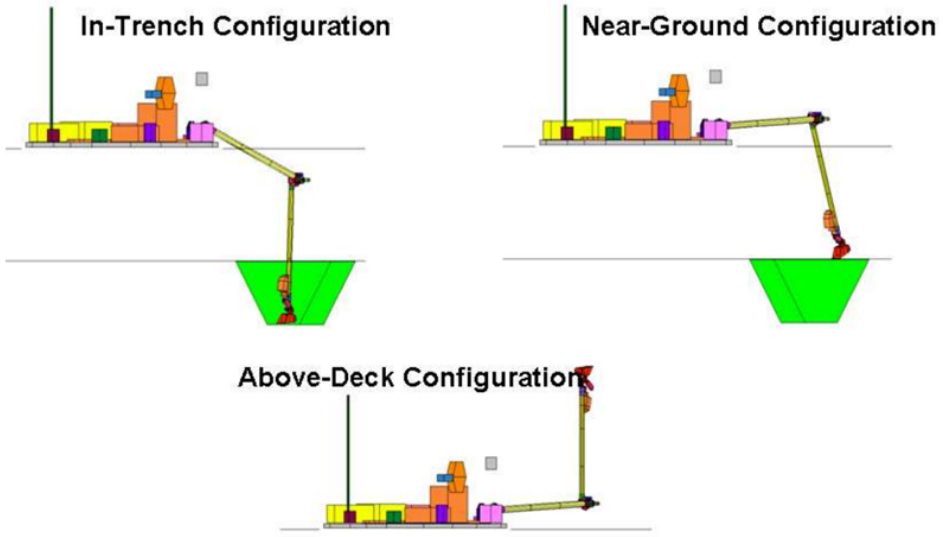

Fig. 6. Phoenix RA mission operational configuration. RA, robotic arm.

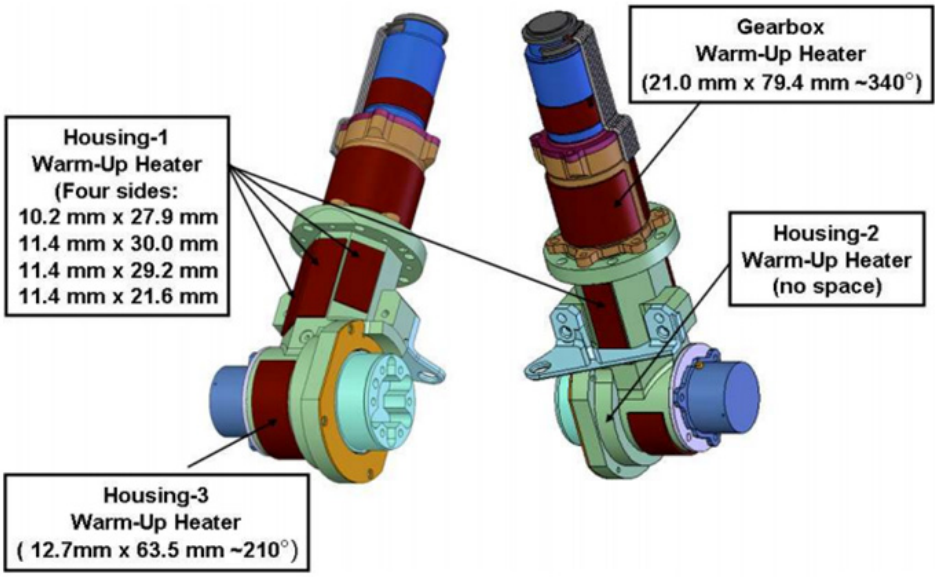

Fig. 7. Phoenix RA actuator heater locations. RA, robotic arm.

비운용 상태인 경우, RA 액츄에이터는 생존 히터 및 단열 없이 화성의 매우 추운 환경을 버텨야 한다. 특히 손목 액츄에이터의 히터 크기 결정이 중요하며, 어렵게 해결해야 할 사항 중 하나이다. 손목 액츄에이터의 히터 크기 결정 시 액츄에이터 부분은 기하학적 형상이 복잡하므로 히터 크기를 결정할 때 더 어려움이 존재한다.

2.2.6 화성탐사로버 Phoenix 로봇팔 열 모델

Fig. 8과 같이 열 모델이 구축되었으며, 3,697개의 노드, 1,715개의 열전달 경로와 1,308개의 대류 열전달 경로가 사용되었다.

로봇팔 탑재체를 위한 상세적인 열해석을 위해 비교적 많은 노드 수가 사용되었으며, 이는 액츄에이터(motor, gear-train, harmonic drive)의 정확한 온도 예측을 위함이다.

열 모델에 적용된 광학 물성치는 Table 4와 같다.

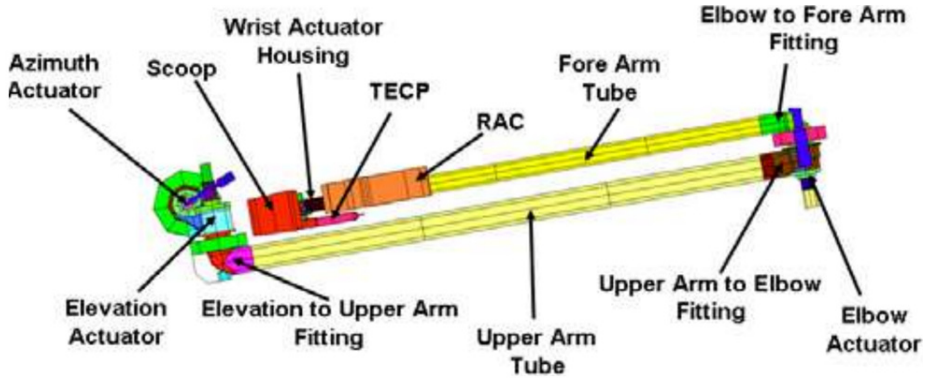

Fig. 8. Phoenix RA thermal model. TECP, thermal and electrical conductivity probe; RAC, robotic arm camera; RA, robotic arm.

Table 4. RA optical properties

Component	Surface finish	BOL		EOL	
		α	ε	α	ε
Motor case	Bare aluminum	0.17	0.05	0.25	0.04
Actuators (Heater locations)	Black kapton tape	0.50	0.15	0.55	0.10
Actuators (elsewhere)	Bare aluminum	0.17	0.05	0.25	0.04
	Bare stainless steel	0.32	0.14	0.56	0.10
	Bare titanium	0.50	0.15	0.55	0.10
Arm tubes	Bare aluminum	0.17	0.05	0.25	0.04
Flex cable	Kapton	0.80	0.80	0.80	0.80
Fittings	Bare aluminum	0.17	0.05	0.25	0.04
	Bare titanium	0.50	0.15	0.55	0.10
Base plate	Black kapton tape	0.50	0.15	0.55	0.10
TECP (thermal and electrical conductivity probe)	Clear anodized aluminum	N/A	N/A	N/A	N/A
RAC (robotic arm camera)	Alodined aluminum	0.50	0.10	0.50	0.10
Scoop	Black anodized aluminum	0.53	0.82	0.67	0.87

BOL, begin of life; EOL, end of life; N/A, not applicable.

2.2.7. 화성탐사로버 Phoenix 로봇팔 열 해석

열 모델 구축 시에는 불확실성이 항상 존재하므로 더 가혹한 열 환경 조건 하에 열 해석이 진행된다. 열 해석 시에 고온 및 저온에 대한 최악 해석 조건은 아래와 같다.

- 최악 고온 조건(worst hot case) 열 해석
  : Begin of life(BOL) 광학 물성치, 화성의 뜨거운 환경
  : 액츄에이터의 최대 온도를 예측하기 위해 수행됨.
  : 3.5시간 동안 계속적인 로봇팔 작동(내부 발열량 최대)
- 최악 저온 조건(worst cold case) 열 해석
  : EOL(end of life) 광학 물성치, 화성의 추운 환경

: 가장 추운 로봇팔 형상
: 히터를 이용한 웜업(warm-up) 시 로봇팔 내부 발열량 X
: 히터의 크기 결정과 총 히터 전력 소모량 산출을 위해 수행됨.

Phoenix 로봇팔 열 해석 결과 임무 수행을 위해 필요한 히터의 전력 소비량은 Table 5와 같다. 히터 전력 소비 시 액츄에이터의 온도를 −55℃ 이상으로 유지하기 위해 임무 수행 동안 히터의 웜업 상태를 유지해야 하지만 내부 발열량으로 인해 온도가 높은 구성품에도 히터가 같이 작용되므로 모든 구성품이 허용온도범위 이내에서 유지될 수 있도록 히터의 크기와 전력 소비량을 잘 결정해야 한다. 따라서 구성품의 최대 허용온도 범위를 넘지 않도록 하면서 1 or 3시간 이내에 최소 허용온도 범위 이상이 될 수 있도록 예열하기 위한 히터의 최적 사용량이 Table 5와 같이 결정되었다.

액츄에이터들의 허용된 최대 내부 발열량은 Table 6과 같다. 액츄에이터의 모터들은 3.5시간 동안 RA가 작동할 때 85℃를 초과하지 말아야 한다는 요구조건이 있다. 너무 큰 내부 발열량을 소비할 경우, 임무 수행 중 최대 온도를 넘어갈 수 있으므로 허용될 수 있는 발열량에 제약이 있다.

3.5시간 RA 작동(with 히터 stuck-on) 중 액츄에이터의 온도는 최대 허용온도인 85℃를 초과하지 않았으며, 이는 작은 사이즈의 웜업 히터 때문이다. 하지만, Table 7과 같이 손목 액츄에이터의 경우 초과하는 구성품이 존재한다(non-op Max. limit: 110℃). 따라서 stuck-on 히터 실패 방지를 위해 손목에 cut-off 써모스탯을 부착하여 히터를 제어한다.

Table 5. RA total warm-up heater power results

Heater location	Azimuth	Elevation	Elbow	Wrist
Motor	0.5	0.3		
Gearbox	0.0	0.3		
House-1	0.8	1.3		9.1
House-2	0.8		1.0	
House-3				6.3
Total	2.0	1.8	1.0	15.3

Total warm-up heater power is 20.1 W.

RA, robotic arm.

Table 6. RA actuator max allowable internal power dissipation

Actuator	Max allowable motor power dissipation (W)
Azimuth	4.4
Elevation	5.2
Elbow	3.6
Wrist	5.3

RA, robotic arm.

Table 7. RA actuator max allowable internal power dissipation

Wrist actuator component	Maximum temperature (℃)
Motor	69
Gearbox	70
SDPA	109
Bevel	119
OPT	113

RA, robotic arm; SDPA, pinion gear; OPT, output potentiometer.

2.3 로봇팔(Robotic Arm)의 관절(Joint) 열 설계 및 해석[3]

로봇팔은 우주 열 환경에서 지속적으로 움직여야 하는 탑재체이다. 따라서 동작을 가능하게 해주는 관절 부분이 계속 움직여야 하며, 동작을 위해서는 허용온도범위 내에서 존재할 수 있도록 하는 것이 필수적이다. 관절 부분에는 동작을 가능하게 해주는 다양한 전자 구성품들과 액츄에이터 부분들이 있으며, 해당 구성품들은 로봇팔의 다른 구조적인 파트들보다 허용온도범위가 좁다. 또한, 해당 구성품들은 지속적이고 오랜 시간 동안 작동해야 하므로 큰 발열량이 존재할 수 있다. 따라서 관절 부분에 대해서 열 모델을 구축하여 열 설계를 잘 수행해야 할 필요성이 있다.

본 절에서는 2023년에 중국에서 연구하였던 로봇팔 관절에 대한 열 설계 및 해석 내용을 소개하였다.

2.3.1 로봇팔 관절(robotic arm joint) 열 환경

Fig. 9에서와 같이 관절 부분에는 여러 개의 전자 구성품들이 있으며, 내부 발열량을 가지고 있다. 또한 전자 구성품들을 구조체가 감싸고 있으며, 구조체는 기본적으로 단열재로 덮여

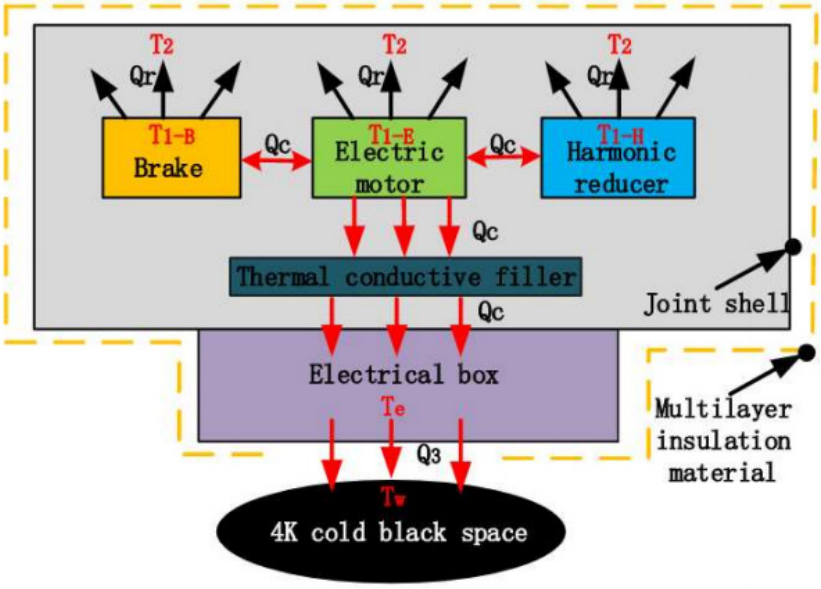

Fig. 9. Internal heat exchange model of the joint.

져 있다. 이 중 고발열 구성품이 배치된 쪽에 내부 발열량을 우주 공간으로 빼줄 수 있는 방열판이 부분적으로 배치되어야 한다.

관절 부분은 위성체 내부가 아니라 우주 공간에 직접적으로 노출되어 있으므로 다양한 우주 열환경을 직접적으로 겪게 된다. Fig. 10과 같이 외부 열원으로는 태양열원(solar flux), 지구 복사선(earth IR), 알베도(albedo)가 있으며, 내부 발열량 또한 관절 내부에 존재한다.

Fig. 11과 같이 외부 열원은 그래프를 통해 시간에 따라 얼마만큼의 외부 열원이 입사되는지를 나타내었으며, Fig. 12와 같이 구성품이 작동할 시 발생하는 내부 열원과 큰 외부 열원으로 인해 7시간 작동 시 허용온도 범위를 넘어갈 수 있기 때문에 열 설계가 필요한 것을 확인할 수 있다.

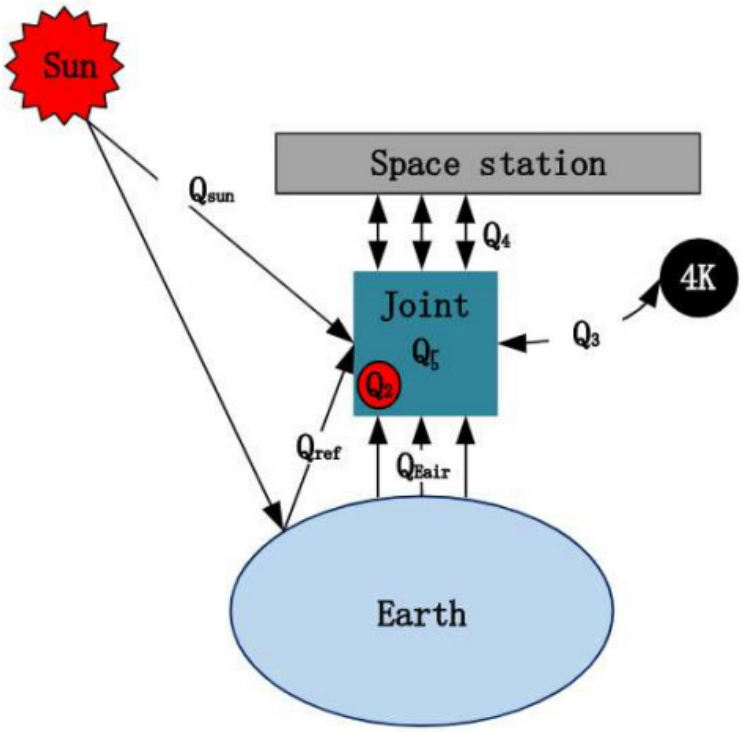

Fig. 10. Schematic diagram of the heat exchange of the joint external environment.

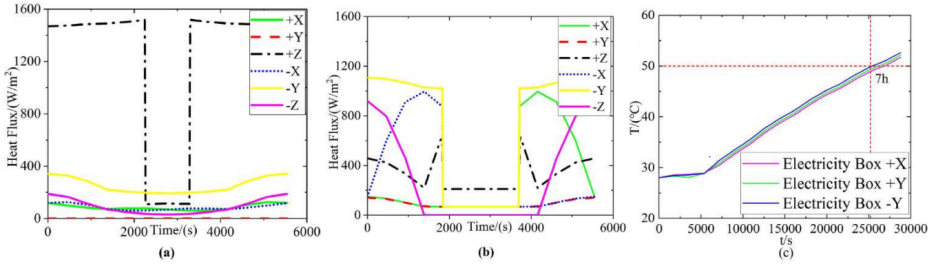

Fig. 11. External heat flux curves and electric box shell temperature curves under extreme high-temperature condition.

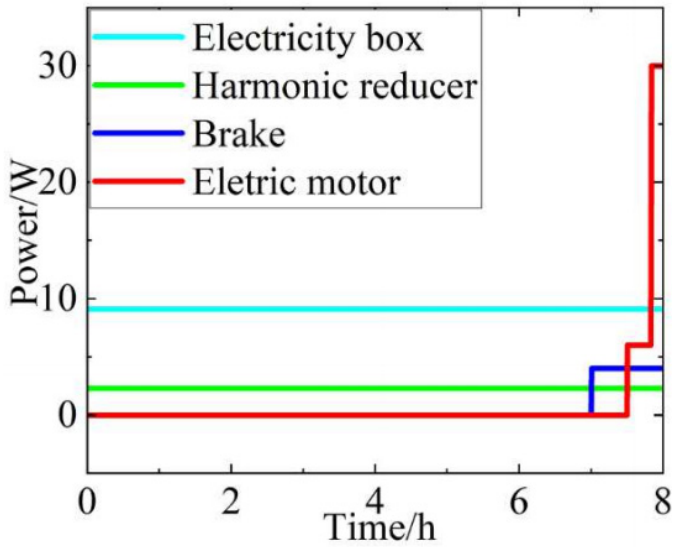

Fig. 12. Power distribution of internal heat source.

2.3.2 로봇팔 관절(robotic arm joint) 열 설계

Fig. 13과 같이 로봇팔의 관절 부분을 위한 열 모델이 구축되었으며, 총 5,676 쉘 요소, 7,378 노드, 197 열적 경로가 사용되었다. 관절 구조체의 크기는 380 mm × 350 mm × 35 mm이다. 해석 시 사용된 단위 요소의 크기는 30 mm × 35 mm이다.

열 모델 내에서 내부 열원을 방출시키기 위해 적용된 방열판 역할을 하는 흰색 페인트 영역은 여러 가지 요인들을 고려하여 결정되어야 하며, Table 8과 같이 총 4가지의 다른 크기의 코딩 영역을 고려하여 4가지 케이스의 해석을 진행하였다.

2.3.3 로봇팔 관절(robotic arm joint) 열 해석

로봇팔 관절에 대한 열 해석은 고온이었을 때와 저온이었을 때로 나누어 크게 두 가지 케이스로 진행된다. 고온이었을 때는 태양 열원, 지구 복사선, 알베도 등의 외부 열원이 크고 관절 내 구성품의 내부 발열량이 클 때이다. 또한 광학 물성치의 성능 치수가 많이 낮아진 상

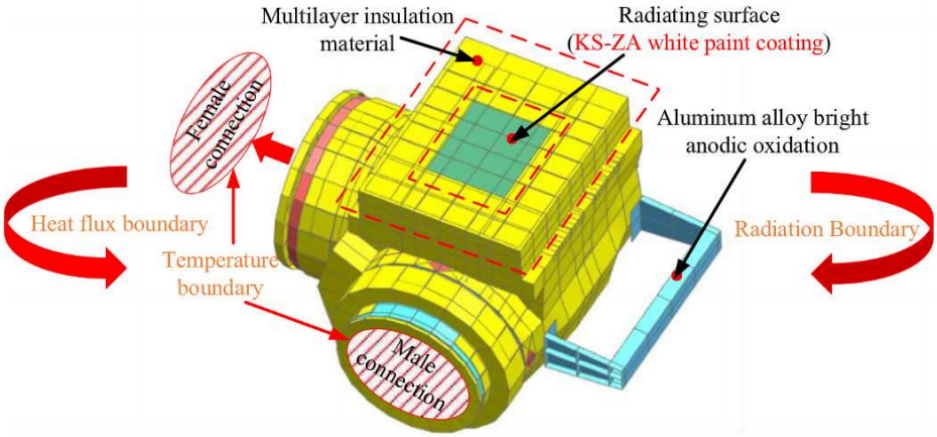

Fig. 13. Thermal model of the joint assembly.

Table 8. Dimensions of the radiating surface

Radiating surface code	Radiating surface dimension (mm × mm)
A	205 × 240
B	145 × 165
C	100 × 120
D	0 × 0

태로 가정하고 진행한다. 저온이었을 때는 반대로 외부 열원이 작고, 관절 부분이 작동하지 않아 내부 발열량이 없을 때이다. 광학 물성치는 성능이 좋은 상태로 가정한다.

저온이었을 때의 궤도 열 해석 결과는 Table 9와 같으며, 방열판 크기를 다르게 가정했던 4개의 케이스 모두 모든 구성품이 허용온도 범위 내에 있음이 확인된다. 반면 고온이었을 때는 방열판이 없는 케이스인 D의 경우 전자 구성품 하나가 허용온도인 50℃를 초과함을 확인할 수 있다(Table 10).

Fig. 14에서는 저온이었을 때 방열판의 크기가 제일 큰 케이스인 A에 대한 해석 결과이며 히터 사용량이 다른 케이스에 비해 가장 크지만 허용온도 범위를 벗어나지 않는다. 반면 고온이었을 때 방열판이 없는 케이스인 D에 대해 허용온도범위를 벗어나는 경우를 확인할 수 있다.

따라서 로봇팔 관절의 열 설계는 히터의 사용량을 최소한으로 할 수 있으면서 허용온도범위를 초과하지 않는 케이스 C가 열 설계를 위해 선정되었음을 확인하였다.

Table 9. Temperatures of components at low ambient temperature

Component	Storage temperature (℃)	A (℃)	B (℃)	C (℃)	D (℃)
Harmonic reducer	−40 to 65	−24.2	−27.3	−28.6	−30.0
Electric motor	−40 to 85	−23.2	−26.4	−27.8	−29.2
Brake	−40 to 65	−21.9	−25.5	−27.1	−28.9
Electricity box	−40 to 65	−32.1	−30.8	−30.8	−29.8
Joint shell	−40 to 65	−31.7	−33.6	−35.1	−37.3

Table 10. Temperatures of components at high ambient temperature

Component	Operating temperature (℃)	A (℃)	B (℃)	C (℃)	D (℃)
Harmonic reducer	−30 to 50	10.1	10.5	11.2	14.7
Electric motor	−30 to 80	12.4	14.4	16.1	18.7
Brake	−20 to 50	17.8	18.3	23.2	26.8
Electricity box	−30 to 50	31.8	35.9	38.9	52.8
Joint shell	−30 to 50	19.0	22.2	25.6	34.8

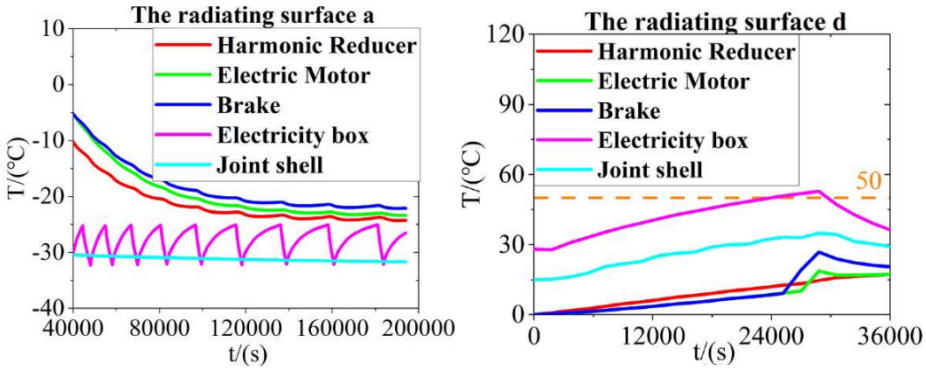

Fig. 14. Temperatures of components at low (L)/high (R) condition.

3. 로봇팔 탑재체 열 설계 및 해석 방향

3.1 열 설계 방향

로봇팔 열 설계는 로봇팔이 겪을 수 있는 모든 우주 열환경에 대해서 로봇팔에 존재하는 모든 구성품들의 온도가 허용온도범위 이내에서 유지될 수 있도록 하기 위해 이루어져야 한다. 위에서 다루었던 로봇팔에 대한 열 설계 사례들을 기반으로 열 설계에 대한 방향을 고려한 사항은 아래와 같다.

1. 로봇팔의 관절 부분에는 고발열 구성품이 존재하므로 고온 환경에서 온도가 높아질 수 있으므로 방열판 열 설계를 수행할 필요가 있다.
2. 로봇팔의 관절 부분에는 전자 구성품이므로 구조체 파트에 비해서 허용온도 범위가 낮으며 작동을 하지 않을 시에는 발열량이 없어 저온 환경에서 온도가 많이 낮아질 수 있다. 따라서 히터 설계 또한 수행되어야 한다.
3. 로봇팔의 모든 부체계 구성품들은 불필요한 열적인 상호 영향성을 줄여야 하며, 따라서 각 부체계 별로 열 설계가 이루어질 수 있도록 부체계 간에는 단열 설계를 적용한다.
4. 로봇팔의 재질 선징 및 표면 처리가 고려되어야 한다. 재질 선정은 전도 열 전달과 관련이 있으며, 표면 처리는 복사 열 전달과 관련이 있다. 재질의 선정 시 열전도율이 높고 구조적인 안정성이 낮은 재질을 선정할 경우, 열변형으로 인한 문제나 허용온도범위 이내 온도 제어에 영향이 있을 수 있다. 또한 표면 처리도 마찬가지로 열 해석을 통해 어떤 표면 처리를 할 수 있을지 결정해야 한다.
5. 로봇팔 탑재체는 기존에 고정된 상태로 임무를 수행하는 탑재체와 다르게 지속적인 움직임이 필요한 탑재체이다. 따라서 동작 가능 여부에 대한 특별한 열구조적인 요구조건이 없는지 확인이 필요하며, 이를 설계 수행 시에 반영해야 한다. 로봇팔 탑재체는 움직이는 탑재체이면서 우주공간에 직접적으로 노출된 채로 임무를 수행해야 하는 탑재체이므로 다양하고 특별한 설계변수가 많을 것으로 판단된다. 따라서 이러한 여러 요소를 동시다발적으로 고려하여 설계를 수행해야 하며, 이를 위해 최적화 알고리즘 등 최적의 설계를 수행하는 것도 고려되어야 한다.

3.2 열 해석 방향

로봇팔 탑재체의 열 설계를 수행하기 위해선 해석적으로 검증해가면서 설계에 대한 타당성을 판단하고 그 결과를 설계에 반영하는 반복적인 과정이 필요하다. 따라서 설계에 필요한 열 제어 하드웨어의 선정 및 배치를 고려함과 동시에 궤도 열 해석을 수행을 위한 아래와 같은 여러 조건들을 마련하기 위해 정보를 수집해야 한다. 아래와 같은 정보가 마련되면 열 모델 구축을 수행한다.

1. 로봇팔 탑재체 3D CAD 모델
2. 로봇팔의 모든 구성품(부품)별 열물리적 물성치
   - 열전도율(thermal conductivity, W/m^2K), 밀도(kg/m^3), 단위질량당 비열(J/kgK)
3. 로봇팔의 모든 구성품(부품)별 광학 물성치
   - 방사율(emissivity), 흡수율(absorptivity)
4. 각 구성품별 발열량 정보
   - 로봇팔 임무 모드 및 타임라인 등 임무 관련 정보
   - 임무 모드별 발열량 정보
5. 각 구성품별 허용온도범위
   - 작동 시 온도 범위(operational temp. range)
   - 미작동 시 온도 범위(non-operational temp. range)
6. LEO 상에서 로봇 위성의 궤도 형상 정보
   - 고도, 경사각, RAAN(Right ascension of ascending node) 각도 변화 여부 등의 궤도 6요소
7. 로봇팔-위성체 간 체결 조건(mounting condition)
   - i.e. 볼트 체결 or 단열 체결

또한 열 모델 구축이 완료되면 다양한 경우를 고려하여 로봇팔 탑재체의 입장에서의 최악의 고온/저온 궤도 해석 케이스를 선정하여 궤도 열 해석 형상을 구축한다.

3.3 추후 고려 사항

로봇팔의 모든 구성품에 대한 허용온도 범위 여부를 만족시키기 위해 열 설계를 수행하고 궤도 열 해석을 통해 해석적 검증을 진행하였으나, 구조적인 안정성을 위한 열적인 분포도 고려되어야 한다. 온도 구배가 심하게 되면 열변형량이 발생하게 될 수 있다. 로봇팔 탑재체는 기존의 위성 탑재체처럼 움직임이 없는 고정된 상태로 임무를 수행하는 것이 아닌 지속적으로 움직일 수 있는 동작 여부에 대한 안정성도 평가되어야 한다. 따라서 심한 온도구배가 생기지 않도록 열 설계를 고려해야 할 것이며, 열변형 또는 온도구배로 인한 구조적인 특별한 요구조건이 없는지 확인해야 할 것이다. 로봇팔이 동작 시 허용되는 관절 체결부의 열 비틀림이나 온도 구배로 인한 로봇팔의 정렬 조건 등이 확인되어야 한다.

4. 결론

본 논문에서는 다양한 궤도상 서비싱 임무를 수행하기 위해 로봇팔 탑재체를 탑재한 로봇 위성에 대해 소개하였다. 또한 여러 로봇팔 탑재체의 열 제어를 위한 열 설계, 해석에 대한 사례들을 언급하였고, 이를 통해 앞으로 개발할 로봇팔 탑재체의 열 설계 및 해석에 대한 방향을 제시하였다.

본 논문에서는 국내에서 처음으로 로봇팔 탑재체에 대한 열 설계 및 해석 방향을 제시하였으며, 앞으로 뉴스페이스 시대를 위한 로봇팔 탑재체의 개발에 대한 시야를 넓혀줄 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 경상국립대학교 2022년 과학기술통신부의 재원으로 한국연구재단 미래우주교육센터(2022M1A3C2074536)의 지원을 받았으며 이에 감사드립니다.

References

1. Boillot Y, Beere GIM, Thermal control design of the European Robotic Arm (ERA), SAE Technical Paper, No. 972526 (1997).
2. Lee CJ, Tsuyuki GT, The thermal design evolution of the Phoenix robotic arm, SAE Technical Paper, No. 2006-01-2033 (2006).
3. Zhang M, Liu C, Hu R, Wu Q, Analysis of a heat dissipation scheme for a space manipulator joint, Appl. Therm. Eng. 226, 120214 (2023). https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120214

Author Information

신 한 섭 h0611s@naver.com

과학기술연합대학원에서 2018년 석사학위를 취득하였다. 2018년부터 한국항공우주산업(주)에서 선임연구원으로 재직하고 있으며, 현재는 425SAR 군정찰 위성, L4 태양권 미션 위성 등의 열 제어 시스템 업무를 수행하고 있다. 경상국립대학교에서 박사과정 중에 있으며, 궤도상 서비싱, 로봇 위성의 열/구조 시스템 등의 연구를 수행하고 있다.

김 해 동 haedkim@gnu.ac.kr

2009년 KAIST에서 항공우주공학 박사학위를 받았다. 1996년부터 2000년까지 ㈜현대우주항공에서 아리랑위성 관제시스템 개발을 시작하였으며, 2000년에 한국항공우주연구원으로 이직하여 2022년 8월까지 22년 동안 아리랑위성 1,2,3,3A,5호 및 천리안 관제시스템 개발, 아리랑 1호,2호 실무운영 책임자, 이외 초소형위성 개발, 우주쓰레기 충돌위험 분석 및 제거 기술 개발, 궤도상 서비싱 기술 개발을 위한 연구책임자를 역임하였다. 2022년 9월부터 경상국립대학교 정교수로 부임하여 군집위성 임무/궤도 설계와 해석, 초소형위성 임무 개발, 궤도상 서비싱 및 지구 재진입, 위성폐기 기술들을 연구하고 있다.