

# 인공위성의 고효율 열제어 구현을 위한 액체금속형 가변 전도율 방열판에 관한 연구

박귀중<sup>1</sup> · 고지성<sup>1</sup> · 오현웅<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>조선대학교 항공우주공학과

## A Study on Variable Conductance Radiator using Liquid Metal for Highly Efficient Satellite Thermal Control

Gwi-Jung Park<sup>1</sup>, Ji-Seong Go<sup>1</sup> and Hyun-Ung Oh<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>Department of Aerospace Engineering, Chosun University

### Abstract

The observation satellites which uses high heat-dissipating equipment such as synthetic aperture radar (SAR) satellites require a radiator to transmit heat from the equipment into outer space. However, during cold conditions it requires a heater to maintain the temperature of equipment within the allowable minimum limit when it is not in operation. In this study, we proposed a variable conductivity radiator that changes its thermal conductivity value through movement of the liquid metal between two reservoirs based on the temperature condition. This reduces the power consumption of the heater by limiting heat transfer path to the radiator in cold condition, while effectively transferring heat to the radiator during hot condition. The feasibility of the proposed radiator was validated through comparison of the thermal control performance with the conventional fixed conductivity radiator via a thermal analysis.

### 초 록

SAR(Synthetic Aperture Radar) 관측위성과 같이 고 발열 임무장비가 다수 적용되는 경우 전장품의 발열을 효과적으로 우주공간으로 방출하기 위한 방열판의 적용이 요구된다. 그러나 위성의 식 구간에서 임무장비의 비작동 시, 방열판을 통해 지속적인 방열이 이루어짐에 따라 장비의 최소허용 온도유지를 위한 히터 적용이 불가피하게 된다. 본 연구에서는 기존 방열판에 비해 보다 효율적인 열제어를 위하여 높은 전도율의 액체금속을 이용한 우주용 가변 전도율 방열판을 제안하였다. 제안된 방열판은 탑재장비의 온도조건에 따라 두 개의 저장소 사이에서 기계식 펌프로 액체금속을 이동함으로써 열전도 특성을 가변하는 원리이다. 따라서 저온 조건에서는 방열판으로의 열전도를 차단하여 임무장비에 대한 히터 전력소모를 최소화하고, 반대로 고온 조건에서는 기존 방열판과 같이 효과적인 방열이 가능하도록 한다. 본 연구에서는 제안한 가변 전도율 방열판의 실현 가능성 입증을 위한 열해석을 실시하여 기존의 전도율이 고정된 방열판과 열적 성능을 비교 분석하였다.

**Key Words :** Synthetic Aperture Rader(영상 레이더), Space Thermal Control(우주 열 제어), Radiator(방열판), Liquid Metal(액체금속), Galinstan(갈린스탄), Thermal Analysis(열해석)

## 1. 서 론

위성의 열제어계는 극한의 우주궤도 열환경에서도 상기

의 임무장비들을 허용온도범위 내로 유지할 수 있도록 설계되어야 한다. 이를 위해 임무장비 운용에 따라 발생하는 폐열을 우주공간으로 방출하기 위해 방열판을 적용하게 된다. 대표적인 우주용 방열판으로는 OSR(Optical Solar Reflector) 및 SSM(Second Surface Mirror)이 있다. 이와 같은 방열판의 광학 물성치는 낮은 흡수율 및 높은 방사율로 고정되어 있다. 그러나 이러한 방열판은 위성의 식

구간에서 임무장비가 작동하지 않을 때에도 계속 열을 방출하기 때문에 장비의 최소허용온도 유지를 위한 추가적인 히터 전력이 필수적이다. 적국의 전략자산에 대한 원활한 감시를 위해 SAR위성이 최대한의 임무시간을 확보하기 위해서는 임무장비의 발열을 효과적으로 방열하며, 동시에 저온조건에서의 장비가 작동하지 않을 때의 열손실을 최소화함으로써 히터 전력을 줄일 수 있는 효율적인 열제어가 요구된다. 예를 들어 탑재장비의 온도조건에 따라 방열 면적, 방사율 및 전도율과 같은 방열판의 열적 특성을 조절할 경우, 상기 언급한 효율적인 열제어 및 히터 소모전력 최소화를 달성할 수 있다.

이를 위해 Osiander et al.[3]은 루버(Louver) 및 셔터(Shutter) 형태의 MEMS 가변방사율 방열판을 개발했다. 개발된 방열판은 가벼운 무게 및 소형이며, 낮은 소비전력의 장점이 있지만 발사 진동환경에서 기계적 구동부의 구조 안정성이 미흡하여 실제 위성에 적용하기에는 여전히 문제가 있다. Shimazaki et al.[4]은  $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ ,  $La_{1-y}Ca_yMnO_3$  및  $La_{1-x-y}Sr_xCa_yMnO_3$  과 같은 페로브스카이트 구조를 갖는 산화망간 기반의 스마트 재료를 개발하였다. 이 재료는 방사율이 온도에 따라 변하기 때문에 저온에서 방사율이 감소하여 장비 열손실을 줄일 수 있는 장점이 있다. Paganini et al.[5]은 온도에 따라 방열면과 평행하게 배치된 판발을 이동하며 방열면과의 접촉조건을 조절함으로써 열전도 특성을 조절하는 방식의 가변 전도율 방열판을 제안하였다.

본 논문에서는 액체금속의 높은 열전도 특성을 활용한 가변 전도율 방열판(VCR: Variable Conductance Radiator)을 제안하였다. 제안된 방열판은 탑재장비의 온도조건에 따라 두 개의 저장소 사이에서 기계식 펌프로 액체금속이 이동함으로써 열전도 특성이 가변되는 원리로 작동된다. 이에 따라 저온에서 임무장비가 발열하지 않는 조건에서는 다른 저장소로 액체금속을 이동시켜 장비에서 방열판으로의 열전도를 차단하여 장비의 열손실 및 히터 전력을 최소화할 수 있다. 반대로 고온 조건에서는 액체금속을 원래 저장소로 이동시켜 기존 방열판과 같이 효과적인 방열이 이루어지게 한다. 본 연구에서는 제안한 액체금속형 가변 전도율 방열판의 실현가능성을 입증하기 위해 상용소프트웨어인 SINDA/FLUINT 와 Thermal Desktop을 활용하여 열

해석을 수행하였다.



Fig. 1 Configuration of Liquid Metal[8]

## 2. 액체금속형 가변 전도율 방열판

### 2.1 액체금속 개요

Figure 1(a)과 같은 액체금속은 알루미늄, 철과 같은 금속에 비해 녹는점이 낮은 상온에서 액체 상태로 있는 금속을 말한다. 액체금속의 열적특성은 일반적인 액체에 비해 높은 열용량, 열전도성, 밀도를 갖기에 냉각물질로 폭넓게 이용되고 있다. 이외에도 최근 노스캐롤라이나 주립대학에서는 고체 상태에서 1V 미만의 낮은 전압만으로 스스로 형태를 변경할 수 있는 변형액체금속을 개발하였다. 이는 전자회로, 생체의료기기 개발에 응용될 수 있어 주목받고 있다[7].

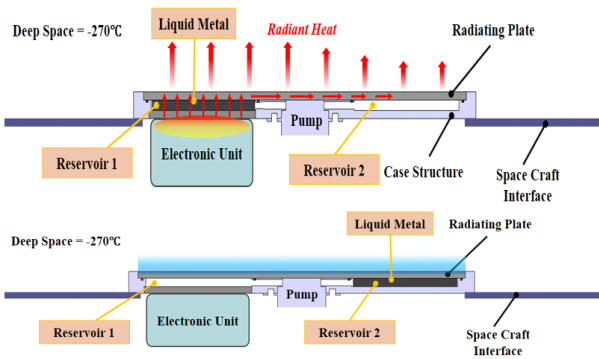
Table 1은 대표적인 액체금속으로 녹는점이 상온 이하인 수은과 갈린스탄(Galinstan)의 물성치를 나타내고 있으며, 비교를 위해 지상용 및 우주용으로도 폭넓게 적용되고 있는 히트파이프의 대표적 작동 유체중 하나인 물을 선정하였다. 이들 액체금속의 열전도율은 대체로 그 값이  $0.6W/m\cdot K$ 인 물에 비해 수십배 이상 높으므로, 기존의 물 또는 대표적인 냉각매체를 이용한 냉각장치를 액체금속으로 대체하면 보다 향상된 냉각성능을 낼 수 있다. 그러나 수은의 경우, 독성이 있어 인체에 매우 해로워 이를 대체하기 위해 갈린스탄이 개발되었다[9]. 갈린스탄의 조성비는 다른 금속과 혼합될 경우 녹는점을 낮추는 갈륨 68.5%, 인듐 21.5% 그리고 주석 10%로 구성되어 녹는점이  $-19^{\circ}C$ 이면서 무독성인 장점이 있어 수은을 대체할 액체금속으로 활용되고 있다.

이와 같은 액체금속을 방열판의 방사율을 조절하여 위성의 식구간에서 방열이 이루어지지 않도록 적용할 경우, 전

장품의 최소 허용온도 이상으로 유지할 수 있어 불필요한 히터의 전력소모를 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

**Table 1** Thermo-physical Properties of Galinstan, Mercury and Water

Material	Melting Point (°C)	Specific Heat (J/kg-K)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Thermal Conductivity (W/m-K)
Mercury	-38.87	139	13,546	8.34
Galinstan	-19	376	6440	16.5
Water	0	1.009	998	0.61



**Fig. 2** Principle of Variable Conductance Radiator

**2.2 가변 전도율 방열판의 작동원리**

Figure 2는 본 연구에서 제안한 액체금속형 가변 전도율 방열판의 개념도로, 그림에 나타난 것과 같이 총 2가지 운용모드를 가지고 있으며 고온 조건일 때 전장품 구동 시 발생하는 발열을 우주공간으로 방열하기 위해 Reservoir 1에 액체금속을 채워 방열판으로 전도가 원활하게 이루어지도록 하며 저온 조건에서 액체금속을 Reservoir 2로 이동시켜 전장품과 방열판 사이의 열전달을 차단한다. VCR은 기존에 적용된 방열판과 동일하게 높은 방사율로 고정되어 있다. 그리고 방열판과의 열전도율을 가변하기 위해 액체금속을 저장하기 위한 2개의 저장소(Reservoir)가 있다. 우선, 전장품의 고온조건에서는 전장품에서 발생하는 발열을 효과적으로 우주공간으로 방열하기 위해 저장소 1에 액체금속을 채워 방열판으로 전도가 원활하게 이루어질 수 있도록 한다. 이는 기존 방열판의 방식과 같다. 반대로 저온조건에서 전장품이 작동하지 않을 경우, 저장소 1에 액체금속이 머물러 있으면 전장품의 방열이 계속 이루어지게 된다. 따라서 중앙부의 기계식 펌프로 저장소 1의 액체금속을 저장소 2로 이동시켜 전장품과 방열판 사이의 열

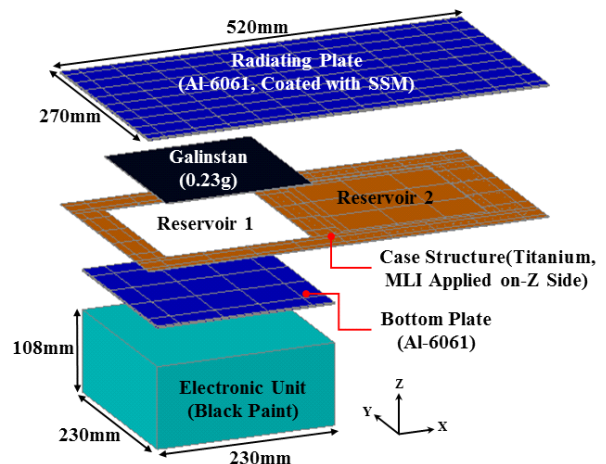
전달을 차단한다. 이렇게 할 경우, 기존의 방열판과는 다르게 전장품을 최소허용온도 이상으로 유지함에 있어서 보다 유리하며, 히터의 전력소모를 최대한 줄일 수 있다.

**3. 가변 전도율 방열판의 열설계/열해석**

**3.1 가변 전도율 방열판의 열설계 개념**

본 연구에서 제안한 가변 전도율 방열판이 최대한의 성능을 낼 수 있도록 열설계를 수행하였다. 먼저, 우주공간을 바라보는 방열판의 표면은 SSM, 그리고 내부 전장품의 겉 표면은 위성체와의 원활한 복사 열교환을 위해 일반적으로 적용되는 검정 페인트로 처리하였다. 방열판을 비롯해 전장품이 접촉되는 바닥면 판넬은 전장품의 발열을 열전도로 액체금속에 원활하게 전달하기 위해 Al-6061을 적용하였다. 그리고 케이스 구조체는 알루미늄과 반대로 열전도율이 낮은 티타늄으로 구성되며, -Z방향 표면에는 방열판과 위성체간의 불필요한 열교환을 차단하기 위해 MLI (Multi-Layer Insulator)를 적용하였다.

여기서 저장소 내부의 경우, 전술한 바와 같이 저온에서 전장품이 작동하지 않을 때 액체금속이 저장소 2로 이동된다. 이 때, 액체금속이 저장소 1에서 2로 이동할 경우에, 저장소 1은 진공상태로 복사 열교환이 주된 열전달 경로가 된다. 저장소 내부표면의 광학 물성치에 따라 전장품에 미치는 열적영향이 달라질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 열해석을 통해 최적의 코팅재료를 선정하였다.



**Fig. 3** Thermal Analysis Model of VCR

**Table 2** Thermo-optical Properties

Material	Absorptivity ( $\alpha$ )	Emissivity ( $\epsilon$ )	$\alpha/\epsilon$
SSM	0.15	0.81	0.18
Black Paint	0.95	0.89	1.06
MLI	0.05	0.05	1

**Table 3** Thermo-physical Properties

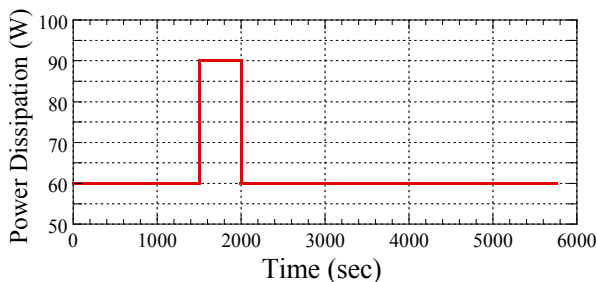
Material	Thermal Conductivity (W/m-K)	Specific Heat (J/kg-K)	Density (kg/m <sup>3</sup> )
Al-6061	154	896	2700
Titanium	21.9	540	4430
Galinstan	16.5	376	6440

**Table 4** Thermo-optical Properties Applied on Internal Surface the Reservoir

Material	Absorptivity ( $\alpha$ )	Emissivity ( $\epsilon$ )	$\alpha/\epsilon$
Black Paint	0.95	0.89	1.06
Silver Coating	0.04	0.02	2.0
Anodized Al	0.35	0.37	0.94
Gold Coating	0.48	0.82	0.58

**Table 5** Thermal Conductance Properties

Coupling Between		Value
Case Structure	Bottom Plate	0.01W/K
Case Structure	Spacecraft I/F	$1.99 \times 10^{-5}$ W/K
Case Structure	Radiating Plate	0.01W/K
Electronic Unit	Bottom Plate	2000W/m <sup>2</sup> -K
Galinstan	Radiating Plate	2000W/m <sup>2</sup> -K
	Bottom Plate (Radiation Mode)	
	Case Structure (Insulation Mode)	
Electronic Unit	Heater	

**Fig. 4** Power Dissipation Profile of Electronic Unit

### 3.2 열해석 모델 및 경계온도조건

제안된 가변 전도율 방열판의 실현가능성 입증을 위해 3.1절에 서술된 열설계 개념을 모두 고려하여 구축된 열해석 모델을 Fig. 3에 나타내었다. 열모델은 상용소프트웨어인 Thermal Desktop과 RadCAD[10]로 구축하였으며, SINDA/FLUINT를 통해 온도분포 해석을 수행하였다. 상기 소프트웨어는 수치해석에 기반을 두며, 노드에 대한 에너지평형식으로 온도분포를 예측할 수 있다. 총 노드개수는 485개이며, 액체금속을 포함한 방열판의 모든 구성요소는 Solid, 나머지 히터는 Node로 모델링하였다. 그리고 전장품의 발열은 Heat Load로 모사하였다. 열모델에 적용된 열적 광학물성치 및 재료 물성치를 각각 Table 2와 3에 정리하였다. 그리고 액체금속의 저장소를 이루는 표면에 대해서는 Table 4와 같이 총 4개의 서로 다른 열적 광학물성치 적용에 따른 해석을 수행한다.

Table 5는 열전도 모사를 위해 열해석 모델에 적용된 열전도율 값을 나타낸다. Fig. 4는 전장품의 발열프로파일을 나타내며, 평상시 60W이다가 임무수행 시에는 500초 동안 90W로 발열하게 된다. 본 연구에서 예시로 적용한 전장품의 허용온도범위는  $-15^{\circ}\text{C} \sim 55^{\circ}\text{C}$ 이다. 따라서 히터의 경우, 작동 시 전력은 20W이며 On/Off 설정치는 전장품이 장착되는 방열판 바닥면 판넬 온도 기준으로  $-10^{\circ}\text{C}/-5^{\circ}\text{C}$ 로 설정하였다.

열해석을 위한 경계조건의 경우, 해석하고자 하는 방열판이 위성에 장착되어 있다는 가정 하에 위성 구조체를 모사하기 위해 Shell로 박스형태의 모델링을 하였다. 그리고 상기 박스에 대해 저온/고온에 대한 경계 온도조건은 각각  $9^{\circ}\text{C}$  및  $33^{\circ}\text{C}$ 로 가정하였다. 또한 박스 외부는 우주공간으로 가정하여 주변온도를  $-270^{\circ}\text{C}$ 로 설정하였다. 지구로부터 반사되는 알베도, 태양복사에너지 및 위성 자체의 열량 등을 고려한 열 유입량 계산은 위성시스템 수준의 해석에서 수행되므로, 본 연구에서는 방열판에 대한 কেददा당 평균값인 9W로 가정하여 해석을 수행하였다. 상기의 조건에서 상용 S/W인 SINDA/FLUINT를 이용하여 우주에서의 전도와 복사만을 고려하여 해석을 수행하였다.

### 3.3 열해석 결과

Figure 5는 저온조건에서 전장품 비작동 시 단일 노드로 모사된 전장품에서 획득된 온도 프로파일을 나타내며, 저장

소 내부의 광학 물성치를 Silver 코팅으로 적용하였을 때를 예시로 나타낸 것이다. 비교를 위해 종래의 전도율이 고정된 방열판을 적용 시의 결과도 함께 나타내었다. 먼저 고정 전도율 방열판 적용 시, 전장품 온도는 약  $-18^{\circ}\text{C}$ 로 최저허용 온도인  $-15^{\circ}\text{C}$  미만이기 때문에 히터를 이용한 열제어가 필요함을 알 수 있다. 또한 가변 전도율 방열판 적용 시 갈린스탄이 저장소 1에 있을 경우, 고정 전도율 방열판과 유사하게 온도가  $-17^{\circ}\text{C}$ 까지 하강하지만, 저장소 2에 있을 경우에는 전장품이  $8^{\circ}\text{C}$ 로 유지되어 히터 작동온도인  $-10^{\circ}\text{C}$ 보다  $18^{\circ}\text{C}$  높기 때문에 별도의 히터를 이용한 열제어가 필요치 않음을 알 수 있다. 이러한 이유는 갈린스탄이 저장소 2에 있음에 따라 방열판으로의 열전도가 Fig. 6과 같이 차단 되기 때문이다.

반면, 고정 전도율 방열판 적용 시에는 히터 온도 설정 치에 따라  $-10^{\circ}\text{C} \sim -5^{\circ}\text{C}$  범위에서 On/Off를 반복하며 열제어가 이루어지고 있는 것을 알 수 있다. 이때의 히터 Duty Cycle을 일반적인 저궤도 위성의 고도인 550km로 가정하여 도출된 궤도주기인 약 94.57분 중에서 히터가 작동한 시간을 백분율로 계산하였다. 계산 결과, 고정 전도율 방열판 적용 시에는 전장품 온도 유지를 위한 히터 Duty Cycle은 55%인 반면, 가변 전도율 방열판 적용 시에는 Duty Cycle이 0%이다. 따라서 본 연구에서 제안된 가변 전도율 방열판을 적용할 경우 전장품에 대해 효율적인 열제어가 가능함을 알 수 있다.

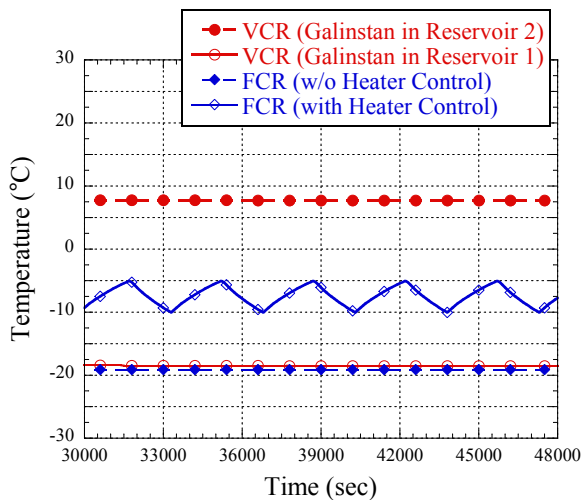


Fig. 5 Analysis Results at Cold Case When Electronic Unit is not in Operation

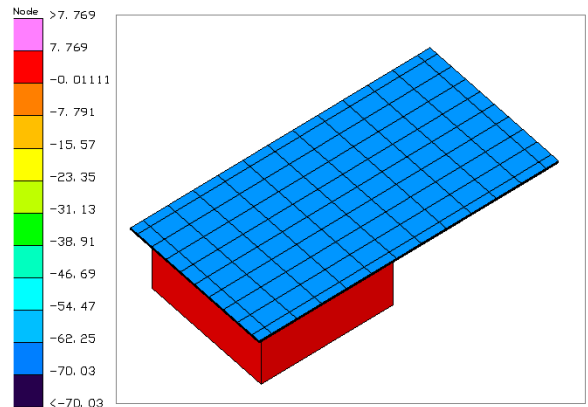


Fig. 6 Temperature Contour of VCR at Cold Case (Galinstan in Reservoir 2)

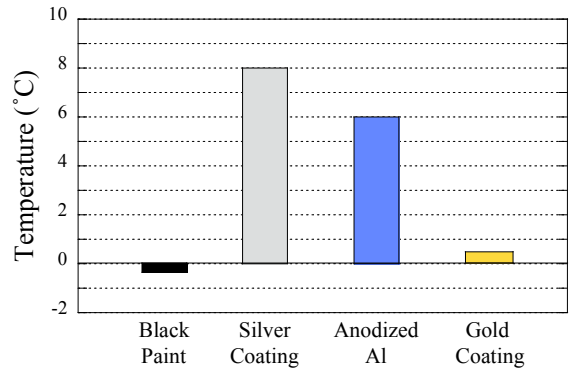


Fig. 7 Analysis Results at Cold Case When Electronic Unit is not in Operation (Various Surface Coatings on Reservoir Surfaces)

Figure 7은 Figs. 5와 6의 해석결과와 동일하게 전장품 비작동 시 저온조건에서 저장소 내부 표면에 대해 서로 다른 코팅재료를 적용함에 따른 전장품의 최저 온도를 나타낸다. 우선 Black Paint 적용 시에는 코팅재료의 높은 방사율과 흡수율로 인해 방열판과의 열교환이 활발하게 일어나기 때문에 약  $-0.5^{\circ}\text{C}$ 로 수렴되며, 4가지 코팅재료 중 가장 낮은 온도를 나타내었다. 이는 Black Paint가 저온에서 전장품의 온도유지 측면에서는 적절치 않음을 의미한다. 반면에 Silver 코팅 적용 시에 수렴된 최저온도는  $8^{\circ}\text{C}$ 로, 4가지 코팅재료 중 가장 높은 온도를 나타내므로 저온조건에서 전장품의 온도유지에 가장 유리한 코팅임을 알 수 있었다. 따라서 이후의 열해석은 모두 Silver 코팅을 적용하여 수행하였다.

Figure 8은 고온조건에서 전장품 발열 시의 해석결과를 나타낸다. 먼저 고정 전도율 방열판 적용 시에는 전장

품 온도가 약 48°C 임을 알 수 있으며, 이로부터 최고허용온도인 55°C를 넘지 않아 열제어가 적절히 수행되고 있음을 알 수 있다. 그 다음, 본 연구에서 제안한 가변 전도율 방열판 적용 시 갈린스탄이 저장소 2에 위치하여 전장품과 방열판 사이의 열전도가 차단되어 있을 경우, 전장품의 발열이 빠져나갈 수 있는 경로가 없기 때문에 온도가 최고 90°C까지 상승하여 허용온도를 약 35°C 벗어남을 알 수 있었다. 그러나 갈린스탄을 저장소 1에 위치시킬 경우, Fig. 9와 같이 갈린스탄의 높은 열전도율에 의해 전장품에서 방열판으로의 열전도가 효과적으로 이루어지기 때문에 전장품의 최고온도가 약 50°C 수준으로 낮아짐을 알 수 있다. 또한 위의 고정 전도율 방열판에 대한 분석결과와의 온도 차이는 오직 2°C이다. 따라서 제안된 가변 전도율 방열판이 의도한대로 종래 전도율이 고정된 방열판과 동등한 방열 성능을 가질 수 있음을 알 수 있다.

Table 6는 본 연구에서 제안한 가변 전도율 방열판과 고정 전도율 방열판에 대한 주요 열해석 결과를 정리한 것이다. 표로부터 알 수 있듯이 가변 전도율 방열판은 고온 조건에서 발생하는 전장품의 발열을 갈린스탄의 높은 열전도 특성에 따라 효과적으로 방열판에 전달하며, 따라서 기존의 고정 전도율 방열판과 같이 원활하게 방열이 이루어지게 된다. 이 결과로 전장품의 최대허용온도에 대한 마진은 5°C가 확보됨을 알 수 있었다. 또한 저온 조건에서 발열을 하지 않는 전장품의 온도 유지 측면에서 고정 방식을 방열판은 3°C 부족한 마진을 보였다. 이를 보완하기 위해 히터를 이용한 온도 제어 시 전장품의 온도 마진은 확보되지만, 55%에 이르는 Duty Cycle이 요구되었다. 반면에 가변 전도율 방열판 적용 시에는 23°C의 마진이 확보됨으로부터 별도의 히터 제어를 필요로 하지 않았다. 위 분석결과를 종합하였을 때, 제안된 액체금속형 가변 전도율 방열판이 열제어 측면에서 기존 고정 전도율 방열판에 비해 효율적인 열제어가 가능함을 알 수 있다.

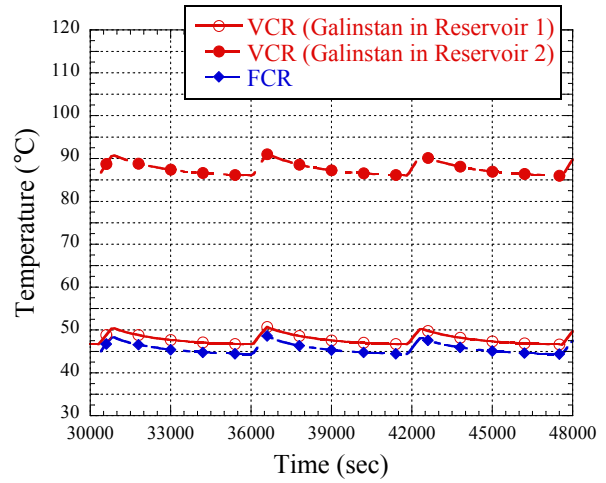


Fig. 8 Analysis Results at Hot Case When Electronic Unit is in Operation

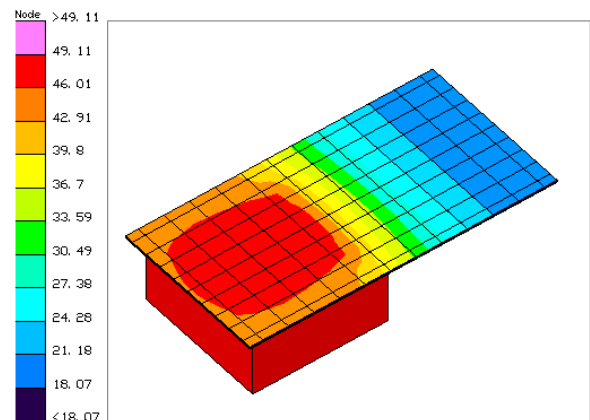


Fig. 9 Temperature Contour of VCR Hot Case (Galinstan in Reservoir 1)

Table 6 Summary of Thermal Analysis Results

Item	VCR	FCR (with Heater)	FCR (w/o Heater)
Allowable Min/Max Temperature (°C)		-15/+ 55	
Worst Cold/Hot Temperature (°C)	+ 8/+ 50	-10/+ 48	-18/+ 48
Temperature Margin (Cold/Hot, °C)	<u>+ 23/+ 5</u>	+ 5/+ 7	-3/+ 7
Heater Duty (%)	0	55	-

#### 4. 결 론

본 연구에서는 액체금속인 갈린스탄을 이용하여 임무 장비와 방열판 사이의 열전도율을 조절함으로써 고효율 열제어가 가능한 가변 전도율 방열판을 제안하였다. 제안된 방열판의 실현 가능성을 입증하기 위해 열해석을 수행하였다. 해석 결과, 저온 조건에서 장비 비작동 시에는 임무장비에 가까운 쪽의 저장소로부터 다른 저장소로 액체금속을 이동시켜 최대한 온도 유지가 가능하며, 이에 따라 히터 전력소모를 절감할 수 있었다. 또한 고온 조건에서는 다시 임무장비가 장착된 쪽의 저장소로 액체금속을 이동하여 장비 발열을 효과적으로 방열판으로 전달함으로써 기존의 전도율이 고정된 방열판과 동일한 열제어 성능을 지닐 수 있었다. 상기의 분석결과로부터 제안된 가변 전도율 방열판의 실현 가능성을 해석을 통해 입증하였다. 아울러, 본 연구에서는 제안된 라디에이터의 열적 유효성만을 해석적으로 검토하였으며 향후 연구에서는 액체금속 적용을 위해 타 금속에 대한 갈린스탄의 화학적 영향성을 비롯해 무중력 상태에서의 액체금속 이동을 위한 방법론 등을 입증할 수 있을 것으로 판단된다. 추가적으로 전장박스가 배치된 쪽의 반대편에 위치한 저장소 2는 우주공간으로의 방열을 목적으로 하지 않기에 향후 연구에서는 저장소 2의 방열판 내부 표면은 낮은 열전도율을 갖도록 코팅 또는 커버 등을 적용하여 갈린스탄이 어는점 이하로 하강하지 않도록 하는 설계가 추가되어야 할 것으로 판단된다.

#### References

- [1] <http://news.heraldcorp.com/view.php?ud=20170825000648>.
- [2] [http://www.newsis.com/ar\\_detail/view.html?ar\\_id=NISX20140401\\_0012826896&cID=10104&pID=10100](http://www.newsis.com/ar_detail/view.html?ar_id=NISX20140401_0012826896&cID=10104&pID=10100).
- [3] R. Osiander, S.L. Firebaugh, J.L. Champion, D. Farra, and M.A.G. Darrin, "Microelectromechanical Device for Satellite Thermal Control", *IEEE Sensors Journal*, Vol. 4, No. 4, pp. 525-530, Aug. 2004
- [4] S. Tachikawa, K. Shimazaki, A. Ohnishi, H. Hirokawa, Y. Shimakawa, A. Ochi, A. Okamoto, and Y. Nakamura, "Smart Radiation Device based on a Perovskite Manganese Oxide", *Proceedings of the 9th International Symposium on Materials in a Space Environment*, Noordwijk, Netherlands, pp. 16-20 Jun. 2003
- [5] D. Paganini, C. Cacco, F. Cipriani, F. Cocco, R.D. Vecchia, M. Zorzan, F. Branz, L. Olivieri, F. Sansone and A. Francesconi, "A New Concept Variable Resistance Radiator", *65th International Astronautical Congress*, Jerusalem, Israel, pp. 12 - 16 Oct. 2015.
- [6] SINDA/FLUINT User's Guide, Ver. 5.8, Network Analysis Associates, Tempe, Az, 2006.
- [7] <http://nownews.seoul.co.kr/news/newsView.php?id=20140924601006>
- [8] <https://www.amazon.com/Gallium-99-99-Metal-Melting-Liquid/dp/B00Z418HE6>.
- [9] Geratherm Medical AG, Galinstan Safety Data Sheet, 2011, <http://www.rgmd.com/msds/msds.pdf>
- [10] Thermal Desktop User's Guide, Ver. 5.8, Network Analysis Associates, Tempe, Az, 2006.
- [11] <https://en.wikipedia.org/wiki/Galinstan>
- [12] G.J Park, T.Y Park, B.G Chae and H.Y Oh, "Analytical Study of Variable Conductivity using Liquid Metal for Radiator", *The Society for Aerospace System Engineering 2017 Fall Conference*, page 263-264, 2017