

## 論文

DOI:10.5139/JKSAS.2010.38.11.1087

## 열관과 상변화물질을 일체형으로 병렬 배열한 위성용 열제어 부품 연구

김택영\*, 헌범석\*\*, 이장준\*\*\*, 이주훈\*\*\*

## Study on the Satellite Thermal Control Hardware Composed of Two Parallel Channels Working for Heat Pipe and Phase Change Material

Taig Young Kim\*, Bum-Seok Hyun\*\*, Jang-Joon Lee\*\*\* and Juhun Rhee\*\*\*

## ABSTRACT

The satellite thermal control H/W composed of two parallel channels working for heat pipe (HP) and phase change material (PCM) is suggested for the high heat dissipating component which works intermittently with short duty. In a limited point of view, the HP-PCM device is a kind of off-the-shelf component that requires no dedicated configuration and thermal designs to PCM. Therefore, it can be used with less impact on the program cost and schedule different from most of the PCM applications. In present study the typical honeycomb structure radiator applying the HP-PCM device is designed and the detail thermal math model is developed for numerical analyses. The result comparison between without and with PCM shows that the HP-PCM device redistributes the peak heat around the whole mission period through the alternate melting and freezing of PCM, and, as a result, the maximum and minimum temperatures are effectively alleviated. The drawback of PCM application due to low thermal conductivity can be successfully resolved by means of parallel arrangement of HP channel.

## 초 록

열관(HP)과 상변화물질(PCM)을 병렬로 배열한 일체형 위성 열제어 H/W를 제안하였다. HP-PCM 모듈은 제한적인 의미에서 일종의 off-the-shelf 부품으로써, PCM을 위한 별도의 열설계와 형상설계 등을 수행하지 않더라도 기존에 사용하고 있는 HP처럼 크기나 개수 등만을 설계함으로써 온도제어를 달성할 수 있도록 하였다. 주기적인 발열이 있는 부품의 온도제어를 위하여, 제안한 HP-PCM 모듈이 적용된 위성 방열판을 설계하고 상세 모델을 수립하여 수치해석을 수행하였다. 각각 PCM이 없는 경우와 PCM을 장입한 경우에 대하여 수치해석을 수행하였으며, 등가평균값의 주기적인 변화에 대한 비교분석을 통하여 PCM의 축열과 방열에 의한 열분산이 매우 효과적임을 확인하였다. HP가 작동하지 않는 경우에 대한 수치해석을 통하여 열전도도가 작은 PCM의 사용한계를 제안한 HP-PCM 모듈을 이용하여 극복할 수 있음을 확인하였다.

**Key Words** : Heat Pipe(열관), Phase Change Material(상변화물질), HP-PCM Module(열관-상변화물질 복합모듈), Satellite Radiator(위성 방열판)

† 2010년 9월 1일 접수 ~ 2010년 10월 27일 심사완료

\* 정회원, 한국산업기술대학교 기계공학과

\*\* 정회원, 한국항공우주연구원

교신저자, E-mail : bshyun@kari.re.kr

대전시 유성구 과학로 115

\*\*\* 정회원, 한국항공우주연구원

## I. 서 론

특정지역 관측이 임무인 저궤도 관측위성의 전자장비나, 통신수요량과 서비스지역에 따라 운

용 모드가 변하는 통신위성의 탑재체 및 전력계 등은 위성궤도의 비교적 짧은 기간에서만 작동하므로 부품 발열량이 단속적이고 주기적이다. 이와 같이 주기적으로 변하는 발열량에 대응하여 해당부품을 설계허용온도 내로 조절하려면 적절한 크기와 효율을 갖는 방열판이 필요하다. 궤도상에서 주기적 발열이 있는 경우에도 열적인 안정성을 고려하여 최고발열량을 기준으로 방열판의 크기를 설계하는 것이 일반적이다. 위성에 사용되는 방열판은 크기와 무게가 작을수록 유리하며, 특히, 발사비용이 1 kg당 \$20,000 정도[1]이므로 비용절감에 기여가 크다. 최근 개발되고 있는 위성은 소형 및 경량화와 저전력화가 첨단화되게 되고 있으므로 열설계도 이에 따른 대응이 필요하다.

주기적인 발열에 대한 방열판 크기의 최적화는 고상-액상 상변화물질(Phase Change Material, PCM)을 사용함으로써 달성할 수 있다. PCM의 반복적인 용해와 응고를 통하여 위성의 궤도주기에 열을 분산시킴으로써 방열판의 크기를 최적화할 수 있고, 발열이 없는 경우에도 부품온도의 급격한 저하를 방지함으로써 부품의 작동 열환경을 개선할 수 있다.

상변화물질을 이용한 열설계는 이미 수십 년 간의 연구에 의하여 개념이 정립되어 있으며, 이의 적용도 지상 장비로부터 우주 장비에 걸쳐 다변화되어 있다. 대기권에 재진입하는 우주왕복선이나 유인위성 캡슐의 노우즈콘에 상변화물질을 사용하여 냉각을 하는 것은 대표적인 예이며, 최근에는 고집적화된 컴퓨터 주 연산장치의 연산속도가 증가함에 따라 이의 냉각에도 상변화물질을 사용하려는 연구가 활발히 진행되고 있다[1, 2].

단속적으로 작동하는 위성부품에 대하여 궤도상의 반복적 열저장 및 방출을 통한 온도제어를 하고자 하는 경우에는 밀도 변화가 작은 고-액상변화 과정을 적용하여야 한다. 또한, PCM의 선택 시에는 설계온도에 상응하는 적절한 상변화온도와 큰 잠열 및 고상과 액상에서 높은 열전도도 등을 고려하여야 한다. 위성의 탑재체나 전력계 부품 등의 설계허용 온도범위는 상온을 크게 벗어나지 않으므로, 본 연구에서는 이러한 온도범위에 적합한 C<sub>18</sub> 계열의 파라핀을 대상으로 채택하였다. 일반적으로 상온에서 상변화하는 PCM은 잠열이 클수록 열전도도가 작고 파라핀도 이러한 열적특성을 나타낸다. 즉, PCM에 저장하고자 하는 부품의 열이 PCM 내부로 잘 전달되도록 하려면 단위체적 당 표면적이 최대한 크게 되도록 설계하여야 하며, 표면적 전체에 열이 분산

되도록 별도의 열전달 설계가 필요하다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 PCM이 저장되는 용기 내부에 열전달 특성이 좋은 충전제를 장입하기도 한다[1]. 이와 같이 PCM을 열설계에 적용하려면 부품의 형상과 발열특성 및 위성의 열설계 요구조건에 따라 많은 제한이 따르며, 특히, 질량/크기/경비의 절감을 달성하고자하는 본래의 목적과는 달리 별도의 설계를 통한 더 많은 낭비 요인이 발생한다. 이러한 문제로 인하여 확실하게 PCM의 사용이 필요하지 않으면 채택하지 않는 것이 위성 열설계의 통례이다.

많은 경우 위성 방열판은 최소의 무게로 강성을 얻기 위하여 벌집판형 구조체(honeycomb structure)로 설계되며, 부품의 전열 바닥면(baseplate)으로부터 얇은 벌집판 면재로 열분산이 용이하도록 벌집형 코어 내에 HP를 배열한다. 구조적 강성 요구조건에 의하여 결정되는 벌집판 코어의 두께가 삽입된 HP의 두께보다 클 경우, 부품이 부착된 방열판 내부 면재로부터 외부 면재로의 열전달을 보조하기 위한 간극판(spacer)이 HP와 일체형으로 장치되기도 한다[3].

본 연구에서는 Fig. 1에 도시한 바와 같이 간극판의 양쪽 끝을 밀봉하여 챔버를 구성하고 내부에 PCM을 충전하여 HP와 PCM의 장점을 복합적으로 이용한 HP-PCM 모듈을 새로운 열제어용 H/W로 제안하였다. 이로써 증가되는 모듈의 질량은 내부에 충전되는 PCM의 양,  $m_{PCM}$ 과 PCM 챔버를 구성하기위한 양단 밀봉재에 한정되지만, 축열이나 방열량은  $m_{PCM}\Delta h_{sl}$ 로써 궤도주기의 열분산에 상당히 큰 효과를 얻을 수 있다.

특히 본 연구에서는 PCM의 활용을 기본목적에 부합되어 적용할 수 있는 off-the-shelf의 모듈로써 제안한다. 즉, PCM을 위한 별도의 열설계와 형상설계 등을 수행하지 않더라도, 기존에 사

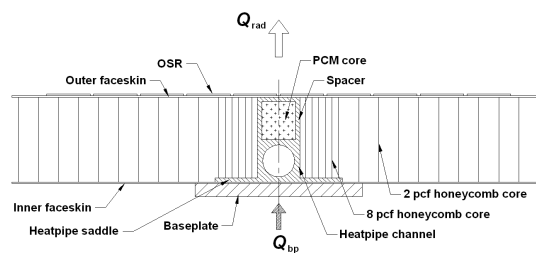


Fig. 1. Cross section of the honeycomb structure radiator applying the HP-PCM device

용하고 있는 열관(Heat Pipe, HP)과 같이 크기나 개수 등만을 설계함으로써 온도제어를 달성할 수 있도록 하였다.

PCM이 HP와 평행하게 배치되므로 작은 열전도도 때문에 필요한 열분산 문제도 특별한 설계 없이 해결된다. 간극관이 부착된 HP는 이미 많은 위성에 사용된 바 있으므로 신뢰성이 입증되었으며, 상용화되어 가격도 상대적으로 저렴하다. 간극관이 필요치 않은 경우에는 HP와 평행하게 양측면에 별도의 챔버를 구성함으로써 소기의 목적을 달성할 수 있다. 이때, 별도 챔버로 인한 질량의 증가에 대한 평가가 필요하다.

본 연구에서 제안하는 HP-PCM 모듈 개념을 요약하면, PCM 만을 적용시의 제약점을 극복하고 HP의 열분산 성능까지 포함하며, off-the-shelf 로 적용 가능한 특징을 가지고 있다. 본 연구에서는 이에 대한 기초 연구로 HP-PCM모듈의 효과를 정량적으로 평가하기 위하여, 주기적으로 발열하는 부품을 위한 전형적인 위성방열판을 제시하고 수치해석을 통하여 분석하였다. 열분산을 위하여 사용되는 HP의 간극관에 PCM을 장입한 경우와 장입하지 않은 경우의 온도변화를 비교함으로써 HP-PCM 모듈의 온도제어 효과를 검증하였다. HP가 작동하지 않는 비정상 상태에 대하여도 두 가지 모델에 대한 해석을 수행하였으며, 결과를 고찰하였다. 이러한 결과들을 토대로 HP-PCM 모듈의 적용에 대한 일반적인 특성을 검토하였다.

## II. 본 론

궤도운행 중 주기적으로 작동하는 위성부품의 온도제어를 위한 전형적인 방열판의 단면을 Fig. 1에 도시하였으며, 본 연구에서는 이에 대한 수치해석을 통하여 HP-PCM 모듈의 성능을 평가하였다. HP의 단면은 12.7 mm(w) × 12.7 mm(t)인 정사각형이다. HP 작동유체를 위한 채널은 원형으로 groove형 wick구조에 따라 내경과 외경이 각각 10.8 mm, 8.4 mm이다. 내·외부 면재 사이의 열전달특성을 향상시키기 위한 간극관은 HP에 두께 1.27 mm의 외벽으로 구성되고 간극관에 의하여 형성된 챔버에 PCM을 장입한다. PCM의 단면은 10.16 mm(w) × 11.43 mm(t)인 직사각형이다. HP와 PCM 챔버의 길이는 방열판과 같이 500 mm(l)이고, 부품 바닥면의 열응집을 최소화하기 위하여 HP 측면에 열전도 보조용 날개(saddle)를 열관과 일체형으로 장착하였다.

방열판 크기는 160 mm(w) × 500 mm(l) × 25.4 mm(t)로, 면재 두께가 0.4 mm인 AL2024이며, 특히, 외부 면재에는 태양열 흡수를 줄이고 배경 우주로의 복사열 방출이 용이하도록 OSR(Optical Solar Reflector)을 부착하였다. OSR의 IR 방사율은 0.8로 가정하였다. 내·외부 면재 사이 벌집형 코어는 2 pcf(pound per cubic feet) AL5056을 사용하였으며, 열관 날개부는 강도를 고려하여 밀도가 큰 8 pcf 코어를 사용하였다. 전열부인 부품 바닥면 재질은 AL6063으로 크기는 50 mm(w) × 290 mm(l) × 4 mm(t)이다.

본 연구에서는 PCM에 열을 축적하여 궤도주기에 따라 최대한 균일하게 분산시킴으로써 최고 온도를 낮추고 최저온도를 상승시키는 HP-PCM 모듈의 성능을 평가하는 것이 주목적이다. 이에 따라 PCM의 상변화 온도는 온도제어 대상인 전자부품의 최고/최저 허용온도 범위에 있어야 하며, 상변화 잠열도 가능한 클수록 유리하다. 또한, 화학적으로 안정하여 챔버의 재질인 알루미늄과 친화적이어야 하고, 두 상간의 밀도변화가 크지 않아야 한다.

이러한 특성에 부합되는 재료로 본 연구에서는 C<sub>18</sub> 계열의 파라핀을 적용하였다. 파라핀의 상변화 온도는 28 °C로써 열적 물성치는 각각 잠열 244 kJ/kg, 비열 2.3 kJ/kgK, 밀도 814 kg/m<sup>3</sup>이고, 액체 상태에서는 밀도가 약 5 % 감소한다[4, 5]. PCM의 열전도도는 액상과 고상의 평균이 0.25 W/mK로 매우 작다. 챔버에 장입된 PCM의 총 질량은 47 g으로 HP 채널의 질량 225 g의 20.9 %에 해당하며, 방열판의 총질량 500 g에 대하여는 9.4 %를 차지한다.

부품에서 발생하는 열은 방열판에 장착된 바닥면을 통하여 전달된다. 발열은 부품의 임무수행에 따라 주기적으로 발생한다고 가정하였다. 즉, 10 분간 100 W의 발열이 있고, 이후 50 분간은 10 W의 예열구간으로 총 발열주기는 60 분이다. 방열판의 외부표면을 통하여 우주로 복사열을 방출하고, 내부는 위성본체와 비슷한 온도를 유지하므로 내부표면을 통한 열교환은 고려하지 않았으며, 외부의 태양복사는 없다고 가정하였다.

정상상태에 대한 방열판의 온도는 다음과 같은 식으로 간단히 구할 수 있다.

$$T_{rad} = \left( \frac{\dot{Q}_{bp}}{A_{rad} \epsilon_{IR} \sigma} + T_{\infty}^4 \right)^{1/4} \quad (1)$$

식 (1)에서 최고/최저 발열량을 고려할 경우 방열판의 온도는 각각 134 °C 및 -44 °C로 예측된다. 그러나 총 주기에 대한 평균발열량에 해당하

는 25 W를 적용하면 15 °C로 각각의 경우에 큰 편차가 존재한다. 방열판의 총열용량  $(mc_p)_{rad}$ 를 대상으로 단순 비정상상태 해석을 고려할 경우 다음과 같은 식이 성립된다.

$$(mc_p)_{rad} \frac{dT_{rad}}{dt} = \dot{Q}_{hp}(t) - A_{rad}\epsilon_{IR}\sigma(T_{rad}^4 - T_{\infty}^4) \quad (2)$$

식 (2)에서 방열판의 총열용량은  $(\overline{mc_p})_{rad} = 552$  J/K이고, 부품의 발열량은 다음과 같이 시간에 따른 계단함수이다.

$$\dot{Q}_{hp}(t) = \begin{cases} 100 \text{ W} & 0 \leq t \leq 10 \text{ min} \\ 10 \text{ W} & 10 \leq t \leq 60 \text{ min} \end{cases} \quad (3)$$

식 (2)와 (3)을 시간에 대하여 단순 외재적 방법으로 적분하고 반복계산을 통하여 주기해를 구하면 Fig. 2에 도시한 바와 같은 온도변화를 구할 수 있다. 최저 및 최고온도 범위는 -17.3 °C ~ 60.3 °C로 평균 발열량에 의한 정상상태 온도인 15 °C보다 약 45 °C 높게 예측된다.

이와 같은 단순해석을 토대로 HP-PCM이 장착된 방열판의 성능을 평가하기 위하여 상세모델을 구성하였으며, 위성 열해석을 위하여 일반적으로 사용하는 상용코드인 SINDA/G V1.8을 이용하여 수치해석을 수행하였다. SINDA/G는 network 열해석 수치해석기법을 적용하고 있으며, 상변화 해석을 위한 PCHANG subroutine을 지원한다[6]. 부품의 주기적인 발열과 이에 따른 PCM의 용융 및 응고과정은 explicit forward differencing 비정상상태 해석법을 이용하여 계산하였다. 방열판은 HP의 중심축을 기준으로 대칭이므로 대칭조건을 적용하여 반만 계산영역으로 고려하였으며, 격자수는 1,682 개이고 선형/비선형 conductor는 18,016 개가 적용되었다.

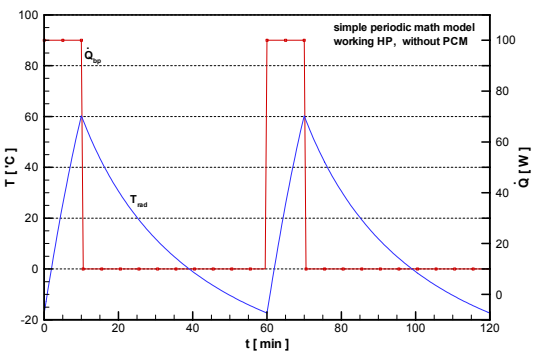


Fig. 2. Periodic variation of the radiator temperature resulted from simple math model

### III. 결 과

설계된 방열판의 방열성능을 비교분석하기 위하여 다음과 같은 4가지 경우에 대한 수치해석을 수행하였다.

- CASE 1 : HP 작동, PCM 적용하지 않은 경우
- CASE 2 : HP 작동, PCM 적용한 경우
- CASE 3 : HP 작동하지 않고, PCM 적용하지 않은 경우
- CASE 4 : HP 작동하지 않고, PCM 적용한 경우

CASE 1, 2는 HP-PCM 모듈의 성능을 HP만 있는 경우와 비교하기 위한 것이고, CASE 3, 4는 HP가 fail되어 작동하지 않을 때 PCM의 보완적 기능을 평가하기 위한 것이다. 각각의 경우에 대한 정량적인 평가를 위하여 방열판을 구성하는 각 부분에 대하여 다음과 같은 식으로 정의된 열용량 등가평균온도를 구하였으며, 이에 대한 분석을 수행하였다.

$$\overline{T}_i \equiv \frac{\int_{m_i} c_{p,i} T_i dm_i}{\int_{m_i} c_{p,i} dm_i} \quad (4)$$

CASE 1인 경우, 방열판 각 부분 온도 및 부품 발열과 방열판 외부표면에서의 복사 방출열량 등의 시간에 따른 주기적 변화를 Fig. 3에 도시하였다. 복사열을 방출하는 방열판 외부표면의 등가평균온도,  $T_{fso}$ 의 변화가 Fig. 2에 도시한 단순해석으로 구한 결과와 잘 일치하고 있다. 즉, 단순모델을 통한 해석 결과가 방열판의 온도예측에 매우 적절하게 사용될 수 있음을 보여준다. 부품 바닥면의 온도는 최고 일 때 72.5 °C로써 59.6 °C인 외부표면에 비하여 12.9 °C의 온도차가 존재

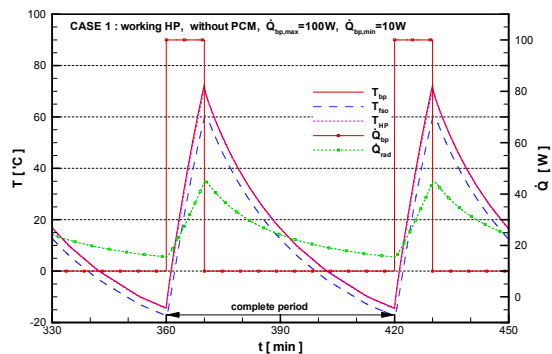


Fig. 3. Periodic variation of the temperatures and heating rates for the CASE 1

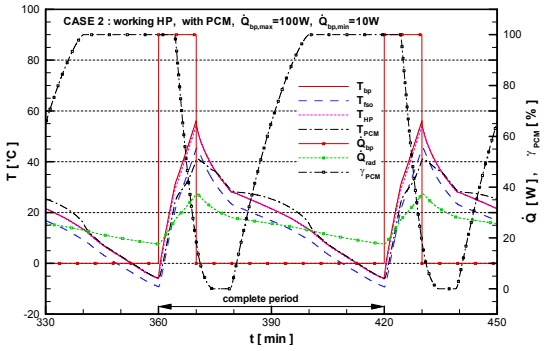


Fig. 4. Periodic variation of the temperatures, heating rates and PCM solid mass ratio for the CASE 2

한다. 최저온도는 각각  $-14.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 와  $-17.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 온도차는  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 감소한다. 이와 같은 온도차는 부품 바닥면과 외부표면 사이의 열저항에 기인하며, 발열량이 큰 최고온도에서 온도차가 더 크다. 부품의 발열주기에 따라 온도의 증감이 뚜렷하게 나타난다.

PCM을 장입한 CASE 2일 때 해석결과를 Fig. 4에 도시하였다. 온도변화는 PCM의 용융과 응고에 따라서 매우 극적으로 변한다. PCM의 용융정도를 평가하기 위하여 다음과 같이 PCM 고상 질량분율을 정의하였다.

$$\gamma_{PCM} = \frac{m_{PCM, solid}}{m_{PCM, total}} \times 100 \text{ [%]} \quad (5)$$

부품이 작동한 후 4.57 분까지는 PCM의 온도가 상변화온도인  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 보다 낮아서 고상인 PCM의 열용량에 의한 현열효과만 존재함을  $\gamma_{PCM}$ 의 변화로부터 추측할 수 있다. 이후 PCM이 용융되기 시작하면 잠열효과로 인하여 방열판의 온도증가 추세가 둔화된다. 부품이 예열모드로 전환되는 10 분이 지나면 바닥면의 온도를 포함한 방열판의 전체적인 온도가 하강하기 시작한다. 그러나 바닥면의 온도가 PCM보다 높아서 지속적으로 열이 유입되고 예열모드 4.45 분이 지나면 PCM은 모두 용융되어 액상으로 존재한다. 예열모드 8.83 분이 되면 PCM의 온도가  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$  이하로 냉각되어 응고하기 시작한다. 이로 인하여 PCM의 등가평균온도의 시간에 따른 변화가 급격히 줄고, 바닥면을 비롯한 방열판 각 부분 등가평균온도의 시간에 따른 냉각도 둔화되는 추세가 뚜렷해진다. 예열모드 29.91 분이 되면 PCM은 모두 응고하여  $\gamma_{PCM}$ 이 100 %가되고 현열효과만 존재한다. 이와 같은 온도변화에 따라

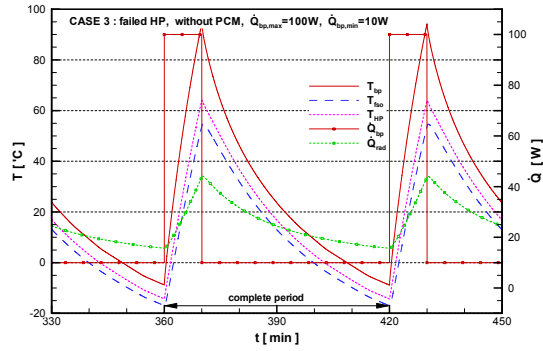


Fig. 5. Periodic variation of the temperatures and heating rates for the CASE 3

방열판 외부 표면에서의 복사방열도 영향을 받아서 상대적으로 등가평균방열량의 변화폭이 CASE 1에 비하여 작아진다. 등가평균방열량은 다음의 식으로 정의하였다.

$$\bar{Q}_{rad} = \frac{\int_{A_{rad}} \dot{Q}_{rad}(A) dA}{\int_{A_{rad}} dA} \quad (6)$$

바닥면의 최고/최저 온도범위는  $-5.9\text{ }^{\circ}\text{C}$  ~  $56.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 CASE 1에 비하여 최고온도는  $16.4\text{ }^{\circ}\text{C}$  낮아지고, 최저온도는  $11.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  높아진다. 단지 47 g의 PCM이 잠열로써 11.47 kJ의 열을 효과적으로 축적하고 방출함으로써 약  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  정도의 온도변화 폭을 감소시킬 수 있다. 만약, PCM을 사용하지 않고 최고온도를  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$  낮추려면 그 만큼 방열판의 크기를 크게 설계하여야 한다. 이는 단지 방열판 크기와 질량의 증가뿐 아니라 과도한 냉각에 의한 최저온도의 저하도 수반하므로 이에 대응하도록 별도의 히터를 설계하여 장착하여야 한다. 이에 따라 소비 전력량에도 영향을 미치고, 능동형 소자의 추가로 인한 열제어계의 신뢰도가 저하되는 문제도 발생한다.

HP에 문제가 발생하여 작동하지 않는 CASE 3의 경우에 대한 수치해석 결과를 Fig. 5에 도시하였다. CASE 1에 비하여 전체적으로 온도가 크게 상승한다. 바닥면의 최고온도는  $94.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 CASE 1에 비하여  $21.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 나 증가하였다. 바닥면과 방열판 외부표면 사이의 등가평균온도차도  $12.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서  $40.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  크게 증가한다. 외부표면에서의 등가평균방열량은 변화가 작다. 이는 국부적인 온도편차의 증가가 복사방열의 변화를 상쇄시키기 때문으로 판단된다.

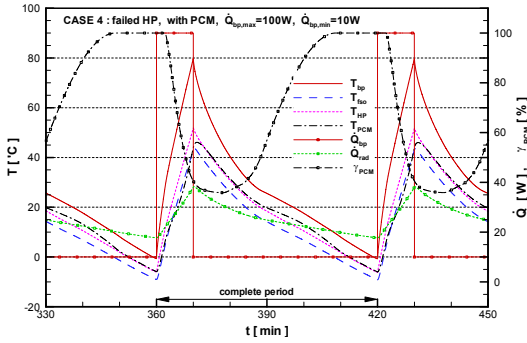


Fig. 6. Periodic variation of the temperatures, heating rates and PCM solid mass ratio for the CASE 4

HP가 작동하지 않지만 PCM이 장입된 CASE4의 수치해석 결과를 Fig. 6에 도시하였다. PCM의 상변화 효과로 인하여 바닥면 증가평균온도의 최고치가 79.7 °C로 CASE 3에 비하여 14.6 °C 정도 낮아진다. 이는 HP가 작동하는 CASE 1에 비하여도 7.2 °C 밖에 높지 않다. 부품 바닥면은 HP가 작동하지 않아도 전체온도가 거의 균일하게 되도록 설계되었으므로 증가평균온도와 국부온도의 편차가 크지 않다. 그러므로 PCM의 잠열효과만으로도 바닥면의 최고온도를 어느 정도 수준으로 유지할 수 있다. PCM의 용융과 응고과정을  $\gamma_{PCM}$ 의 변화로써 분석할 수 있다. CASE 2에서와 달리  $\gamma_{PCM}$ 는 0 %에 도달하지 못하고, 예열모드가 시작되면 변화가 급격히 감소하고 다시 상승한다. 이는 PCM의 낮은 열전도도에 의한 결과로써, HP-PCM의 결합효과를 반증한다.

HP의 작동에 의한 PCM 상변화 특성을 좀 더 자세히 파악하기 위하여 부분적인 PCM의 고상질량분율 변화를 Fig. 7에 도시하였다. 그림에서 PCM block 1은 부품의 발열이 부과되는 바닥면과 접촉하는 부분이고, block 2는 나머지 부분이다. HP가 작동하는 CASE 2에서는  $\gamma_{PCM1}$ 과  $\gamma_{PCM2}$ 가 거의 일치하며, 모두 100 %에서 0 %로 변하면서 잠열을 효과적으로 활용하고 있다. 그러나 CASE 4에서는 두 값의 변화가 크게 다르며, 특히,  $\gamma_{PCM2}$ 는 최소값이 85.5 %로써 단지 14.5 %만이 용융되어 잠열을 축적한다. 바닥면과 접촉하는 block 1은 PCM에 직접 열이 전달되므로 상변화가 잘 이루어지지만, block 2에서는 PCM 챔버의 벽을 통한 열전달에 의존하게 되기에 열전달량이 급격히 감소한다. 이로 인하여 용융되는 양이 줄어들게 되며 이를 보상하려면 HP가 작동하여야 한다.

CASE 1, 2, 3, 4의 결과를 정리하여 증가평균

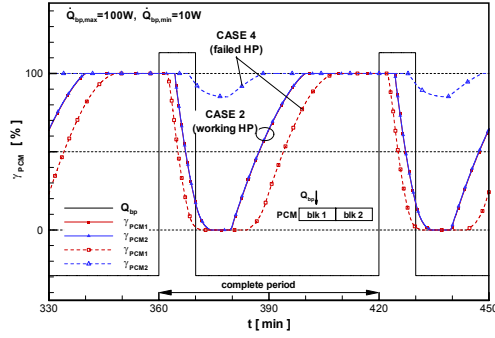


Fig. 7. Comparison of the PCM block solid mass ratio between the CASE 2 and 4

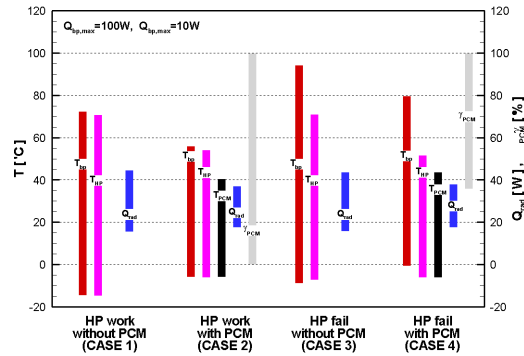


Fig. 8. Summary of the maximum and minimum values for temperatures, heating rates and PCM solid mass ratios

값의 변화폭과 최고/최소값을 Fig. 8에 도시하였다. PCM을 사용함으로써 바닥면의 최고온도는 낮아지고 최저온도는 상승하며, 이로써 최적의 온도제어가 가능하다. HP가 작동하지 않으면  $\gamma_{PCM}$ 의 최소값이 35.9 %에 머물고, 이 값만큼의 PCM을 적절히 활용하지 못한다. 즉, PCM을 효과적으로 활용하기 위하여 제안한 HP-PCM 모델의 성능이 우수함을 확인 할 수 있다.

#### IV. 결론

HP와 PCM을 병렬로 배열한 일체형 위성 열 제어 H/W를 제안하였으며, 제안한 HP-PCM 모델을 적용한 방열판을 단순 수확모델을 통하여 설계하였다. 설계된 방열판의 상세모델을 구성하고 이를 수치해석을 통하여 분석하였다. PCM의 열분산 기능과 PCM에 미치는 HP의 성능을 평가하기 위하여 본론에 언급한 바와 같은 CASE 1, 2, 3, 4 등 4가지 기능에 대한 수치해석을 수

행하였으며, 증가평균값의 주기적인 변화를 고찰하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 방열판 총질량의 9.8 %에 해당하는 PCM의 질량으로 방열판 크기의 변화 없이 바닥면의 증가평균온도 변화폭을 30 °C 감소시킬 수 있다.

(2) 이러한 증가평균온도 변화폭의 감소는 PCM에 11.47 kJ의 열이 축적되거나 방출되는 과정을 통하여 전체 작동주기에 걸쳐 발열량을 분산시키는 효과에 기인한다.

(3) PCM의 낮은 열전도도를 보완하기 위하여 HP와 병렬 배열된 챔버를 제시하였으며, HP가 작동하지 않는 경우와 결과를 비교함으로써 그 효과를 검증하였다. PCM 챔버는 본 연구에서 고려한 바와 같이 HP의 열전달 보조용으로 이미 존재하는 간극관을 이용하거나, HP의 양측면에 별도로 HP와 병렬되게 채널형 챔버를 설치하여도 된다.

(4) 본 연구에서 제안한 HP-PCM 모듈은 제한적인 의미에서 off-the-shelf 부품으로써, PCM을 위한 별도의 열설계와 형상설계 등을 수행하지 않더라도, 기존에 사용하고 있는 HP처럼 크기나 개수 등만을 설계함으로써 온도제어를 달성할 수 있도록 하였다.

## 후 기

본 연구는 한국항공우주연구원 위성다기능 구조체 핵심기술 연구 과제의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 1) Gilmore, D. G., *Spacecraft Thermal Control Handbook, Volume I: Fundamental Technologies*, 2nd Ed., The Aerospace Press, 2002, pp. 373~402.
- 2) Pal, D. and Joshi, Y. K., "Thermal Management of an Avionics Module Using Solid-Liquid Phase-Change Materials", *J. Thermophysics and Heat Transfer*, Vol.12, No. 2, 1998, pp. 256~262.
- 3) TAA Supporting Documentation for Course No. 2006, *Technical Documentation, Space System/Lorel*, 1996.
- 4) Zalba, B., Marin, J. M., Cabeza, L. F., and Mehling, H., "Review on Thermal Energy Storage with Phase Change: Materials, Heat Transfer Analysis and Applications", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 23, 2003, pp. 251~283.
- 5) Farid, M. M., Khudhair, A. M., Razack, S. A. K., and Al-Hallaj, S., "A Review on Phase Change Energy Storage: Materials and Applications", *Energy Conversion and Management*, Vol. 45, 2004, pp. 1597~1615.
- 6) *SINDA/G User's Guide*, 3rd Ed., Network Analysis Inc., 1996.