

## 論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 44(4), 373-379(2016)

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2016.44.4.373>

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

## 상변화물질과 열관을 병렬 조합한 위성부품 열제어장치의 수치해석적 연구

신윤섭\*, 김태수\*, 김택영\*\*, 서영배\*\*\*, 서정기\*\*\*\*, 현범석\*\*\*\*\*, 전형열\*\*\*\*\*

## Numerical Study on the Thermal Control Device for Satellite Components Using the Phase Change Material Combined with Heat Pipe in Parallel

Yoon Sub Shin\*, Tae Su Kim\*, Taig Young Kim\*\*, Young Bae Seo\*\*\*, Jung-gi Seo\*\*\*\*, Bum-Seok Hyun\*\*\*\*\* and Hyeong Yul Cheon\*\*\*\*\*

Department of Mechanical Engineering, Korea Polytechnic University\* \*\*

Samjintech\*\*\*, Korea Advanced Institute of Science and Technology\*\*\*\*

Korea Aerospace Research Institute\*\*\*\*\*

## ABSTRACT

The thermal control device for the periodic working component combined solid-liquid phase change material (PCM) with heat pipes is designed and numerically studied. Due to high latent heat and retaining constant temperature during melting process the component peak temperature, not withstanding small radiator size, is reduced. The warm-up heater power consumption to keep the minimum allowed temperature is also cut down since the accumulated thermal energy is released through the solidification. The thermal buffer mass (TBM) made of Al can give the similar effect but the mass and power consumption of warm-up heater should increase compared to PCM. The amount of PCM can be optimized depending on the component heat dissipation and on/off duty time.

## 초 록

주기적 단속적으로 작동하는 위성부품의 열제어를 위하여 고상-액상 상변화물질(PCM, Phase Change Material)과 열관을 병렬로 결합한 열제어장치를 제안하였으며, 이의 성능을 수치해석을 통하여 검증하였다. 상변화 중 큰 잠열과 일정하게 유지되는 온도에 의하여 작은 방열판 면적에서도 부품의 최고온도를 제어할 수 있으며, 냉각기에는 PCM에 축적된 에너지가 방출됨으로써 보온히터 소모전력을 절약할 수 있다. 동일한 형태의 Al TBM(Thermal Buffer Mass)을 사용하면 비슷한 효과를 기대할 수 있으나, 질량과 보온히터의 소모전력이 증가하므로 PCM에 비하여 비효율적이다. 설계된 PCM 열제어장치는 발열량과 작동시간에 따라 그 양을 최적화할 수 있다.

**Key Words** : Phase Change Material(상변화물질), Heat pipe(열관), Latent Heat(잠열)

## I. 서 론

관측용으로 발사되는 대부분의 위성은 관측임무를 주기적 또는 단속적으로 수행한다. 즉, 궤도의 특정위치에 있거나 하루 중 특정한 시간대에서 관측을 수행하게 된다. 이에 따라 관련된 부품들도 해당된 시간대에 작동하므로 열설계 시에 이러한 특성을 반영하여야 한다. 이와 같이 주기적으로 작동하는 부품의 경우 단일궤도에서 작동시간은 5~20% 정도이고, 대부분의 운영모드에서는 대기상태를 유지한다. 부품의 작동기에 발열이 있고 대기상태에서는 거의 발열이 없으므로 이러한 부품에 대한 열설계는 비정상상태를 고려하여야 한다. 광학장치와 같이 발열량이 크고 부품의 온도제어조건이 엄격하면 열설계 시 매우 까다로운 조건을 요구하게 된다. 큰 발열량에 대하여도 최고온도가 설계허용범위를 만족하려면 방열판이 충분히 넓어야 하지만, 발열시간보다 5~20배는 긴 대기모드에는 방열판을 통한 과냉각이 진행되므로 최저온도조건을 유지하기 위해 보온히터의 작동이 필요하다. 이와 같이 방열판의 크기가 커짐에 따라 질량과 히터 소모전력이 증가하면 전체 시스템의 질량이 증가하게 되므로 비효율적인 설계가 된다[1, 2, 3].

주기적으로 작동하는 위성부품에 대한 효율적인 열설계 안으로써 본 연구에서는 고상-액상 상변화물질(Phase Change Material, PCM)의 잠열을 이용한 열제어장치를 제안한다. PCM의 용해과정 동안 잠열 축적에 의하여 온도는 일정하게 유지되므로 부품과 열적으로 연결하면 발열시간 동안 온도상승을 지연할 수 있으며, 이에 따라 방열판의 크기를 줄일 수 있다. 한편, 냉각기에는 PCM이 응고과정 동안 축적된 열을 방출하므로 보온히터의 소모전력을 절약시킨다[2, 3, 4].

PCM의 용해 및 응고과정에서 잠열을 이용한 축열장치는 이미 많은 분야에서 실용화되어 사용되고 있으며, 신뢰성도 높은 것으로 알려져 있다[5, 6, 7]. 상변화가 진행되는 과정 중 PCM은 열역학적으로 포화상태로써 온도가 일정하게 유지되며, 이는 가열과정에서도 온도의 상승을 억제할 수 있는 중요한 열제어 특성에 해당한다[1, 3, 4]. 본 연구에서는 PCM을 이용한 축열보다는 온도상승의 억제를 주요한 연구대상으로, 위성용 발열부품의 열제어 설계에 적용하였다. 일반적으로 위성에서 사용되는 발열부품의 작동허용온도 범위는  $-10\sim 45^{\circ}\text{C}$  정도이며, 적용하고자 하는 PCM의 상변화온도는 이러한 온도범위에 있어야 한다. 상변화온도가 기술한 바와 같이 상온인 물

질들은 C, H를 포함한 파라핀계열의 화합물이 주를 이루고, 열전도도가 매우 낮다는 단점이 있다. 즉, PCM 내부로 전열이 잘 될 수 있도록 설계하지 않으면 부품으로부터의 방열을 방해하여 급격한 온도상승을 초래한다.

본 연구에서는 PCM의 단점인 낮은 열전도도를 개선하기 위하여 부품과 방열판을 열적으로 연결하는 열관에 PCM을 병렬 조합한 형상을 설계하였다. 이러한 설계는 PCM의 형상이 부품의 형상과 무관하므로 모듈화 설계가 가능하다는 장점도 있다. 즉, 여러 가지 임무에 대하여 PCM을 적용할 때, 각각의 임무에 대하여 별도의 설계와 검증절차를 거치지 않아도 되므로 경제적이다.

제안한 PCM 열제어장치(PCM Thermal control Device, PCMTD)의 성능을 분석하고 그 효과를 검증하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 설계형상에 대한 상세 열해석 모델을 개발하고, 상용 CFD code인 FlowEFD를 이용하여 해석을 수행하였다. PCM의 추가는 열저장 능력의 보완을 의미한다. 이러한 기능은 단순히 질량을 추가하여 열용량을 증가시킴으로써 달성할 수 있다. 이와 같은 열적완충질량(Thermal Buffer Mass, TBM)을 적용한 관측위성이 현재 다수 작동하고 있다[3]. 본 연구에서는 제안한 PCMTD의 용량과 동등한 성능을 낼 수 있는 TBM의 질량에 대한 매개변수적 연구를 수행하였다. TBMTD에 대한 상세 열해석 모델을 개발하고 이의 크기에 대한 다수의 수치해석을 수행함으로써 동등한 성능을 가지는 TBM의 질량을 산출하였다. 향후, 실험결과와 수치해석 결과를 비교함으로써 설계내용에 대한 재검증을 수행할 예정이다.

## II. 설계형상 및 수치해석 모델

기술한 바와 같이 PCM을 적용할 경우 부품의 발열이 PCM 내부로 잘 전달될 수 있도록 설계하는 것이 매우 중요하다. 이를 위하여 Fig. 1에 도시한 바와 같은 새로운 형상을 설계하였다. 일반적으로 PCM을 사용할 경우 부품과 방열판 사이 열회로 상 직렬이 되도록 설치함으로써 부품의 열이 PCM을 통과한 후 방열판으로 전달되게 설계한다. 이 경우 PCM의 낮은 열전도도 때문에 형상설계에 제한이 따르며, 부품의 모양과 위치에 따라 PCM의 설계도 변한다.

그러나 본 연구에서 제안한 형상에서는 부품과 방열판 사이에 열관을 설치하고 이들과 병렬로 PCM을 열관에 설치함에 따라 부품으로부터 방열판으로의 열저항이 증가하지 않는다. Fig. 2에

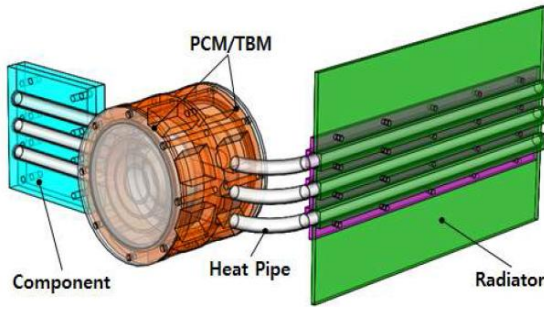
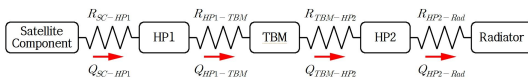
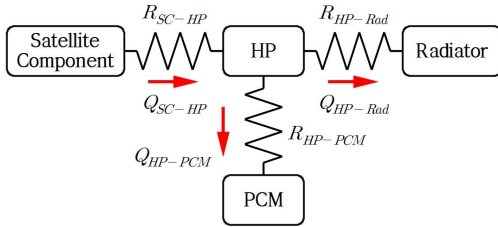


Fig. 1 Configuration of PCMTD



(a) Serial connection



(b) Parallel connection

Fig. 2. Thermal network for design configurations

는 일반적으로 사용되는 PCM과 TBM의 열회로와 본 연구에서 제안한 PCMTD의 열회로를 도시하였다. 부품의 입장에서는 방열판 외에 PCM으로 새로운 열적경로가 병렬로 추가된 상태이므로 방열 성능이 증가하였으며, 상변화과정 중 PCM의 온도가 일정하므로 부품과의 온도차가 유지되어 발열이 끝날 때까지 열전달이 용이하다. 즉, PCM을 설치하지 않았을 때에 비하여 방열판의 면적을 소형화할 수 있다. 부품 휴지기에 발열이 없으므로 부품의 온도가 하강하기 시작한다. 휴지기에 PCM으로부터 열이 방출되면 방열판의 냉각속도가 늦어지고 부품의 냉각도 지연되므로 보온히터의 사용시간이 단축되어 소모 전력을 절감할 수 있다. 더불어, PCM은 열관에 직접 장착되므로 부품에 따른 기본적인 형상의 변화가 요구되지 않으며, 다만 용량의 증감을 위하여 원통의 높이만 가감하면 된다. PCM 대신 TBM을 사용하여도 원하는 효과를 달성할 수 있으나, 잠열 대체에 필요한 질량 증가가 요구된다. 수치해석을 위하여 부품의 주기적인 동작특성

Table 1. Specifications of PCMTD and TBMTD

Type	Mass [g]		Periodic working part			
	PCM	container	total	on-duty	off-duty	heat
PCM	266	1,338	1,604	600s	5,400s	80W
TBM	-	-	3,514			

과 이 때 적용한 PCM 및 TBM의 질량을 Table 1에 정리하였다. 발열량 80W인 부품이 6,000s 동안 주기적으로 작동한다. 대기모드에서는 부품에 별도로 장착된 threshold 13°C/15°C, 발열량 50W인 보온히터가 최저온도를 유지시킨다.

부품의 작동허용온도는 14°C~29°C로 가정하였으며, 이에 따라 이 범위에서 상변화하는 PCM을 선정하였다. 파라핀계 물질로 상변화온도가 18°C인 n-hexadecane은 화학적으로 안정하며 제안된 부품의 온도제어에 적합하다. PCM의 비열과 열전도도는 고상(s)과 액상(l)일 때 값이 다르다. 고상일 때 열전도도는 크고 비열은 작다. 각 상에 대한 물성치를 Table 2에 제시하였다. PCM의 열전도도는 고상/액상일 때 모두 낮으므로 이를 보완하기 위하여 PCM을 충전하는 용기 내부에 동심형으로 3개의 전열관을 설계하였으며, 이를 수치해석에 반영하였다. PCM과 더불어 Al6061로 제작된 TBM에 대하여도 해석을 수행하였으며, 열적물성치를 Table 2에 정리하였다. 미소중력조건인 우주에서 작동을 전제로 설계함에 따라 액상인 PCM의 자연대류는 무시하였다.

부품과 방열판을 연결하는 열관은 총 3개로 구성된다. 열관은 관벽, Cu 파우더를 소결 성형한 워 및 내부 유체의 구조로 상세하게 모델링하였으며, 각각의 열적물성치를 Table 2에 정리하였다. PCM 충전용기와 방열판은 TBM과 동일한 재질인 Al6061로 가정하였다. 방열판의 복사방사율은 0.85로써 온도 3K인 배경우주로 복사열을 방출한다고 가정하였으며, 방열판 전면을 제외한 모듈의 모든 부분은 MLI(Multi-Layer Insulation)로 단열처리 된다.

Table 2. Thermophysical properties for PCM and TBM

Material	n-Hexadecane	Al6061
Melting point [°C]	18.0	-
Heat of fusion [J/kg]	230,000	-
Specific heat [J/kg·K]	1,680(s)/2,310(l)	980
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	780	2,770
Thermal conductivity [W/m·K]	0.21(s)/0.14(l)	170.0

Table 3. Thermophysical properties for the components of heat pipe

Material	wall	wick	vapor
Specific heat [J/kg·K]	385	774	1,874
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	8,933	4,976	0.0172
Thermal conductivity [W/m·K]	401	2.43	14,000

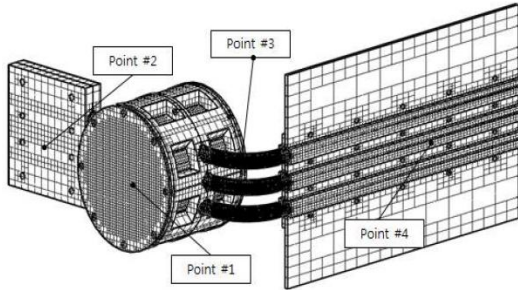


Fig. 3. Grid system for detail thermal model

기술한 모든 부분을 반영하여 수치해석을 위한 상세열해석 모델을 개발하였으며, 이의 격자계를 Fig. 3에 도시하였다. 우주의 미소중력하에서는 자연대류가 없으므로 유동은 고려하지 않았으며, 전도열전달과 방열판을 통한 복사열전달을 해석하였다. 상변화잠열은 PCM의 비열을 Fig. 4에 도시한 바와 같이 온도에 따른 함수로 처리함으로써 해석하였다. 이 때  $c_{p,m}$ 은 다음과 같은 식에 의하여 정의 된다.

$$c_{p,m} = \frac{1}{2}(c_{p,s} + c_{p,l}) + \frac{h_f}{\Delta T} \quad (1)$$

PCM의 열전도도 또한 고상과 액상일 때 Fig. 4에 도시한 바와 같은 온도의 함수로써 고려하였다. 각 상에서의 물성치는 Table 2에 정리한 값을 적용하였다. 도표에 제시한  $\Delta T$ 는 작은 값을 사용하는 것이 실제 물성을 반영하는데 부합되지만 수치해석 시 수렴성과 관계되므로 한계가 있다. 예비해석에서  $\Delta T$ 에 대한 매개변수 해석을 수행하였으며, 결과로 1.0°C를 적용하였다. 열관에 대하여도 Table 3에 제시한 물성치를 사용하여 관벽, Wick, 작동유체에 대한 상세모델을 구성하였다. 본 연구에 적용한 수치해석 모델의 총 격자수는 320,218개로 예비해석에서 격자수 변화에 따른 해의 변화를 검증하였다. 그림에서 나타난 point #1~4는 주기적인 온도변화를 추적하기 위한 위치이다.

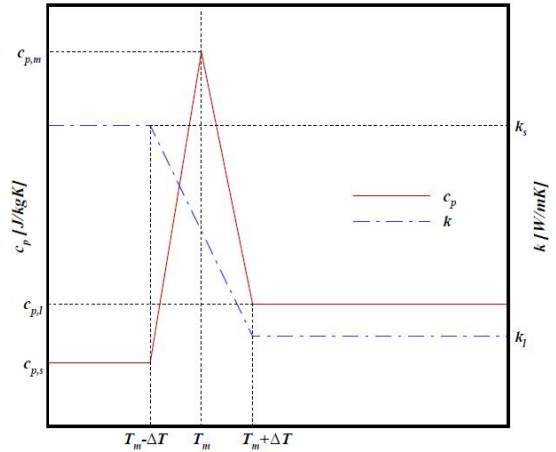


Fig. 4. Temperature dependent thermophysical properties of PCM

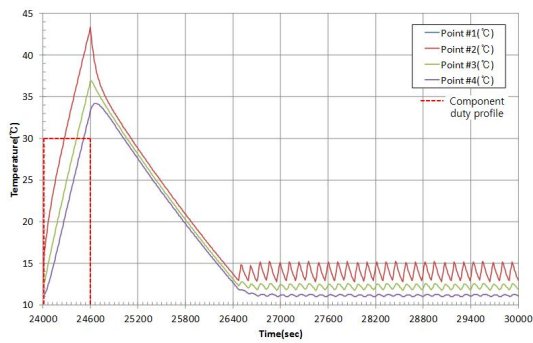
### III. 결과분석 및 토의

설계한 PCMTD의 열성능을 검증하기 위하여 다음과 같은 4가지 경우에 대한 해석을 수행하였다.

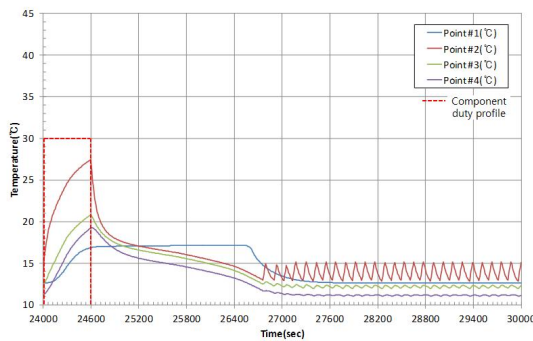
먼저, PCM이나 TBM없이 열관만 설치된 경우로서, 이는 PCM과 TBM의 축열 및 방열효과를 검증하기 위한 기본적인 비교자료에 해당한다. 다음으로 설계한 PCM을 장착한 경우에 대한 해석을 수행하였다. 3번째로 PCM 대신 TBM을 설치한 경우로 설계된 PCM과 동일한 형상과 부피의 TBM에 대한 해석을 수행하여 결과를 비교하였다. 최종적으로 설계한 PCM과 동일한 열적성능을 갖기 위한 TBM의 크기를 찾기 위한 매개변수 해석을 수행하였다.

언급한 3가지 경우에 대하여, Fig. 3에 나타난 point들의 시간에 따른 온도변화를 Fig. 5에 도시하였다. 모든 경우에 대하여 온도변화가 완전한 주기적인 형태를 유지할 때, 한 주기를 취한 결과이다. PCM이나 TBM이 없으면 (a) 부품(#2)의 최고온도는 발열말기에 43°C까지 상승한다. 열관과 방열판도 함께 급격한 온도상승을 나타낸다. PCM과 TBM의 온도 monitoring point인 #1은 그림에서 존재하지 않는다. 부품의 작동이 멈추고 대기모드에 들어서면 급격한 냉각이 시작되고 약 1,900s 후에 최저 허용온도인 14°C에 도달한다. 이 때 부터 보온히터가 작동하며, 온도는 히터의 set point인 13°C~15°C 사이에서 진동한다.

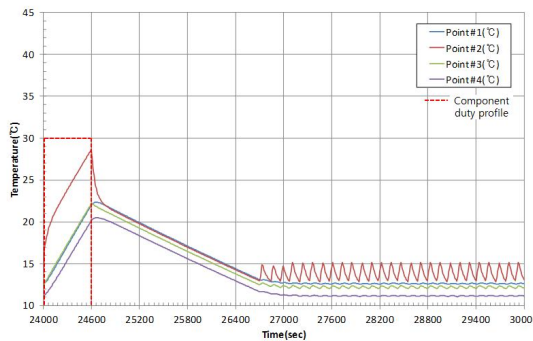
히터는 다음 입무수행주기까지 약 3,500s동안 작동한다. 결과적으로 열관만 장착되면 최고온도가 허용온도를 초과하므로 방열판의 크기를 넓히는 설계변경이 요구된다.



(a) without PCM or TBM



(b) with PCM



(c) with TBM

Fig. 5. Periodic temperature variations for the monitoring points of PCMTD

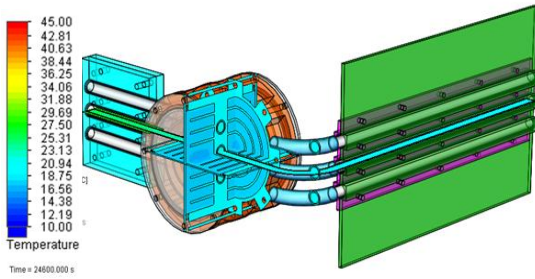
PCM을 설치하면 (b) PCM의 상변화에 의한 온도변화를 뚜렷이 확인할 수 있다. 발열초기에 PCM의 상변화 온도에 도달하기 전에도 부품의 온도상승이 (a)에 비하여 완화된다는 것은 PCM의 열질량 추가효과로 전체 모듈의 시상수가 증가하였기 때문이다. 약 180s 이후에 PCM의 용해가 시작되고, 600s 후 부품의 발열이 종료돼도 용해가 지속된다. 이는 발열이 없어도 부품의 온도가

PCM의 온도보다 높아서 여전히 부품으로부터의 열전달이 존재하기 때문이다. PCM의 용해로 인하여 부품의 온도상승 기울기가 급격히 감소하고 최고온도는 약 27.5°C로 (a)에 비하여 15.5°C 낮아서 허용온도를 만족한다. PCM의 온도가 상변화 온도인 18°C를 유지함에 따라 열관과 방열판의 온도변화도 상대적으로 감소한다. 부품의 작동이 종료돼도 PCM의 용해는 지속되며, 온도하강 기울기는 (a)보다 작다. 시간이 지나 그래프 상 25,200s 부근에서 부품의 온도가 PCM의 온도보다 낮아지는 역전이 발생하며, 이때부터 PCM으로부터 열관으로 방열이 나타나며 PCM의 응고가 시작된다. 대기모드 시작 후 1,908s가 되면 PCM의 응고가 완료되고, 2,160s가 경과하면 보온히터가 작동하기 시작한다. 주기당 보온히터의 작동시간은 3,240s로 (a)에 비하여 260s 단축되며, 히터의 소비전력도 절감된다. PCM의 온도변화 (point #1)로 볼 때, 설계한 PCM이 모두 용해하지 않는 것으로 판단된다. 최적의 PCM 양을 설계하려면 PCM 내부의 용해과정에 대한 분석이 필요하며, Fig. 6에서 기술하였다.

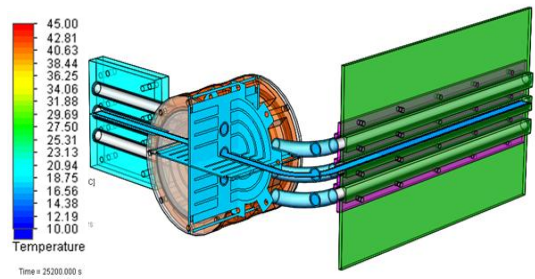
PCM과 동일한 부피의 TBM을 장착한 경우(c), 최고온도는 28.5°C로 (a)보다 14.5°C 낮지만 (b)보다는 1°C 높다. TBM에서는 상변화를 기대할 수 없으므로 이러한 온도강하는 전적으로 열질량의 추가에 따른 모듈의 시상수 증가에 기인한다. TBM의 질량은 총 2,280g으로 PCM 1,600g에 비하여 680g 무겁다. 그럼에도 최고온도는 1°C 높으므로 PCM을 사용하는 것이 효율적임이 명확히 확인된다. 더불어 PCM은 그 양이 현재 설계된 것보다 적어도 되므로 질량감소 효과는 더 크다. 대기모드에서 부품과 TBM 사이의 온도역전은 존재하지 않으며, 임무수행 말기에서 부품과 TBM간 큰 온도차 때문에 대기모드가 시작되면 부품의 급격한 냉각이 나타나지만 이들의 온도가 거의 동일해지면서 냉각속도가 감소한다. 보온히터의 작동시간은 (b)보다 약 80s 정도 길어서 PCM인 경우 히터 소모전력을 최소화 할 수 있다. 기술한 바와 같이 PCM의 질량을 최적화한다면 (b)에서 소모전력은 더욱 감소할 것이다.

PCM의 용해와 응고과정을 자세히 검토하기 위하여 몇 가지 시간대에서 PCM 내부의 온도분포 변화를 Fig. 6에 도시하였다. PCM을 통과하는 중앙 열관의 내부단면과 PCM의 내부 단면을 도시하였다. 발열이 종료되는 24,600s에서 PCM 중심부 온도가 상변화 온도인 18°C보다 낮아서 PCM의 내부는 완전한 상변화가 이루어지지 않았음을 확인할 수 있다. 임무수행 종료 후 600s

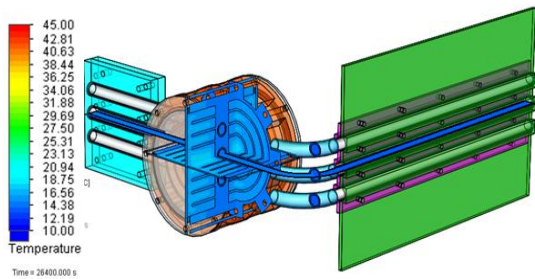




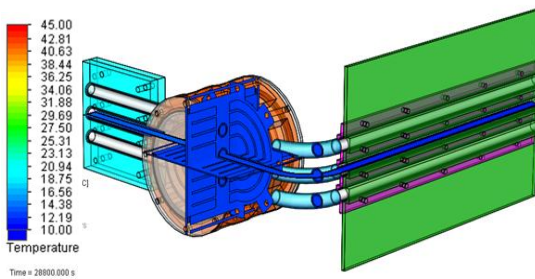
(a) at  $t=24,600$ s



(b) at  $t=25,200$ s



(c) at  $t=26,400$ s



(d) at  $t=28,800$ s

Fig. 6. Instantaneous temperature distributions

가 지난 25,200s에서 부품과 PCM의 온도 역전이 발생하였으며, 이때의 내부온도분포를 도시하였다. PCM의 전체적인 온도가 18°C에 도달하였으며, 비로써 용해가 완료되었음을 알 수 있다. 즉, 약 600s 동안의 용해에 사용된 PCM은 과다 설

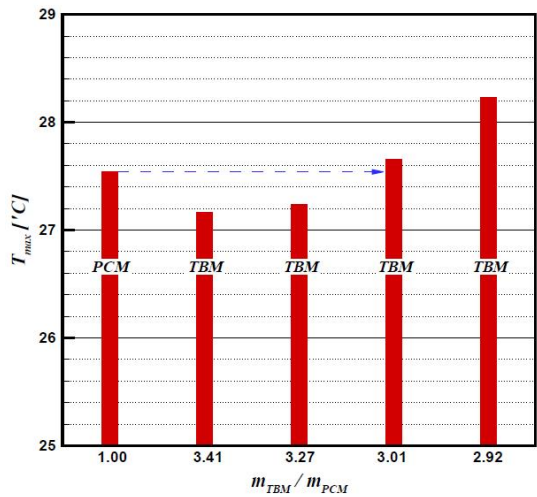


Fig. 7. Mass tracking of TBM for competing with PCM

계된 양에 해당된다. 이 만큼 양을 덜어내도 최고온도는 27.5°C를 유지할 것이다. 시간이 경과함에 따라 열관 근처부터 PCM이 응고할 것이다. 26,400s의 온도분포로부터 이를 확인할 수 있다. PCM의 내부온도가 18°C를 유지하고 있으며, 아직 액체 상태임을 알 수 있다. 냉각이 지속되고 보온히터가 작동하는 28,800s에서 PCM의 온도는 약 13°C로 거의 균일함을 볼 수 있다.

Figure 5에서 확인한 바와 같이 PCM과 동일한 부피를 갖는 TBM을 사용할 경우, 최고온도는 PCM의 성능에 미치지 못한다. 이 때 용기를 포함한 PCM과 대체한 TBM의 질량비는  $m_{PCM} / m_{TBM} = 2.85$ 이다. PCM과 동일한 정도의 열적 성능을 나타내는 TBM의 질량을 추적하기 위하여 TBM의 부피 또는 질량에 대한 매개변수적 수치해석을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 7에 도시하였다. TBM의 형상은 PCM과 동일한 직경의 원통형이며, 질량 증감에 따라 높이가 변한다. 질량이 변하면 크기변화에 따른 전도열전달 특성에도 영향을 미치므로 PCM과 절대적인 비교는 불가하지만 Al6061의 열전도도가 커서 어느 정도 불일치를 감안한 성능비교는 가능하다. TBM과 PCM은 모두 MLI를 사용하여 복사차폐를 하였다고 가정하였으므로 크기에 따른 복사열전달의 영향은 동일하다.

PCM에 비하여 질량이 3.41배의 경우 너무 과다하여 최고온도가 낮아진다. TBM을 조금씩 감량하며 수치해석을 수행하여 질량비가 3.01일 때 부품의 최고온도가 거의 비슷해지며, 이 때 동등한 열적 성능을 갖게 됨을 알 수 있다. 이 보다

더 감량하여 질량비가 2.92이면 최고온도가 PCM에 비하여 높아져서 성능에 못 미친다. 결과적으로 PCM의 열적인 성능에 도달하려면 TBM의 질량이 대략 PCMTD의 3배 정도 되어야 한다.

#### IV. 결 론

열관과 PCM을 결합한 위성부품용 열제어장치를 제안하고 구체적인 형상을 설계하였으며, 수치 해석을 통하여 열적 성능을 분석하였다. PCM을 적용하면 상변화에 따라 부품 최고온도를 15°C 이상 낮출 수 있다. PCM대신 Al6061로 제작된 동일 형태의 TBM을 적용하여도 비슷한 성능을 기대할 수 있으나 총 질량은 3배 이상 증가함을 감안한다면 제안한 PCMTD의 유효성이 입증된다. 임무가 정지된 부품 냉각기에서 보온히터의 소모 전력도 PCM을 사용할 경우 가장 적어서 열제어가 효율적임을 확인할 수 있다. PCM의 단점인 낮은 열전도도 문제는 열관과의 배치를 통하여 효과적으로 해결하였다. 제안한 PCMTD의 형상은 부품의 크기나 모양에 무관하게 조절할 수 있어서 새로운 위성에 적용할 경우에도 설계에 큰 영향을 받지 않아서 경제적이고 효율적이다.

#### 후 기

본 연구는 한국연구재단을 통해 미래창조과학부 우주핵심기술개발사업의 지원을 받아 수행되었다.

#### References

1) Kim, T. Y., Hyun, B., Lee, J., and Rhee, J., "Numerical study of the spacecraft thermal

control hardware combining solid-liquid phase change material and a heat pipe," *Aerospace Science and Technology*, Vol.27, 2013, pp.10~16.

2) Kim, T. Y., "Heat capacity estimation of the thermal buffer mass for temperature control of satellite electronic components in periodic operation," *Aerospace Science and Technology*, Vol.30, 2013, pp.286~292.

3) T. Y. Kim, J. G. Seo, B. S. Hyun, H. Y. Cheon and J. J. Lee "Study on the Thermal Buffer Mass and Phase Change Material for Thermal Control of the Periodically Working Satellite Component", *Journal of the Korean society for aeronautical & space sciences*, Vo.42, No.12, 2014, pp.1013-1019.

4) Kim, T.Y., "Analytic design of the phase change material for thermal control of the satellite component in periodic duty", *IAC2014*, 2014.

5) Zalba, B., Mari'n, JM., Cabeza, L.F., and Mehling, H., "Review on thermal energy storage with phase change materials, heat transfer analysis and applications," *Appl. Therm. Eng.*, Vol.23, 2003, pp.251-253.

6) Liu, S., Li, Y., and Zhang, Y., "Mathematical solutions and numerical models employed for the investigations of PCMs phase transformations," *Renew Sustain Energy Rev.*, Vol.33, pp.659-674.

7) Kumar, A., Sekar, A., Siddhartha, D.N., and Govinda, K. V., "Phase change materials (PCM) for thermal control during spacecraft transportation," *International Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, Vol.3, 2013, pp.28~32.