

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 44(10), 887-894(2016)

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2016.44.10.887>

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

응고/용해 잠열을 이용한 위성용 열제어장치의 실험적 연구

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

Satellite Thermal Control Device Enhanced by Latent Heat of the Phase Change Material

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

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

Korea Advanced Institute of Science and Technology***

Korea Aerospace Research Institute****

ABSTRACT

The thermal control device using solid-liquid phase change material (PCM) is designed, manufactured, and experimented in thermal environment chamber. The n-Hexadecane is selected as a PCM and its melting point is placed within the component working temperature range. The PCM container is made of Al6061 and has the thermal spreading fins inside. To simulate the working condition for on-orbit satellite the heat pipes are used to connect the heater and radiator and the PCM thermal control device (PCMTD) is installed at the middle portion of heat pipes. The thermal buffer mass (TBM), which is same configuration and volume with PCMTD, is also manufactured to compare the thermal control performance. As a result, the PCMTD is not only more efficient than TBM in their temperature control features but both mass and power of compensation heater are reduced.

초 록

고상-액상 상변화물질(PCM, Phase Change Material)을 이용한 위성부품 열제어장치를 설계 및 제작하였으며 열환경시험을 수행함으로써 온도제어 성능을 분석하였다. 설계온도에 부합하는 n-Hexadecane을 PCM으로 채용하였고, 낮은 열전도도를 보완하기 위하여 내부에 전열핀이 장착된 용기를 Al6061로 제작하였다. 위성에 장착하였을 때와 동일한 작동 조건을 확보하기 위하여, 부품과 방열판 사이를 열관으로 연결하였으며 열관의 단열부가 관통하도록 PCM 열제어장치를 설치하였다. 동일한 모양과 부피의 열적완충질량(TBM, Thermal Buffer Mass)도 제작하여, 주기적인 가열-냉각 실험을 수행하였다. 실험결과 상변화 잠열에 의한 PCM의 열제어 성능을 확인할 수 있었으며, TBM에 비하여 질량과 보온히터의 소모전력을 절감할 수 있음을 확인하였다.

Key Words : Phase change Material(상변화 물질), Latent Heat(잠열), Thermal Buffer Mass (열적완충질량), Satellite Thermal Control(위성열제어), Heat Pipe(열관)

† Received : January 6, 2016 Revised : September 20, 2016 Accepted : September 21, 2016

* Corresponding author, E-mail : tagikim@kpu.ac.kr

1. 서론

저궤도 지구관측 위성은 지구공전 임무궤도상 특정지역을 통과할 때 사진촬영 등의 임무를 수행하며, 이 때 관련된 부품들이 작동한다. 부품의 작동에 따라 주기적 또는 단속적으로 발열이 있고, 휴지기에는 발열량이 급격히 감소하거나 발열이 없는 대기상태를 유지한다. 이와 같이 부품의 발열이 주기적인 경우에도 부품작동이 일정할 때와 마찬가지로 방열판을 이용한 열제어 설계가 일반적으로 적용된다. 이때 위성부품의 설계 허용온도를 유지하기 위해서는 적절한 크기의 방열판과 휴지기의 과냉각을 방지하기 위한 히터가 필요하다. 부품의 발열량이 많다면 복사냉각을 위한 방열판의 면적도 증가하여야 하므로 위성시스템의 크기와 질량이 증가한다. 부품의 작동 휴지기 동안 냉각에 의하여 부품 온도가 낮아지며, 설계 허용온도 이하가 되면 보온히터를 작동시켜야 한다. 증가된 방열면적으로 인하여 냉각이 커지면 설계허용 최저온도를 유지하기 위한 히터의 전력도 증가하여야 한다[1, 2].

이와 같이 주기적 또는 단속적으로 작동하는 발열이 큰 부품의 열설계 시 발생하는 비효율적인 문제에 대처하기 위하여 열적완충질량(Thermal Buffer Mass, TBM)을 이용한 설계가 적용된 바 있다[3, 4]. Fig. 1에 도시한 바와 같이 발열부품과 방열판 사이에 TBM을 배치하고 이들을 다수의 열관으로 연결함으로써 발열시 방열판을 통하여 우주로 열을 방출함과 동시에 TBM에 현열로서 열에너지를 축적하여 온도 상승을

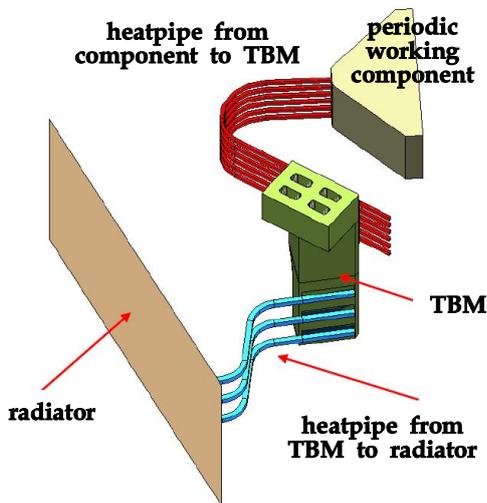


Fig. 1. Previous thermal design using TBM

저하시킨다. 이에 따라 방열판의 크기를 최적화시킬 수 있으며, 휴지기에도 최적화된 방열판에 의한 열방출 감소와 TBM에 축적된 열에너지로 인하여 냉각속도가 지연돼서 보온히터의 소모전력도 절감된다. TBM의 열질량 mc_p 에 의하여 온도상승 또는 하강 기울기가 결정되므로 부품 발열량이 증가하면 TBM도 더 무거워져야 한다. 기존 설계에서 사용된 TBM은 열전도도가 큰 Al재질이며, 질량이 약 7kg으로 무시할 수 없을 정도로 무겁다[4].

TBM의 열질량 추가효과를 고상-액상 상변화물질(Phase Change Material, PCM)의 잠열로 대체하여 열제어모듈의 질량 증가를 최소화하고, 상변화과정동안 일정하게 유지되는 온도특성을 이용하여 부품의 안정적인 온도제어가 가능한 위성용 온도제어장치에 대한 수치해석적인 연구가 수행된 바 있다[5]. 해당연구에서는 PCM으로 파라핀 계열인 n-Pentadecane과 n-Hexadecane을 사용하였으며, TBM 질량의 12%로 성공적인 온도제어가 가능함을 제시하였다. 그러나 PCM의 낮은 열전도도로 인하여 부품과 방열판 사이에 열저항이 증가하는 문제는 기존 TBM의 적용에서 보다 더욱 심각한 상황을 초래할 수 있다. PCM의 형상과 열관의 연결 형태에 따라 열저항이 변하고 이는 방열판의 최적설계에 영향을 미친다. 즉, 설계의 규격화가 불가능하여 최적설계도 가능하지 않게 된다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 부품과 방열판 및 PCM의 열적 연결 상태를 기존과는 달리 Fig. 2에 도시한 바와 같이 병렬 연결로 설계하였다. 즉, 부품과 방열판을 열관으로 직접 연결하고, PCM이 주입된 Dual Disk 형태 용기를 열관이 관통하도록 제작하였다. 기존의 설계가 Fig. 3 (a)에 도시한 바와 같이 직렬연결형이라면 본 연구에서 제시한 설계는 (b)에

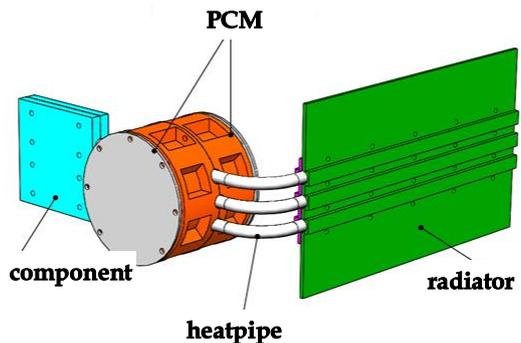
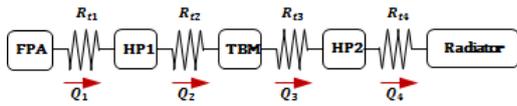
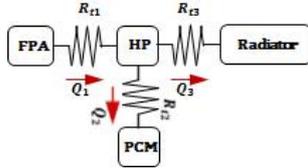


Fig. 2. New thermal design using PCM



(a) Serial connection (previous design)



(b) Parallel connection (new design)

Fig. 3. Thermal networks for design configurations

도시한 바와 같이 병렬연결형이다. 이러한 설계는 PCM의 축열효과는 유지하면서 부품과 방열판 사이의 열저항을 제거함으로써 열방출 능력을 증대시킨다. 더불어, PCM 용기의 형상이 열제어 성능에 미치는 효과가 최소화되므로 설계변수가 줄고 Disk의 직경이나 높이를 변화시키는 형태로 규격화도 가능하다.

본 연구에서는 기술한 바와 같이 PCM을 이용한 위성부품의 열제어장치를 설계 및 제작하였으며, 열환경시험챔버에서 방열판에 대한 대류냉각조건으로, 발열부품 모사를 위하여 설치한 히터의 가열량에 따른 PCM 열제어장치의 성능을 분석하였다. 우주에서 방열판을 통한 열방출은 온도의 4승에 비례하는 복사열전달로 이루지지만 본 연구에서는 방열판과 주위공기의 온도차에 비례하는 대류열전달로 이를 대체하였다. 비록, 방열판의 열전달기구는 동일한 조건이 아니지만 부품의 열을 방출하는 경로는 같으므로 이러한 실험을 통한 열제어장치의 성능 분석은 유효하다고 판단된다. 몇 가지 실질적인 발열량에 대하여 발열부의 시간에 따른 온도변화를 분석함으로써 PCM의 성능을 검증하였으며, 부피와 형상이 동일한 TBM을 제작하여 PCM 대신 설치하고 실험을 수행함으로써 PCM 대체효과를 정량적으로 비교/분석하였다. 결과적으로 PCM의 잠열에 의한 열제어 능력을 확인할 수 있었고, 냉각기에 온도 하강속도를 지연시킴으로 휴지기에 필요한 보온히터의 사용량을 절감할 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서 제안한 PCM의 병렬연결형 설계는 기존의 직렬연결형 설계에 비하여 성능이 우수하고 규격화를 통한 최적설계가 가능하여 향후 발사될 위성에 적용이 용이할 것으로 판단된다.

Table 1. Thermophysical properties of materials

Material	n-Hexadecane	Al6061
Melting point [°C]	18.0	-
Heat of fusion [kJ/kg]	230	-
Specific heat [kJ/kg·K]	2.208	0.980
Density [kg/m ³]	769	770
Thermal conductivity [W/m·K]	0.147	170.0

II. 본 론

2.1 PCM 열제어장치 및 실험장치

PCM 열제어장치(PCM Thermal control Device, PCMTD)에 충전될 PCM을 선정하기 위하여 다음과 같은 몇 가지 기술적인 사항이 고려되어야 한다. PCM의 상변화온도는 부품의 설계 허용온도범위에 따라 선정하여야 하며, 상변화잠열이 클수록 부피와 질량을 최소화할 수 있다. 일반적으로 위성부품의 설계온도범위에 해당하는 PCM은 열전도도가 작아서 적절한 형상설계가 이루어지지 않는다면 PCM의 완전한 상변화를 기대할 수 없다. 이에 따라 PCM이 충전되는 용기의 형상과 열유입부의 설계가 중요하다. PCM은 충전할 용기와 화학적으로 반응하지 않아야 하며, 상변화에 따른 부피변화도 가능한 작아야 한다. 본 연구에서는 김택영 등[5]이 연구한 바와 동일한 위성부품을 대상으로 PCMTD를 설계하였다. 즉, 위성부품의 작동허용온도가 14~28°C인 광학관측용 부품의 온도를 제어할 수 있는 열제어장치를 고려하였다. 이에 따라 상기에 나열한 조건에 부합되는 n-Hexadecane을 선정하였으며, 열적물성치를 Table 1에 정리하였다. 성능비교를 위하여 제작한 TBM의 재질인 Al의 물성치도 함께 제시하였다.

PCMTD의 중요한 설계인자는 밀봉, 내압 및 열전도도 등이다. PCM이 액상일 때 부피가 팽창하므로 밀봉설계가 적절치 않다면 누설이 발생하여 큰 문제를 일으킬 수 있다. PCMTD는 Fig. 4에 도시한 바와 같이 PCM을 주입할 용기와 이를 밀봉할 뚜껑으로 구성된다. 밀봉설계는 고진공 용기의 기밀유지를 위하여 사용되는 knife-edge sealing법을 적용하였다. Knife-edge에 균일한 압력분포를 위하여 PCMTD의 형상도 disk 형으로 설계하였다. 기술한 바와 같이 PCM의 낮은 열전도도를 보완하기 위하여 PCMTD 내부에 원형의 전열환을 설계하였으며, 재질은



Fig. 4. Prototypes of PCMTD assembly

상대적으로 가볍고 열전도도가 우수한 Al6061을 사용하였다. 이는 PCM인 n-Hexadecane과 화학적으로 안정하며 우주용으로 인증된 재질이다. 기밀유지를 위한 gasket은 knife-edge보다 연한 구리를 사용하였다. 제작한 PCMTD는 외경 120mm, 높이 42mm이고, 내부에 PCM 충전을 위하여 내경 90mm, 높이 35mm인 공간이 있다. 내부 공간에는 두께 2mm인 전열환이 원형으로 3개 설치되어 있다. 용기 윗면에는 1mm 높이의 Knife-edge와 조립을 위한 볼트 탭이 존재한다. PCMTD 뚜껑에도 마찬가지로 knife-edge와 구멍이 같은 위치에 존재한다.

기존 설계를 개선하여 부품과 방열판 사이에 PCMTD가 병렬로 연결될 수 있도록 열관이 PCMTD를 관통하게 설계하였다. 이를 위하여 동일한 2개의 disk 형 PCMTD를, 열관을 기준으로 겹칠 수 있도록 제작하여 dual disk 형태로 구성하였다. Fig. 5에는 기술한 바와 같은 dual disk 형 PCMTD와 열관 및 방열판 등이 모두 조립된 실험장치를 도시하였다. PCMTD와의 성능 비교를 위하여 부피와 형상의 같은 TBM을 제작하였으며, 실험장치에 PCMTD 대신 TBM을 장착하여 동일한 조건에 대한 실험을 수행하였다. PCMTD와 TBM 2쌍의 질량을 측정하여 Table 2에 정리하였다. TBM의 총 질량은 2282.4g으로 PCMTD 총 질량 1604.8g보다 1.42배 더 크다.

위성에 장착되는 방열판은 복사열전달에 의하여 우주로 열을 방출한다. 본 연구에서는 이러한 복사냉각 대신 방열판에 장착된 팬에 의한 강제 대류열전달을 이용하여 열을 방출하도록 설계하였다. 방열판의 크기는 300mm×160mm인 직사각

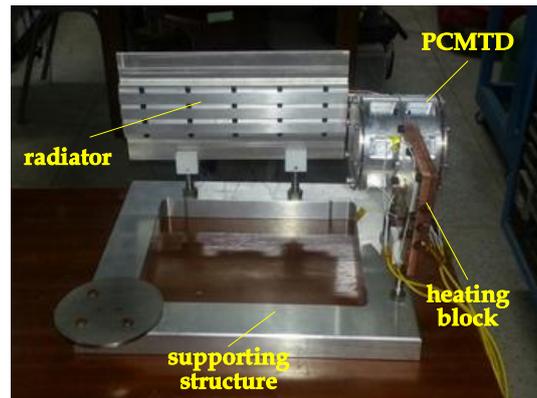


Fig. 5. Integrated PCMTD and experimental setup

Table 2. Mass breakdown of PCMTD/TBM

Prototype	Part No.	PCM	Total
PCMTD	PCMTD1	130.1g	802.1g
	PCMTD2	135.7g	802.7g
TBM	TBM1	-	1142.9g
	TBM2	-	1139.5g

형으로 두께는 3.5mm이며 재질은 Al6061이다. 방열판의 한 면에는 열관이 장착되고 다른 면에는 팬이 3개 장착된다. 팬의 회전속도는 모든 실험에서 일정하게 유지되므로 냉각성능은 동일하다. 발열부품을 모사하기 위하여 구리재질의 가열블록을 제작하였으며, 저항 12Ω인 patch 히터를 가열블록 양면에 부착하여 전압을 조정함으로써 가열량을 제어하였다. 가열블록과 방열판 사이에 직경 12.7mm, 길이 600mm인 L자형 열관 3개를 연결하였다. 열관은 소결형 워크구조이며 작동유체는 물이다. 열전달 구조상 열관의 양 끝단인 응축부와 증발부에 방열판과 가열블록을 설치하였으며, 이들 사이에 열관이 관통하도록 dual disk PCMTD를 배치하여 병렬연결이 되도록 하였다. 부품이 작동하는 발열기간에는 열관의 PCMTD 관통부가 응축부가 되고, 냉각기간에는 증발부가 된다. 열관과 각 부품의 접촉면에는 우주용 Thermal grease(DC 6-1104)를 사용하여 열저항을 최소화시켰다.

실험장치의 경계조건은 방열판을 통한 대류열 전달만이 가능하도록 구성하였다. 이에 따라 방열판을 제외한 모든 부분은 단열재로 감싸서 외부와 열적인 접촉을 차단하였다. 실험장치를 지지하는 구조물과 실험장치 각 부 사이에는 접촉면이 최소화된 테플론 재질의 받침대를 사용하여

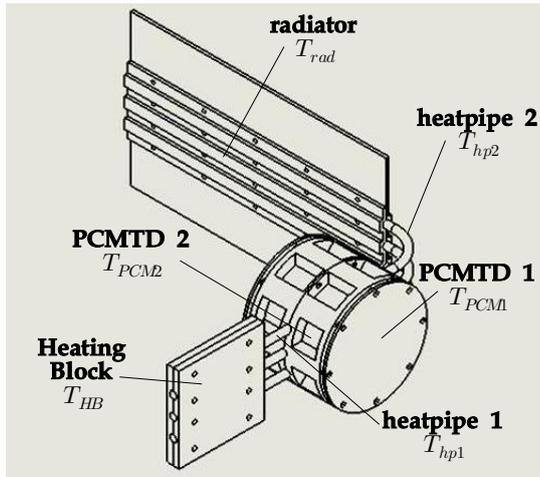


Fig. 6. Thermocouple installed positions

전도열전달을 최소화 하였다. 실험은 주위공기의 온도가 6.5±0.5℃로 유지되는 열환경시험챔버 내에서 수행하였다.

성능평가를 위하여 시간에 따른 온도를 계측하였으며, 온도계측을 위한 K-type 열전쌍의 부착 위치를 Fig. 6에 도시하였다. AI 용기 내부의 PCM은 밀봉되어 있어 직접적인 온도측정이 불가하므로 용기 외부에 부착한 열전쌍을 통해 상변화과정을 예측하였다. 이에 따라 상변화의 시작과 종료시간을 측정함에 있어 상당한 오차가 존재한다. 추 후 이에 대한 보안을 위하여 수치 해석을 수행할 예정이다. 히터의 가열량 조절과 온도계측 자료의 저장은 각각 power supply와 DAQ를 컴퓨터로 제어함으로써 수행하였다.

2.2 실험결과 분석 및 토의

PCMTD의 열제어 성능을 확인하기 위하여 기술한 바와 같은 대류냉각 조건하에서 부품 모사 히터의 주기적 가열에 대한 실험을 수행하였다. 각각 100W, 120W, 140W 등 3가지 가열량에 대하여 PCM이 완전히 용해될 때까지 가열을 지속하고, 다시 완전히 응고하여 가열블록의 온도가 초기온도인 13℃가 될 때까지 냉각함으로써 주기적인 변화를 나타내도록 가열과 냉각시간을 조절하였다. 이와 같이 PCM의 완전용해 실험을 통하여 상변화온도 유지에 따른 온도억제 특성을 분석하고, PCM의 잠열에 의한 열에너지 축적의 정량적인 평가를 수행하였다. 각 가열량에 대한 온도변화를 Fig. 7, 8, 9에 도시하였으며 총 5주기에 대한 실험 중 약 3주기가 나타나도록 시간축을 조절하였다.

발열량 100W일 때, Fig. 6에 제시한 온도계측

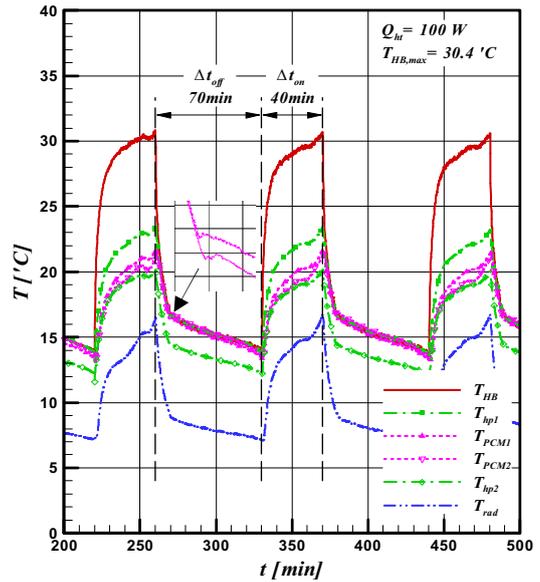


Fig. 7. Periodic temperature variations of the PCMTD cooling module for complete melting case ($\dot{Q}=100W$)

위치에서 주기적 온도변화를 Fig. 7에 도시하였다. 가열초기 히터의 온도가 급격히 상승하지만 약 7~8min이 지나면(227~228min)에는 온도상승 기울기가 뚜렷이 작아진다. PCM의 국부온도 변화로부터 용해가 시작되면 온도 상승세가 완화된 것을 알 수 있다. 가열 후 약 37min이 경과하면(257min) 히터의 온도가 다시 급격히 증가하며, 이는 PCM이 모두 용해되어 잠열효과가 사라졌기 때문으로 추측된다. PCM의 완전용해에 걸리는 시간은 약 29min이므로 PCM의 질량과 잠열로부터 다음과 같이 PCM에 단위시간당 축적되는 열량을 산출할 수 있다(편의상 PCM용기의 열용량 효과는 배제하였음).

$$\dot{Q}_{PCM} = \frac{m_{PCM}h_{fg}}{\Delta t_{melt}} = 35.1 \text{ [W]}$$

즉, 총 발열량 100W 중 65%가 방열판을 통하여 방출되고 35%가 PCM에 축적되며, 이에 해당하는 크기의 방열판 면적을 축소할 수 있다. 히터의 작동이 멈추면 냉각이 시작된다. 그림에서 볼 수 있듯이 냉각초기 약 7min 동안 매우 급격한 온도강하가 발생하고 이후 온도강하의 기울기가 감소한다. 냉각 시작 후 7min이 경과하면 그림에서 확대하여 도시한 바와 같이 PCM 용기의 온도가 S형으로 변하는 굴곡이 나타난다. 이는 용기 내부 n-Hexadecane의 과냉 현상에 의한 것이

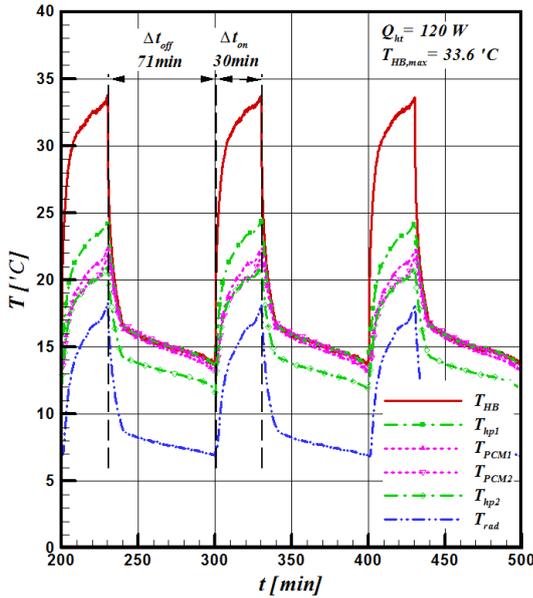


Fig. 8. Periodic temperature variations of the PCMTD cooling module for complete melting case ($\dot{Q}=120W$)

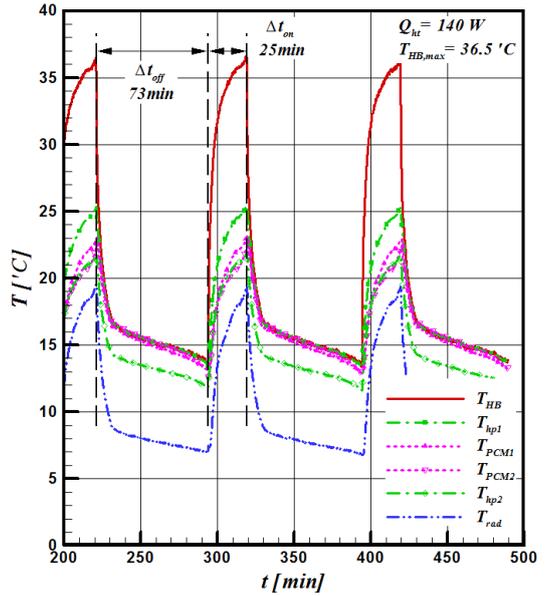


Fig. 9. Periodic temperature variations of the PCMTD cooling module for complete melting case ($\dot{Q}=140W$)

며, 이후 온도 기울기가 완만해지는 것으로 보아 응고가 진행 중임을 알 수 있다. 히터의 온도가 13°C까지 냉각되면 히터가 다시 on-duty 상태가 되며, 이때까지의 냉각시간은 70min이다. 발열부품 모사용 가열블록의 최고온도는 30.4°C까지 상승한다. 열관은 PCMTD를 기준으로 발열블록쪽의 온도가 방열판쪽의 온도보다 최고온도에서 약 3°C 높게 나타난다.

히터 발열량이 120W일 때의 온도변화를 Fig. 8에 도시하였다. 온도변화의 경향은 Fig. 5와 거의 일치한다. 명확히 구분하기는 어려우나 PCM의 용해는 6~7min(208~209min) 사이에 시작되고 히터 작동 후 27min(229min)에 완료되었다고 판단된다. 이에 따라 완전용해에 걸리는 시간은 약 21min으로 가정하였고, 단위시간당 48.5W가 축열된다. 히터 on-duty는 30min이고 off-duty는 71min이다. 냉각 시작 후 9min이 경과하면 100W 가열의 경우에서와 같이 PCM의 과냉이 확인된다. 발열부품 모사용 가열블록의 최고온도는 33.6°C로 100W인 경우에 비하여 3.2°C 높다. 열관과 방열판의 온도변화는 100W인 경우와 비슷한 경향을 나타낸다.

발열량 140W인 경우를 Fig. 9에 도시하였다. PCM으로 축적되는 열전달율이 59.9W로 발열량의 43%에 해당한다. 히터의 작동이 끝날 때 발생하는 최고온도는 열량에 거의 비례하여 증가

Table 3. Data sheet for complete melting case

Heat Power	100W	120W	140W
Δt_{On} [min]	40	30	25
Δt_{Off} [min]	70	71	73
Δt_{melt} [min]	29	21	17
\dot{Q}_{PCM} [W]	35.1	48.5	59.9
T_{max} [°C]	30.4	33.6	36.5

한다. 히터 온도가 13°C로 냉각될 때 까지 걸린 시간은 140W일 때 가장 길며, 이는 최고온도가 높기 때문으로 사료된다. 전반적인 온도변화는 다른 발열량의 경우와 같은 경향을 나타낸다. 발열량이 변화에 따른 중요 실험결과를 Table 3에 정리하였다. 가열량 변화에 따른 냉각모듈의 온도변화로부터 PCM의 상변화에 의한 최고온도의 제어와 온도저하의 방지 등을 설계 시 예측한대로 확인할 수 있다.

PCMTD와 TBM의 열제어 성능 비교를 위한 실험을 수행하였으며, 실험조건은 가열시간을 제외하면 이전 실험과 동일하다. 본 실험에서는 PCM이 완전히 용해하기 전에 발열을 정지하여 주기적인 온도변화가 되도록 조절하였다. 가열량 100W의 경우 가열블록의 온도를 Fig. 10에 도시하였다. 가열시간은 30min으로 이전 실험에 비해

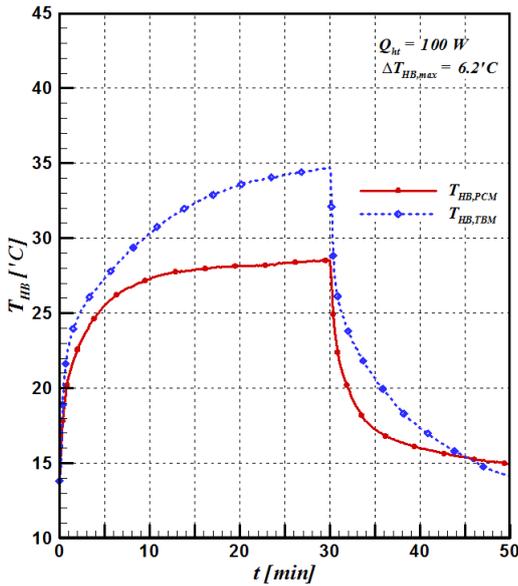


Fig. 10. Comparison of the transient temperature variations between PCMTD and TBM for incomplete melting case($Q=100W$)

여 75%에 해당한다. 가열이 시작되면 TBM의 온도가 급격히 상승하며 점차 시간에 대하여 지수함수적인 변화를 나타낸다. 이는 이론적인 해로부터 쉽게 예측되는 결과이다. TBM의 열질량이 증가하면 온도상승 기울기는 더 작아질 것이다. 즉, 온도제어를 위한 설계인자는 TBM의 경우 열질량이 된다[1]. PCMTD의 경우, 초기 급격한 온도상승은 TBM과 동일하지만 시간이 경과하면 온도상승이 멈추고 온도가 27°C 근처에서 일정하게 유지된다. 이는 PCM의 용해과정에 따른 잠열 효과에 기인하는 것으로, 부품 발열과정에서 온도가 일정하게 유지되는 특성은 부품의 성능향상에 매우 중요하다. 최고온도는 발열종료 시에 발생하며, Table 4에 정리한 바와 같이 PCMTD를 사용할 경우가 28.5°C로 TBM의 34.7°C에 비하여 약 6.2°C 낮다. Table 2에서 dual PCMTD의 질량은 1.6kg이고 dual TBM의 질량은 2.3kg이므로, TBM 질량의 70%만으로도 6.2°C 낮은 온도를 유지할 수 있으므로, 동일한 최고온도를 얻으려면 TBM의 질량이 증가하여야 함은 자명하다. 히터의 온도가 15°C가 될 때 까지 걸리는 냉각시간은 PCMTD가 20min으로 TBM의 16min에 비하여 길다. 즉, 냉각주기가 길어짐에 따라 부품의 최저온도를 유지하는데 필요한 보온히터의 소모 전력도 PCMTD가 작다.

발열량이 120W, 140W로 증가하였을 때 발열

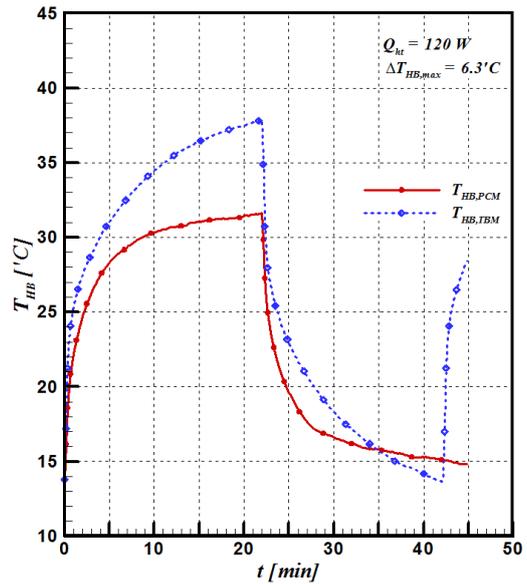


Fig. 11. Comparison of the transient temperature variations between PCMTD and TBM for incomplete melting case($Q=120W$)

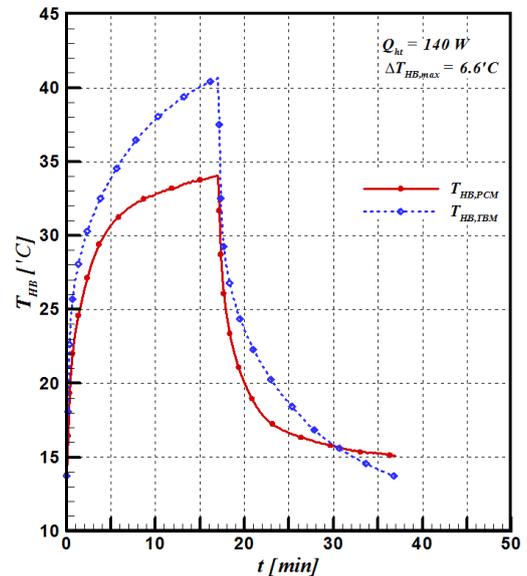


Fig. 12. Comparison of the transient temperature variations between PCMTD and TBM for incomplete melting case($Q=140W$)

블록의 온도변화를 각각 Fig. 11과 12에 도시하였다. PCMTD를 사용할 때 최고온도가 각각 6.3°C 및 6.6°C 더 낮아진다. 그러나 각 경우에 대한 가열시간이 서로 다르므로 가열량과 온도차 사이의 상관관계를 도출하는 것은 의미가 없다.

Table 4. Data sheet for incomplete melting case

Heat Power	100W	120W	140W
Δt_{on} [min]	30	22	17
$\Delta t_{off,PCM}$ [min]	20	21	20
$\Delta t_{off,TBM}$ [min]	16	15	15
$T_{PCM,max}$ [°C]	28.5	31.6	34.0
$T_{TBM,max}$ [°C]	34.7	37.9	40.6
ΔT_{max} [°C]	6.2	6.3	6.6

PCM의 상변화로 인하여 온도상승 기울기가 감소하고 온도변화가 작아서 안정적인 영역이 존재하지만 100W에 비하여 온도의 균일도는 좋지 않다. 발열이 140W일 때 부품의 성능향상을 위하여 온도를 일정하게 제어하려면 PCM의 양을 증가시키므로써 설계를 최적화할 필요가 있다. 냉각과정에서 모든 경우 TBM과 PCMTD의 온도역전을 발견할 수 있으며, 이로부터 보온히터의 소모전력 절감을 예측할 수 있다. Table 4에는 실험결과의 중요한 자료를 정리하여 제시하였다.

전반적으로 PCMTD를 사용한 온도제어가 온도의 안정성뿐 아니라 시스템 질량 및 소모전력 절감에도 효과적임을 확인할 수 있다.

III. 결 론

주기적으로 작동하는 위성부품의 온도를 제어하기 위하여 PCM을 병렬로 연결한 열제어장치를 설계/제작하였으며, 실험을 통하여 성능을 검증하였다. 제작한 PCMTD가 적용된 발열모사장치를 열환경시험챔버에서 대류냉각조건으로 주기적인 가열-냉각 실험을 수행하였으며, TBM을 이용한 열제어장치와 성능을 비교/분석하였다. 실험에 사용한 TBM은 제작한 PCMTD와 부피가 동일하며 질량은 1.42배 크지만, PCMTD에 비하여 최고온도는 더 높고, 냉각에 필요한 시간은 짧았다. 즉, PCMTD가 질량이 작을 뿐 아니라 온도변화폭이 적어서 안정적이고, 히터가 작동시작 초기온도까지 냉각되는데 필요한 시간도 길어서 보온히터의 소모전력을 절감할 수 있다. 이는 예측한 바와 같이 PCM의 상변화 잠열에 의한

축열효과에 기인한다. 본 연구에서는 히터의 열량을 변수로 최적설계를 수행하였으나, PCM 충전량에 대한 연구도 현재 진행 중이다. 또한, 수치해석을 통한 PCM의 용해/응고 과정에 대하여도 연구 중이다.

후 기

본 연구는 한국연구재단을 통해 미래창조과학부 우주핵심기술개발사업의 지원을 받아 수행되었다.

References

- 1) Kim, T.Y., Hyun, B.S., Lee, J.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) Gilmore, D.G., *Spacecraft Thermal Control Handbook, Volume I: Fundamental Technologies*, 2nd Ed., 2002, The Aerospace Press, ElSegundo.
- 3) 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.
- 4) Seo, J., Cho, H., Lee, D., Lee, S., Choi, H. and Kang, S., "Design and thermal analysis of focal plane assembly cooling unit of earth observation camera," *Journal of The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol.37, No.6, 2009, pp.580-585.
- 5) Kim, T. Y., Seo, J., Hyun, B., Cheon, H. Y., and Lee, J., "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*, Vol.42, No.12, 2014, pp.1013-1019.