

〈 기술논문 〉

정지궤도위성 전장품의 열설계 검증을 위한 최적 열해석 모델링 연구

김정훈[†] · 전형열^{*} · 양군호^{*}

(2004년 12월 27일 접수, 2005년 2월 24일 심사완료)

A Study on Optimized Thermal Analysis Modeling for Thermal Design Verification of a Geostationary Satellite Electronic Equipment

Jung-Hoon Kim, Hyoung Yoll Jun and Koon-Ho Yang

Key Words : Thermal Analysis(열해석), Heat Dissipation(열소산), Thermal Vacuum Test(열진공시험),
Electronic Equipment(전장품), Geostationary Satellite(정지궤도위성)

Abstract

A heat dissipation modeling method of EEE parts, or semi-empirical heat dissipation method, is developed for thermal design and analysis an electronic equipment of geostationary satellite. The power consumption measurement value of each functional breadboard is used for the heat dissipation modeling method. For the purpose of conduction heat transfer modeling of EEE parts, surface heat model using very thin ignorable thermal plates is developed instead of conventional lumped capacity nodes. The thermal plates are projected to the printed circuit board and can be modeled and modified easily by numerically preprocessing programs according to design changes. These modeling methods are applied to the thermal design and analysis of CTU (Command and Telemetry Unit) and verified by thermal cycling and vacuum tests.

기호설명

A : 접촉면적, m^2
 d : 볼트직경, m
 E : 볼트토크, $N\cdot m$
 f : 가중치
 k_{eff} : 유효열전도율, W/mK
 L : 접촉특성길이, m
 n : 볼트개수
 P : 전력소모량, W
 Q : 열소산량, W
 R : 접촉열저항, K/W
 T : 온도, K

그리스문자

δ : 인쇄회로기판 두께, m
 η : 인쇄회로기판 전력효율

하첨자

b : 인쇄회로기판, 실험회로판(breadboard)
 bot : 리테이너(retainer) 하향
 $duty$: 임무사이클을 고려한 값
 i : i 번째 EEE 소자
 int : 접촉경계면
 j : EEE 소자 접합점(junction)
 jb : 소자 접합점과 인쇄회로기판 사이 열저항
 $rtnr$: 리테이너
 sq : 정사각형 면적
 top : 리테이너 상향

[†] 책임저자, 회원, 한국항공우주연구원 통신위성체계그룹

E-mail : jungkim@kari.re.kr

TEL : (042)860-2482 FAX : (042)860-2568

^{*} 한국항공우주연구원 통신위성체계그룹

1. 서론

우주환경에서 작동하는 전장품의 가장 중요한

설계요소는 전장품의 성능을 최적으로 유지할 수 있도록 하는 회로설계이다. 설계된 회로는 그 성능요구조건을 만족하기 위하여 전장품을 구성하는 EEE 소자(Electric, Electronic and Electromechanical part)들이 임무수명동안 최적의 상태에서 운용되어야 하는데, 이러한 소자들에 직접적인 영향을 주는 전류, 전압, 온도 등의 인자들은 적절한 운용여유분 즉, 감쇄비(derating)를 전장품 설계에 고려하여야 한다. 전장품은 발사환경에서의 소음, 진동, 충격을 견딜 수 있어야 하고 고온, 저온 및 진공 환경에서 설계된 성능을 충분히 발휘할 수 있어야 한다. 특히, 소자의 온도는 격심한 우주환경에서도 소자의 성능규격을 만족해야 하고 높은 신뢰도를 유지하여야 하기 때문에 초기 설계 및 소자선정 단계에서부터 간과하여서는 안된다.⁽¹⁾

우주용 전장품의 경우 그 수요가 많지 않고 해당 임무에 따라 독특한 설계가 필요하므로 초기 개발단계에서부터 우주인증을 위한 다양한 설계변경이 요구될 수 있다. 이러한 경우 개발될 전장품이 열설계 측면에서 적절하게 이루어졌는지, 또는 소자가 주어진 열환경에 대한 적절한 여유분을 가지고 운용될 수 있는지 등이 최종 설계가 확정되기 이전까지 검토되어야 한다.

본 연구에서는 정지궤도 우주환경에서 성능요구조건 및 높은 신뢰도를 만족시킬 수 있도록 전장품의 성능검증모델(EQM: Engineering Qualification Model)의 열설계 검증을 위하여 최적의 열해석 모델링 방법을 개발하고 실제 설계 및 해석에 반영하였다.

반실험적 소자 열소산량 방법(semi-empirical part heat dissipation method)은 정지궤도의 가장 열악한 우주환경에서 전장품이 동작하게 될 경우에 예상되는 소자의 집합(junction)온도, 케이스(case)온도 및 인쇄회로기판(PCB: printed circuit board)온도의 정량적 정밀도를 높이기 위하여 고안되었으며, 소자의 열소산량을 반실험적인 방법으로 도출한 것이다. 또한 열설계 변경에 따른 각 소자별 열모델링을 빠르게 수행하기 위하여 소자 및 인쇄회로기판 격자가 정확하게 정렬되어 있지 않은 경우에도 소자와 인쇄회로기판 사이의 열전달량을 노드의 접촉면적으로 가중시켜 열전도 컨덕턴스(conductance)로 모델링 하는 표면열모델(surface heat model)을 제안하였다.

개발된 열모델링 방법의 타당성 검증을 위하여 국내 최초의 정지궤도위성 본체 전장품인 원격측정명령처리기(CTU: Command and Telemetry Unit)의 성능검증모델에 대한 열해석 및 전장품의 궤도환경시험(열주기시험 및 열진공시험)을 수행하였다.

2. 전장품 열모델링 이론

2.1 원격측정명령처리기 전장품 열설계

Fig. 1은 정지궤도위성의 원격측정명령처리기 성능검증모델의 외형을 보여주고 있다. 외장 하우징은 크기가 195 mm×149 mm×192 mm이며 각각 1 개씩의 Al-6061-T651 몸체플레이트, 상단플레이트(top-plate) 및 기저플레이트(baseplate)로 구성되어 있다. 내부의 각 보드는 리테이너(retainer)를 이용해 슬롯형태의 몸체 플레이트에 삽입되도록 하였으며 1 장의 전력변환(EPC: Electric Power Converter)모듈과 예비보드 3 장을 포함한 6 장의 원격측정명령처리시그널 보드들(signal boards)이 마더보드에 부착되어 기저플레이트와 수직하게 배치되어 있다. 각 보드의 열경로는 보드 좌우측에 장착된 리테이너를 통해 측면 하우징으로 열을 전달하도록 하였다. 원격측정명령처리 시그널보드 및 전력변환모듈의 기본 열설계는 Fig. 2 와 같다.

2.2 열전도 모델링

본 연구의 열모델링에서는 잘 알려지지 않은 변수 및 특정 범위 내에 존재하는 종속변수들에 대하여 열적으로 가장 최악의 수치를 택하고 실제

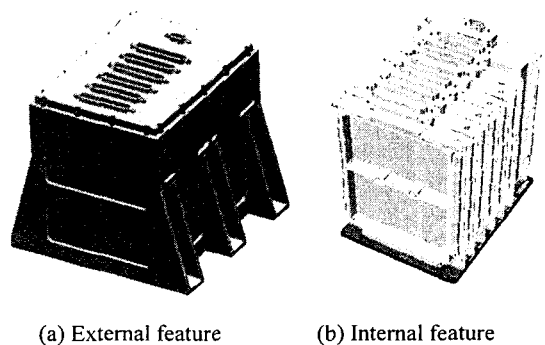


Fig. 1 External and internal features of CTU

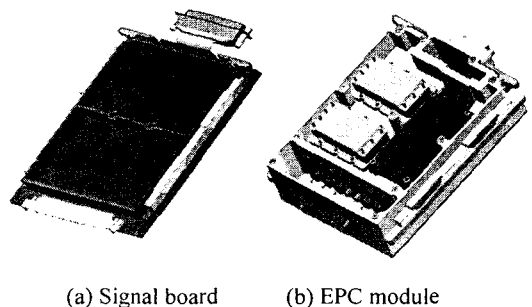


Fig. 2 Basic thermal design of CTU boards

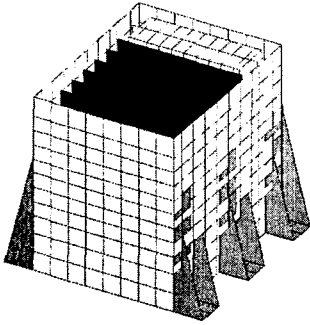


Fig. 3 Thermal plate modeling of CTU without top plate

온도응답 범위의 폭 보다 넓은 온도를 예측하도록 함으로써 일종의 해석 여유분을 가지게 하였다. 성능검증모델의 열모델 수립 및 해석을 위한 소프트웨어는 TAS 7.0(Thermal Analysis System)⁽²⁾을 이용하였다. 전장품의 열모델을 수립하는데 필요한 입력값은 크게 기계적 치수/물성치, 접촉열저항, 소자 열소산량 세 가지로 나눌 수 있다.

2.2.1 기계적 치수 및 물성치

원격측정명령처리기 내부의 기계적 치수 및 물성치는 Fig. 3 과 같이 두께를 가지는 평판으로 모델링하고 두께방향의 열전달은 무시하였다. 플레이트와 플레이트 사이 및 인쇄회로기판과 플레이트 사이의 접촉열저항은 노드간 열저항을 생성하여 모사하였다.

인쇄회로기판은 수 겹의 구리층과 구리층 사이의 전기절연층으로 구성되어 있으며 소자가 장착되는 위치에 따라 회로의 패턴이 다르기 때문에 인쇄회로기판의 열전도율은 식 (1)과 같이 위치 및 온도의 함수로 나타난다.

$$k_b = k_b(x, y, z, T) \quad (1)$$

그러나 실제 인쇄회로기판의 열전도율을 위치의 함수로 나타내는 것은 상당히 어려운 일이므로 공학적으로 의미있는 열해석 모델을 수립하기 위하여 인쇄회로기판을 하나의 등방/등온 플레이트(isotropic and isothermal plate)로 가정하고 식 (2)와 같이 나타내기로 한다.

$$k_{b,eff} = const. \quad (2)$$

참고문헌 (3)에서는 인쇄회로기판을 등방체로 가정했을 때 기판의 단위면적당 열저항을 구리적용비율(% copper coverage)과의 관계로 나타내었다. 이를 활용하면 식 (3)과 같이 인쇄회로기판의 유효열전도율(effective thermal conductivity)을 기판의 단위면적당 열저항과 두께로 나타낼 수 있다. Table 1 은 식 (3)을 이용하여 원격측정명령처리기

Table 1 Effective thermal conductivity of each functional board

Function boards	Number of copper layer	Effective thermal conductivity[W/mK]
Uplink/1553	10	38.898
Telemetry	8	44.449
Command	8	44.449
EPC control board	8	42.520

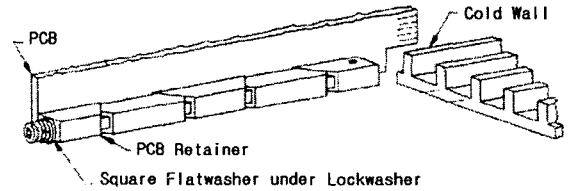


Fig. 4 Contact between PCB retainer and machined cold wall

에 사용되는 각 인쇄회로기판의 유효열전도율을 계산한 결과이다.

$$k_{b,eff} = \frac{1}{R_{sq}\delta} \left[\frac{K}{W} \right] \quad (3)$$

2.2.2 접촉열저항

인쇄회로기판은 다양한 방법으로 하우징 또는 지지프레임과 같은 구조물에 장착되는데, 이러한 기계적인 접합은 접촉열저항을 발생시키게 된다. 원격측정명령처리기의 기계적인 접촉은 크게 볼트를 이용한 체결방식과 Fig. 4 와 같이 인쇄회로기판 리테이너를 사용하여 하우징에 접촉시키는 방법이 적용되었다. 볼트를 이용했을 때의 열저항은 식 (4)와 같다.⁽⁴⁾

$$R_{int} = \frac{0.03226}{\left(\frac{5nE}{Ad} \right)^{\frac{2}{3}}} \left[\frac{m^2K}{W} \right] \quad (4)$$

대기환경에서 5 조각, 0.254m 인 리테이너를 사용했을 때 0.254m 길이에 대한 접촉면의 열저항과 길이를 곱한 값은 실험결과 0.1016 mK/W 이다.⁽⁵⁾ 그러나 진공중(10⁻⁴ torr)에서 동일한 리테이너를 사용할 경우 그 열저항은 약 12 배 정도 증가한다.⁽⁶⁾

본 열모델링에서의 리테이너는 9 개의 리테이너 노드로 나누고 노드의 제어체적 중 리테이너 길이 방향의 크기를 각 노드가 가지는 접촉특성길이로 정의하였다. 따라서, 0.254m 리테이너에 대한 열저항을 리테이너 노드 접촉특성길이로 나눈 값은 해당 리테이너 노드의 열저항값이 되며 식 (5)와 같

이 계산된다.

$$R_{rnr} L = 1.2192 \left[\frac{mK}{W} \right], \quad R_{rnr} = \frac{1.2192}{L} \left[\frac{K}{W} \right] \quad (5)$$

참고문헌 (7)에 따르면 냉각벽(cold wall)에 리테이너가 장착되었을 때 리테이너가 돌출된 방향(상향)은 리테이너 전체 열전달량의 30%를 차지하고 70%의 열은 그 반대방향(하향)으로 전달된다. 따라서 리테이너 상/하향 열저항의 비는 식 (6)과 같다. 전체 리테이너의 열저항과 리테이너 상/하향 열저항과의 상관식은 식 (7)과 같고, 식 (7)에 식 (6)을 대입하면 식 (8), 식 (9)와 같이 유도된다.

$$3R_{top,rnr} = 7R_{bot,rnr} \quad (6)$$

$$\frac{1}{R_{rnr}} = \frac{1}{R_{top,rnr}} + \frac{1}{R_{bot,rnr}} \quad (7)$$

$$R_{top,rnr} = 3.333R_{rnr} \quad (8)$$

$$R_{bot,rnr} = 1.429R_{rnr} \quad (9)$$

2.2.3 반실험적 소자 열소산량

보통 전장품 열해석을 수행할 때 전기회로도 (schematic)가 완성되면 회로도의 소자 최대 소모전류, 전압, 저항으로부터 소자의 열소산량을 이론적으로 계산하여 열모델링을 수행한다. 즉 소자의 최대 열소산량을 이용하여 해석을 수행하기 때문에 소산량이 큰 소자일수록 실제 나타나는 현상보다 높은 온도를 예측하게 된다. 이러한 정량적인 오차를 보완하고 전반적인 실제 온도응답의 정확성을 높이기 위해 본 연구에서는 열해석에 사용되는 이론적 소자 열소산량을 보드별 전기적 시험결과를 활용하여 환산하였다.

보드별로 이론적인 최대 열소산량, 임무사이클을 고려한 열소산량, 실제 보드별 소모전력 시험치를 Table 2에 나타내었다. 실제 보드레벨의 열소산량은 보드의 소모전력량에 보드동작에 필요한 전력량을 뺀 값이지만 Table 2에서와 같이 이론적인 소자별 열소산량의 합은 실제 소모전력량 보다도 크게 예측되어 있다. 따라서 이론적인 열소산

량을 그대로 사용하기 보다 이론적 열소산량에 대한 가중치로 보드별 측정 소모전력량을 사용하여 소자의 열소산량으로 정하였으며 식 (10)과 같이 환산하였다. Table 2에는 계산된 가중치 f 가 나타나 있다.

$$Q_i = f \cdot Q_{duty,i} \quad \text{where, } f = \left\{ \frac{(1-\eta)P_b}{\sum Q_{duty,i,b}} \right\} \quad (10)$$

여기서 Q_i 은 환산된 i 소자의 열소산량을 나타내고 $Q_{duty,i}$ 는 i 소자의 임무사이클을 고려한 이론 열소산량, P_b 는 보드별 소모전력량 시험치이다. η 는 보드의 전력효율이며 열적 최악조건으로 $\eta=0$ 을 적용하였다.

2.2.4 발열소자 표면열모델

일반적으로 집적회로 소자가 인쇄회로기판에 장착되었을 때 소자 표면과 인쇄회로기판 표면 및 내부 층의 온도분포를 살펴보면 Fig. 5와 같은 경향을 보인다.⁽⁸⁾ 기존 연구에서는 발열소자의 모델링을 위하여 해당 소자를 하나의 집중열용량(lumped capacity)으로 가정하고 인쇄회로기판의 노드에 집중된 열(nodal heat)을 가하여 해석하였다.^(4, 9, 10) 그러나 실제 설계가 확정되기 이전에 소자의 재배치 등과 같은 열설계 변경에 따라 각 소자의 열적 타당성을 검토하여 전기적 가용성을 판단하는데 집중열용량 방법을 사용할 경우 소자 열모델링을 매번 다시 수행하여야 한다. 뿐만 아니라 소자 노드의 위치변경에 따라 일일이 인쇄회로기판의 격자계 정렬이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 열설계 변경에 따른 각 소자별 열모델링이 용이하도록 소자와 인쇄회로기판의 격자가 정확하게 정렬되어 있지 않은 경우에 대해서도 두 노드 사이의 열전달을 모사할 수 있는 표면열모델(surface heat model)을 적용하였다.

(1) 발열소자 열플레이트 모델링

발열소자 표면열모델을 위하여 발열소자가 장착된 인쇄회로기판 위에 소자의 풋프린트(footprint)에 해당되는 얇은 열플레이트(thermal plate)를

Table 2 Heat dissipation and power consumption data of CTU functional boards

Functional boards	Maximum heat dissipation[W]	Heat dissipation with duty cycle[W]	Experimental power consumption[W]	f , Weighting factor	
Uplink/1553	5.75	2.05	2.15	1.05	
Telemetry	2.38	1.57	1.12	0.71	
Command	3.22	1.02	0.72	0.71	
EPC control	1.97	1.97	1.20	0.61	
DC/DC conv.	5V	4.36	4.36	2.50	0.57
	28V	4.00	4.00	3.00	0.75

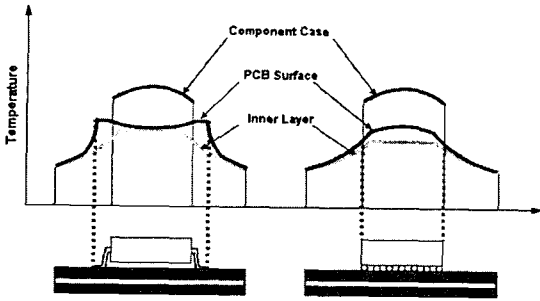


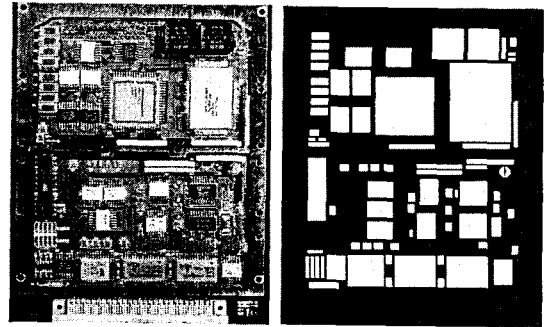
Fig. 5 Temperature distribution schematic when IC is mounted on the PCB

생성하였다. 열플레이트는 얇은 접착식 히터 (electrical patch heater)로 생각할 수 있으며 열플레이트를 매개로 하는 열전달을 최소화하기 위하여 두께를 상당히 얇게 함으로써 발생열이 곧바로 인쇄회로기판에 전달될 수 있도록 모델링하였다. 열플레이트는 최소 4 개 이상의 수치적 노드로 구성되며 노드의 제어체적에 해당되는 표면의 전 영역에 균일한 열을 가하도록 하였다. Fig. 5 에서와 같이 집적회로가 인쇄회로기판에 장착되었을 때 인쇄회로기판의 온도는 집적회로의 리드가 납땜되는 부분을 중심으로 온도가 급격하게 변함에도 불구하고 인쇄회로기판에 투영된 소자의 열플레이트 아래부분은 전영역에 걸쳐 인쇄회로기판의 온도가 그다지 크게 변하지 않는다. 따라서 열모델링을 위한 집적회로의 열플레이트 경계를 소자의 리드가 인쇄회로기판에 납땜되는 부분으로 정하였다.

집적회로와 마찬가지로 축대칭형(axial lead type)의 다이오드, 저항, 커패시터도 동일한 방법으로 리드가 인쇄회로기판에 접촉하는 부분을 경계로 한 후 소자가 인쇄회로기판에 투영된 면적에 대하여 해당 열플레이트를 모델링하였다. 또한 인쇄회로기판에 소자의 표면이 직접 장착되는 표면장착장치(surface mounted device)도 소자의 투영면적을 소산열이 발생하는 표면으로 정하였다.

(2) 발열소자와 인쇄회로기판 사이의 열전도

전장품의 열모델링 수행 중 하우징 및 인쇄회로기판의 크기가 결정되고 구조적인 결합방식이 확정되어 있는 경우에는 이미 해당 노드와 노드 사이의 열저항 계산이 완료된 상태일 것이며 기 생성된 노드의 개수 변화 또는 위치 이동은 모든 열저항을 다시 계산해야 하는 어려움이 있다. 더구나 소자의 개수가 1000 여개가 되는 본 연구의 원격측정명령처리기는 소자의 재배치 등으로 인쇄회로기판과의 격자 정렬이 필요할 경우 노드를 추가하거나 위치를 변경하여야 할 것이며 상당한 양의 모델링 작업이 새로 수행되어야 하므로 비효율



(a) Real layout (b) Surface heat model

Fig. 6 Surface heat model of uplink/1553 board

적이라고 할 수 있다.

표면열모델은 인쇄회로기판의 격자가 결정되면 이것을 고정시킨 후, 발열소자 열플레이트의 제어체적에 대하여 인쇄회로기판 노드의 제어체적과 일대일 대입하도록 하여 그 접촉하는 공유면적을 계산한다. 소자의 노드와 인쇄회로기판의 노드 간 열접촉면적에 발열소자의 단위면적당 열량을 곱하면 실제 발열소자의 노드가 인쇄회로기판의 어떠한 노드와 결합되는가의 여부와 그 열전달량이 접촉면적으로 가중되어 결정된다. 참고문헌 (11)에서는 이러한 표면열모델을 SINDA⁽¹²⁾를 사용하여 알고리즘을 구현한 후 열해석을 수행한 결과를 기술하였다. Fig. 6 에서서 업링크/1553 보드의 실제모습과 발열소자 표면열모델을 나타내었으며 본 연구에서의 표면열모델은 TAS의 Synchronesh 기능으로 구현하였다.

2.3 열복사 모델링

실제 전장품이 운용되는 정지제도 우주환경 모사 및 지상 열진공시험 모사를 위하여 열전도 모델링에 더하여 열복사 모델링이 필요하다. 열복사 모델링 중 열복사 컨덕턴스를 계산하는 프로그램으로 TRASYS⁽¹³⁾를 사용하였다. 계산된 컨덕턴스는 TAS의 열전도모델과 결합되어 최종 온도를 계산하게 된다. TRASYS에서는 원격측정명령처리기 내부 인쇄회로기판, 전력변환모듈 및 하우징 등의 플레이트들을 각각 하나의 능동복사표면(active radiative surface)을 가지도록 기하학적인 형상을 모델링한 후 열복사 컨덕턴스를 계산하였으며 TAS에서는 흑체복사싱크노드(black radiative sink node)를 가지는 진공챔버의 슈라우드(shroud)와 외부 하우징의 열복사를 고려하였다. Fig. 7은 TRASYS를 이용하여 구현한 원격측정명령처리기 내부의 능동복사표면과 열복사 컨덕턴스의 생성 결과를 나타내었으며 Fig. 8은 TAS의 열전도모델 및 흑체복사

싱크노드와 TRASYS의 내부 열복사모델이 결합된 그림이다.

2.4 열대류 모델링

정지궤도 우주환경은 극고진공상태로 열대류를 고려할 필요가 없으나 지상에서의 대기압 열주기기 시험 모사를 위하여 열전도 및 열복사 모델링에 열대류모델을 추가하였다. 열주기기시험은 전장품의 열피로(thermal fatigue) 및 작업성상태(workmanship)를 확인하기 위한 목적으로 수행된다. 열주기기 시험 챔버내의 가스와의 대류열전달 모사를 위하여 TAS에서 하우징 외부에 한 개의 대류벌크노드(convective bulk node)를 생성하였다. 각 인쇄회로기판은 구조적 안정을 위해 리테이너 외에 12.7mm 두께의 프레임이 장착되어 있어서 각 인쇄회로기판 사이의 가스는 내/외부와 유동이 거의 없이 밀폐된 환경을 구성한다. 따라서 인쇄회로기판 사이 및 하우징과 인쇄회로기판 사이에 내부 대류열전달 모사를 위하여 총 10 개의 대류벌크노드를

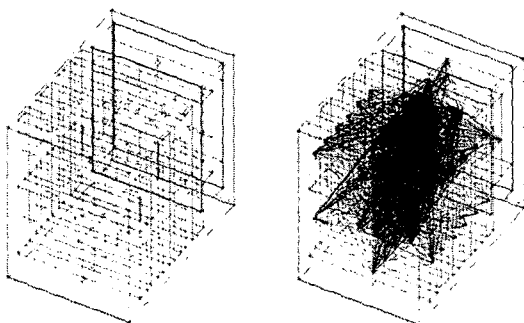
생성하였다. 계산에 사용된 열전달계수는 TAS에서 제공하는 “Free Convection in Enclosed Spaces” 모델을 적용하였다. Table 3은 계산에 사용된 대류열전달 계수를 나타내었으며 Fig. 9에서는 열주기기 시험 모사를 위한 열모델 보여주고 있다.

2.5 소자 접합온도 및 온도 감쇄요구조건

소자의 접합온도 열모델링은 식 (11)과 같이 해석적으로 계산할 수 있다. 원격측정명령처리기의 경우 열저항 데이터는 대부분 소자별 데이터시트에 나타나 있었으나, 소자의 접합점과 소자의 케이스 사이의 열저항만 나와 있는 경우에는 소자 리드의 기하학적형상을 사용하여 소자의 케이스와 인쇄회로기판 사이의 열저항을 별도로 계산하였다.

$$T_j = T_b + Q \cdot R_{jb} \tag{11}$$

각 소자들은 열진공 환경에서 소자의 가능한 동작조건 보다 낮은 범위에서 운용함으로써 전체적인 전장품의 신뢰도를 높일 수 있게 된다. 일반적으로 소자의 감쇄요구조건은 제품보증(product assurance)분야를 담당하는 엔지니어가 최종 결정하며 본 원격측정명령처리기의 온도 감쇄요구조건은 Table 4와 같다.



(a) Radiative active surfaces (b) Radiative conductors
Fig. 7 CTU internal thermal radiation model

Table 3 Convective heat transfer coefficients in free convection in enclosed spaces of CTU

Convective heat transfer compartment	Heat transfer coefficient [W/mK]
External convection between housing and chamber	14.617
Internal convection between PCBs	2.093
Internal convection of EPC housing	3.193

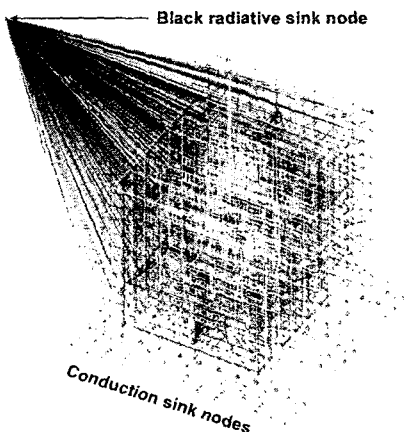


Fig. 8 CTU conduction and radiation model (3D-view)

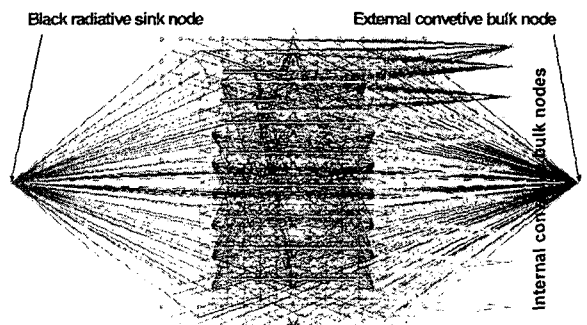


Fig. 9 CTU conduction, radiation and convection model (top-view)

3. 전장품 열해석 모델 분류

3.1 열해석 모델 분류

원격측정명령처리기의 열해석은 설계확정 전 열설계의 초기 검증, 궤도환경시험 모사, 소자의 최악 운용온도 예측 및 신뢰도 해석에 대한 자료 제공에 그 목적이 있다. 이러한 목적에 부합하기 위하여 설계확정 이전의 해석, 즉 예비열해석(preliminary thermal analysis)은 열전도만을 고려하여 설계 여유분을 가지도록 하였다. 예비열해석에서의 소자 열소산량은 각 기능보드들의 제작이 완료되기 이전이므로 이론적인 열소산량값을 이용할 수 밖에 없다. 더불어 Table 2 에서와 같이 이론적인 최대 열소산량을 열모델에 사용한다면 그 결과는 자명하게 높게 예측될 것이기 때문에 임무사이클을 각 소자별로 계산하여 적용하는 것이 타당하다.

전장품의 설계가 완료되면 실험회로판 또는 실제 인쇄회로기판이 제작될 수 있으며 보드별 기능시험단계에서 각 보드의 소모전력량을 측정할 수 있다. 따라서 식 (10)을 사용하면 반실험적인 소자 열소산량을 구할 수 있다. 본 연구에서는 반실험적인 소자 열소산량을 사용하여 열전달 모드의 조

합에 따라 열전도해석, 열주기시험모사, 열진공시험모사의 세 종류로 나누었다. 열전도해석은 해석의 여유분을 갖게 하기 위해 열복사 모드를 배제하였으며 열주기시험모사 및 열진공시험모사는 각각 열주기시험 및 열진공시험 결과와 비교하기 위한 해석의 경우이다. 각각의 경우에 대하여 적용된 열전달 모드 및 열소산량 모델링 방법을 Table 5 에 나타내었다.

3.2 예비열해석 및 온도측정위치 선정

원격측정명령처리기의 궤도환경을 위한 경계조건은 기저플레이트 히트싱크 온도를 기준으로 고온조건일 때 71°C, 저온조건일 때 -34°C이다. 궤도환경시험을 수행하기 이전에 예비열해석을 수행하고 그 결과를 이용하여 온도측정위치를 선정하였다. 궤도환경시험시 가장 우선 측정되어야 할 부분은 열환경온도 설정을 위한 하우징 및 기저플레이트의 온도이다. 또한 각 소자의 케이스온도 및 접합온도 검증을 위한 기준으로 인쇄회로기판의 온도가 필요하다. 특히 보드의 온도는 최대 열집중이 예상되는 고온영역과 가장 낮은 온도가 예상되는 저온영역을 측정하여 보드의 최대, 최소 또는 대수평균 특성온도(characteristic temperature)를 결정함으로써 해석모델의 민감도 및 타당성 검증이 수행될 수 있다. 한편, 열소산량의 검증을 위해서는 해당 소자의 케이스온도 측정이 필요한데, 열주기/열진공 시험시 측정할 수 있는 온도채널의 개수 제한 및 온도측정의 불확실성을 감안하여 약 100mW 이상 발열하는 소자에 대하여 온도 획득을 하기로 하였으며 총 25 개 채널의 온도측정 위치를 선정하였다.

Table 4 Part temperature derating requirements of CTU

Part type	Derating temperature	Criterion
Capacitor	110°C	Case temperature
Resistor	103°C	Case temperature
Transformer	105°C	Case temperature
Optocoupler	95°C	Junction temperature
Oscillator	110°C	Junction temperature
Inductor/Coil	105°C	Case temperature
Transistor	125°C	Junction temperature
Diode	125°C	Junction temperature
ICs	110°C	Junction temperature

Table 5 Thermal analysis cases of CTU with heat dissipation modeling

Analysis cases	Cond.	Conv.	Rad.	Heat dissp.
Preliminary thermal analysis	√			Analytical method w/ duty cycle
Conduction analysis	√			Semi-emp. method
Thermal cycling test simulation	√	√	√	Semi-emp. method
Thermal vacuum test simulation	√		√	Semi-emp. method

4. 전장품 궤도환경시험

4.1 전장품 열주기시험

원격측정명령처리기 열주기시험은 기저플레이트 기준으로 최저 -34°C 최고 71°C의 온도 범위를 가지며 12 사이클을 대기조건에서 수행하였다. 열주기시험챔버는 시험 중 불활성 질소가스를 계속 공급하여 저온조건일 때 수증기의 응축을 최소화한다. Fig. 10 은 열주기시험챔버 내에 설치된 원격 측정명령처리기의 사진이며 Fig. 11 은 열주기시험 결과 각 채널별로 획득된 온도 프로파일을 나타낸다. 총 25 개의 열전대를 부착하여 시험을 수행하였으나 4 개의 열전대(CH02, CH03, CH14, CH19)에 대한 온도획득은 실패하였다. 전장품의 특성상 열전대를 피사체에 직접 납땀할 수 없으므로 캡톤 테이프를 사용하여 열전대를 피사체에 접촉시켰다

이러한 4 개 채널의 비정상 온도응답 결과를 보면 온도의 심한 요동(fluctuation)을 보였으며 열전대 부착 후 열주기시험을 위한 이동, 시험을 위한 설치 등으로 인하여 열전대의 접점의 단락 또는 피사체와의 비접촉 등이 야기된 것으로 분석된다. 정상상태의 고온/저온 조건에서 온도응답의 변화가 심한 것은 원격측정명령처리기의 다양한 전기적 성능시험 수행 중 전장품을 on/off 하기 때문이다.

4.2 전장품 열진공시험

원격측정명령처리기 열진공시험은 열주기시험과 동일한 온도조건을 가지며 10^{-4} torr 의 열진공챔버에서 수행하였다. 총 25 개의 열전대 중 2 개의 열전대(CH06, CH22)에 대한 온도획득은 실패하였다. Fig. 12는 열진공시험 결과 각 채널별로 획득된 온도 프로파일이며 총 120 시간의 시험시간이 소요되어 70 시간의 열주기시험의 결과에 비해 저온/고온의 정상상태시간이 짧아 보이지만 실제로는 열주기시험과 동일한 정상상태시간을 가진다.

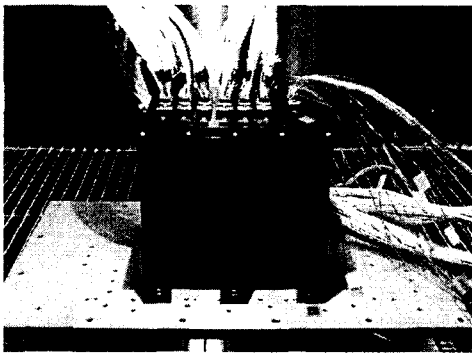


Fig. 10 CTU thermal cycling test setup

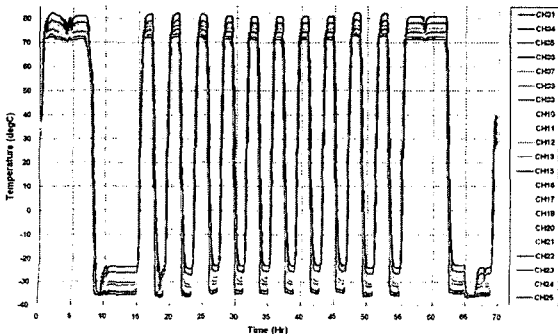


Fig. 11 Temperature profile of CTU thermal cycling test

5. 궤도환경시험 및 열해석 결과

5.1 궤도환경시험 및 열해석 결과 비교

Fig. 13 은 열주기시험모사 결과(T/C Analysis)와 열주기시험 결과(T/C Test)의 각 채널별 온도를 고온 및 저온조건에서 비교한 것이다. CH01 은 기저 플레이트의 온도이며 CH02~CH04 는 하우징에 부착되어 있는 열전대의 온도이다. CH05~CH17 의 열전대는 시그널보드에 부착되어 있으며 CH18~CH25 는 전력변환모듈에 부착되어 있다. 특히 전력변환모듈의 제어보드는 전류의 제어를 담당하고 있는 아날로그 보드로서 열집중이 가장 많은 부분이다. Fig. 13 에서 하우징의 온도가 실험결과보다 높은 이유는 실제 하우징의 두께가 9mm 영역, 3mm 영역 등 일정하지 않지만 열해석 모델에서는 열전달이 잘 되지 않는 최악조건을 고려하여 3mm 플레이트로만 모델링되어 있기 때문이다. CH02~CH04 는 하우징의 두께가 9mm 영역에 부착되어 있는 열전대로서, 하우징 두께를 9mm 로 다시 모델링하여 해석해 본 결과 실험치와 동일한 온도를 나타내었다. 결과적으로 열주기시험모사와 열주기시험 결과와의 차이는 최대 2°C로 나타났다.

Fig. 14 는 열진공시험모사 결과(T/V Analysis)와 열진공시험 결과(T/V Test)와의 각 채널별 온도를 고온 및 저온조건에서 비교한 것이다. 열진공시험모사와 열진공시험 결과의 차이가 최대 2°C로 나타났다.

열전도해석, 열진공시험모사 및 열주기시험모사에서는 소자의 열소산을 열플레이트로 모델링을 수행하지만 이것은 소자 열플레이트가 인접한 인쇄회로기판 격자에 얼마만큼의 입력열로 들어가는지를 모사하는 것이다. 실제 계산은 인쇄회로기판과 하우징 수준에서 수행되게 되며 결과적으로 소자가 장착되는 인쇄회로기판의 온도를 최종 획득한다. Fig. 14 에서 CH06~CH10, CH12, CH14, CH19,

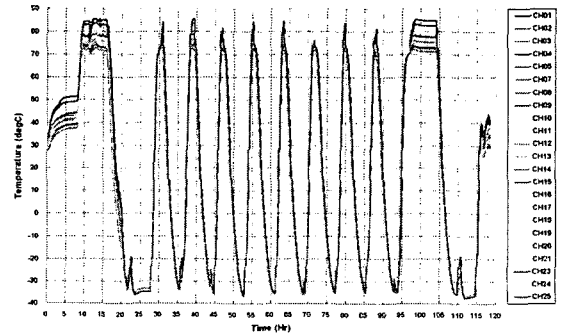
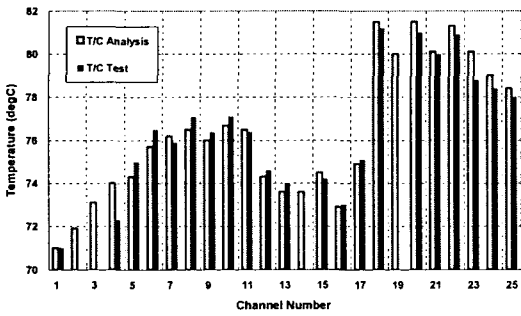


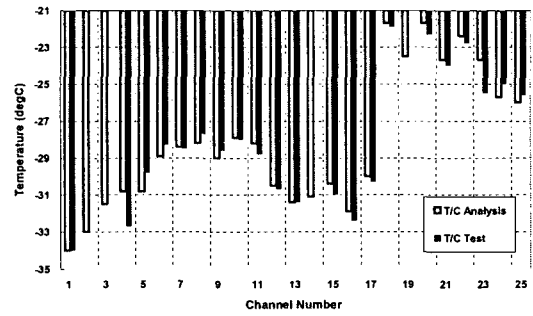
Fig. 12 Temperature profile of CTU thermal vacuum test

CH21~CH23 은 열전대가 인쇄회로기판이 아닌 소자의 케이스에 부착된 경우이다. 열해석으로부터 계산된 인쇄회로기판 온도를 동일한 위치의 소자 케이스온도와 비교해 보면 큰 차이를 보이지 않고 있다. 이것은 원격측정명령처리에 사용된 집적회로가 많은 수의 리드를 가지고 있고, 다이오드, 저항, 인덕터, 트랜스포머 등의 소자도 대부분 표면장착소자를 선정함으로써 소자 케이스와 인쇄회

로기판이 직접적으로 접촉되어 있어서 소자 케이스와 인쇄회로기판 사이의 열저항이 그리 크지 않기 때문이다. 또한 트랜지스터는 케이스와 인쇄회로기판 사이에 열패드(thermal pad)를 삽입하고 접촉시켜 열저항을 최소화 하였다. 소자의 케이스 온도의 정량적인 비교를 위해서는 이러한 인쇄회로기판의 열해석 결과와 각 소자의 열저항 및 열소산량이 필요하며 식 (10)과 유사하게 해석적

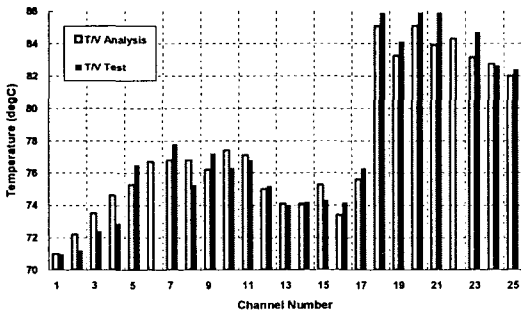


(a) Hot plateau case

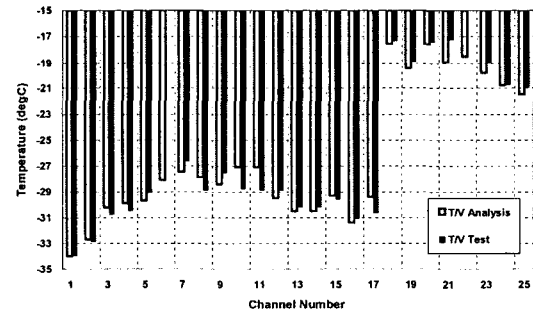


(b) Cold plateau case

Fig. 13 Comparison of CTU thermal cycling simulation and test results

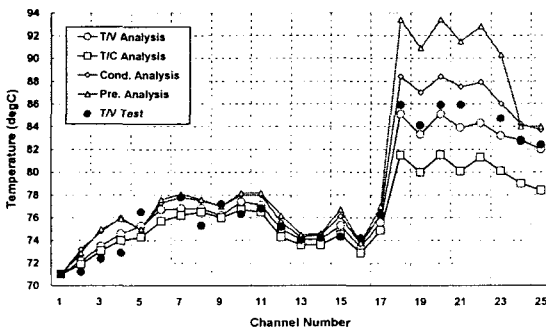


(a) Hot plateau case

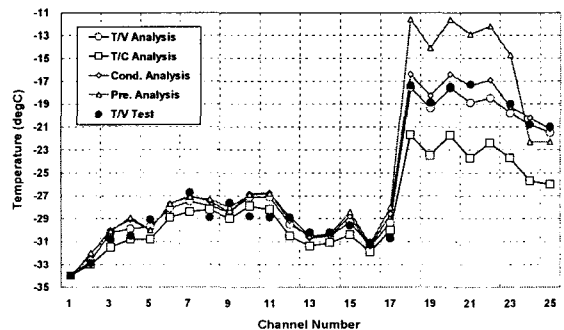


(b) Cold plateau case

Fig. 14 Comparison of CTU thermal vacuum simulation and test results



(a) Hot plateau case



(b) Cold plateau case

Fig. 15 Comparison of CTU thermal analysis cases and thermal vacuum test results

Table 6 Part junction temperature analysis of CTU signal boards

Part number	Q_i [W]	$R_{j\theta}$ [K/W]	T_j [°C]
JANTXV1N4616-1	0.001206	250	78.3
JANTXV1N4150-1	0.000178	250	78.0
JANTX1N4472	0.000189	42	78.0
JANTX1N4463	0.000077	42	78.0
JANTXV1N6510	0.019516	75	79.5
JANTXV2N2222A	0.000005	325	78.0
JANTX2N2907A	0.000001	325	78.0
IRHG7110	0.000006	90	78.0
5962-7802005MFA	0.182252	142	103.9
5962-7802302MFA	0.147706	151	100.3
5962-8766301BSA	0.001341	55	78.1
5962-8766401SA	0.001341	55	78.1
5962-8773901DA	0.014560	95	79.4
5962-8852514ZA	0.001948	34	78.1
5962-8959821MTA	0.036401	18	78.7
A1280A-1CQ172C	0.140000	25	81.5
A54SX16-1CQ208	0.009300	35	78.3
A54SX32-1CQ208	0.046270	35	79.6
A54SX32-1CQ256	0.146347	20	80.9
M21038/27-26	0.000000	-	78.0
CY7CX261-45WMB	0.002885	64	78.2
SG2815J	0.029463	70	80.1
UT69151CDXE-WCC	0.087360	11	79.0
UT80CRH196KDS-WCC	0.120120	22	80.6

로 구할 수 있을 것이다.

5.2 열해석 모델별 결과 비교

Fig. 15(a)는 예비열해석(Pre. Analysis), 열전도해석(Cond. Analysis), 열주기시험 모사(T/C Analysis) 및 열진공시험모사(T/V Analysis) 결과를 실제 측정된 열진공시험의 고온조건 결과(T/V Test)와 함께 나타낸 것이다. 열진공시험모사 결과와 비교할 때 설계완료 전 이론적인 열소산량만을 이용한 예비열해석 결과는 최대 8°C 정도의 높은 온도를 보이고 있다. 디지털소자가 많은 시그널보드에 비해 전력변환모듈에 장착된 아날로그소자 열소산량의 정확성이 실제보다 상당히 떨어짐을 알 수 있다. 그러나 보드레벨 소모전력 측정치를 활용한 반실험적 소자 열소산량 방법을 적용했을 때 열전도해석, 열진공시험모사 결과는 실제 열진공시험 결과에 근접하였다.

Fig. 15의 열전도해석의 경우 반실험적 소자 열소산량 방법을 적용했을 때 전영역에 걸쳐 열진공시험결과 보다 약간 높은 온도를 예측하고 있다. 그러나 열복사를 모델링하지 않기 때문에 열해석의 불확실성이 적고, 열전도 모델링의 용이하다는 점을 감안한다면 불확실성이 많은 열복사 모델링을 포함하는 열진공시험모사 보다 오히려 가치있는 결과를 보여주고 있다.

Table 7 Part junction temperature analysis of CTU EPC module

Part number	Q_i [W]	$R_{j\theta}$ [K/W]	T_j [°C]
JANTXV1N4109UR-1	0.026108	150	89.9
JANTXV1N5711UR-1	0.000000	100	86.0
JANTXV1N5802US	0.000000	20	86.0
JANTXV1N5811US	0.462990	10	90.6
JANTXV1N6638US	0.000000	50	86.0
JANTXV2N2907A	0.000906	325	86.3
JANTXV2N5666S	0.056242	145	94.2
JANTXV2N6782U	0.022875	27	86.6
M38510/11703BXX	0.000183	140	86.0

Fig. 15(b)는 저온조건에서 열해석 모델별 해석 결과와 열진공시험 결과와 비교한 것이며 고온조건의 경우와 대동소이한 결론을 유추할 수 있다.

6. 전장품 소자 접합온도 해석

Table 6 은 식 (10)을 사용하여 시그널보드에 사용된 다이오드, 트랜지스터 및 집적회로 소자의 접합온도의 최악온도 해석결과를 나타내었다. 여기서 시그널보드의 온도는 실제 측정된 열진공시험 결과 중 업링크/1553 보드의 최고 온도지점의 온도 78°C를 기준으로 계산되었다. Table 7 은 전력변환 제어보드의 최고 온도지점의 온도 86°C를 기준으로 계산된 소자의 접합온도 해석결과이다. Table 6, Table 7 에서와 같이 열진공시험모사 및 열진공시험 결과를 기준으로 소자 접합온도를 해석했을 때 원격측정명령처리 시그널보드 및 전력변환모듈에 사용된 모든 소자는 Table 4 의 온도 감쇄요구조건을 만족하였다.

7. 결론

정지궤도 위성 전장품의 열설계 검증을 위한 열해석 모델링 기법을 제시하고 원격측정명령처리기의 열해석에 활용되었으며 그 타당성 입증에 위해 열주기시험 및 열진공시험을 수행하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 이론적인 개별 소자의 열소산량에 대하여 보드레벨의 전력소모량을 가중치로 곱하여 열소산량을 환산하는 반실험적 소자 열소산량 방법을 개발하였으며 해석에 가장 큰 영향을 주는 입력변수인 열소산량의 정밀도를 높임으로써 실제 궤도환경시험 결과와도 잘 일치하였다.

(2) 열설계 변경에 따른 각 소자별 열모델링을 용이하게 수행하기 위하여 소자 및 인쇄회로기판 격자가 정확하게 정렬되어 있지 않은 경우, 소자

와 인쇄회로기판의 열전달을 해당 노드의 접촉면적으로 가중시켜 열전도 컨덕턴스로 모델링 하는 표면열모델을 제안하였다.

(3) 설계완료 전 설계검토를 위한 열해석, 시험 결과와의 비교를 위한 열해석 등의 목적을 위해 다양한 열해석 모델을 수립하였다. 그 결과 해석에 대한 불확실성이 적고 모델링이 용이한 열전도 해석모델이 열진공시험모사 결과보다 공학적으로 활용하는데 더 적합한 것으로 사료된다.

(4) 최종 검증된 열해석 모델을 사용하여 보드 레벨 및 소자 접합온도 해석을 수행한 결과, 원격 측정명령처리기 성능검증모델에 사용된 모든 소자가 온도 감쇄요구조건을 만족하였으며 정지궤도위 성용 전장품 설계의 열적 타당성을 확인하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부가 지원하는 “통신해양기상위성 1호 시스템 및 본체 개발사업”의 일환으로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Choi, S. B., 2004, “Development of Telemetry/Telecommand Process and Time Synchronization via Communication Satellite,” R&D Final Report, Korea Aerospace Research Institute.
- (2) TAS(Thermal Analysis System version 7.0) User’s Manual, 2002, Harvard Thermal Inc.
- (3) Kraus, A. D. and Bar-Cohen, A., 1983, *Thermal Analysis and Control for Electronic Equipment*, Hemisphere Publishing Corp.
- (4) Park, J. H. and Chang, Y. K., 2002, “A Study on Heat Mitigation for KOMPSAT-2 High Heat Dissipation Electronic Boxes,” *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 30, No. 3, pp. 77~86.
- (5) Card-lok Thermal Resistance Data, Calmark Corporation.
- (6) Lambert, M. A., Gavenall, I. G. and Fletcher, L. S., 1997, “Experimental Thermal Contact Conductance of Electronic Modules,” *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 11, No. 2, pp. 146~152.
- (7) Wedge-lok Performance Data, APW Ltd.
- (8) <http://www.frigprim.com/>.
- (9) Kang, M. Y., Park, J. H., Chang, Y. K. and Oh, H. S., 2001, “A Study on Thermal Modeling Methodology for Satellite Electronic Components,” *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 29, No. 7, pp. 127~136.
- (10) Seo, H. S., Shin, C. H., Kim, T. K. and Choi, S. W., 2001, “A Study on the Review of Design of Electronic Equipments for Satellite Using Thermal & Part Stress Analysis,” *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 29, No. 6, pp. 105~111.
- (11) Kim, J. H., Choi, S. B. and Yang, K. H., 2003, “Thermal Design of MGSE Panel for Thermal Vacuum Test of Ka-band Engineering Qualification Model Payload of Communications and Broadcasting Satellite,” *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 31, No. 2, pp. 96~102.
- (12) SINDA/G User’s Guide (Version 2.2), 2002, Network Analysis Inc.
- (13) Thermal Radiation Analyzer System (TRASYS) User’s Manual, 1988, Johnson Space Center, NASA.