

외장형 HEAT PIPE가 장착된 정지궤도 위성 패널의 열해석

전 형 열^{*1}, 김 정 훈¹

THERMAL ANALYSIS OF SURFACE HEAT PIPE INSTALLED PANEL OF GEOSTATIONARY SATELLITE

H.Y. Jun^{*1} and J.H. Kim¹

The north panel of a geostationary satellite is used as one of the main radiators, on which communication equipment or bus equipment are installed. The thermal control of panel is designed by using embedded heat pipes and surface heat pipes (or external heat pipes) to spread out heat dissipated from equipment all over the radiator evenly and finally to reject the heat to the space through the radiator efficiently. This panel is also divided by several areas based on the operating temperature and dissipation of equipment in order to increase heat rejection capability of radiator.

The thermal analysis is carried out for the hot case, Winter Solsitce EOL (End Of Life), in order to validate thermal design of the panel utilized 6 surface heat pipes and 8 embedded heat pipes. The sensitivity studies for the heat pipe failure case and no heat pipe case are performed and compared to its normal state. The heat transport capability of heat pipe is also obtained from these calculations.

Key Words: 열해석(Thermal Analysis), 방열판(Radiator), 히트 파이프(Heat Pipe), 정지궤도 위성(Geostationary Satellite)

1. 서 론

정지궤도 위성 패널의 열 설계는 부품의 적정 온도 및 위성체의 온도 유지를 위해 매우 중요한 일이다. 정지 궤도의 특징상 남쪽 패널과 북쪽 패널은 동시에 태양 복사에너지가 들어오지 않아, 상대적으로 열 방출에 유리하여 방열판으로 사용 된다. 특히 통신위성은 부품의 발열량이 많은 관계로 남쪽과 북쪽 패널이 위성체의 주 방열판으로 사용되며, 효율적인 열관리를 위해 히트 파이프 네트워크를 사용한다. 외부 즉 우주공간으로 열을 방출하기 위해 패널의 바깥쪽에는 OSR(Optical Solar Reflector)과 외부와 열적으로 차단을 위해 다층박막절연재(Multi Layer Insulation : MLI)등이 사용된다.

위성에 사용되는 히트 파이프는 일반적으로 내장형 히트 파이프를 사용하며[1,2], 경우에 따라서는 외장형 히트 파이프

를 병행해 사용하기도 한다. 특히 히트 파이프의 배치는 매우 중요하여, 각 위성체 회사마다 독특한 디자인 형태를 갖기도 한다.

패널 열설계를 검증하기 위해, 열해석이 수행되며, 이 열해석을 통해 부품의 온도 및 히트 파이프의 주요 요구 사항등이 결정되기도 한다. 정지궤도 위성 패널 열해석에 관한 국내 연구는 무궁화 위성[1]에 대해 처음으로 수행되었으며, 그 후로 기술인증 모델 탑재체에 대한 열해석 및 열진공 시험이 수행되었다[2]. 이 기술 인증 모델은 다소 작은, 1.3m x 1.3m 크기의 패널로 Ka band 탑재체의 우주 인증을 주 목적으로 하였으며, 위성에 실리지는 못했다. 두 연구 모두 내장형 히트 파이프 네트워크를 이용하였으며, 패널 전체를 방열판으로 사용하여 패널 전체의 온도를 균일하게 유지하는 열제어 방법이 적용되었다.

국내 저궤도 위성의 열제어 설계에서도 히트 파이프가 사용되었으나 히트 파이프 수량이 매우 적고, 우주 열환경이 다르기 때문에 통신 모듈을 탑재한 정지궤도 위성과는 비교하기가 곤란하다.

본 연구에서는 개발중인 정지궤도 위성의 북쪽 패널에 대

접수일: 2006년 6월 7일, 심사완료일: 2006년 8월 5일.

1 정회원, 한국항공우주연구소 통신해양기상위성사업단
체계종합팀

* Corresponding author E-mail: hyoungyoll@cmpal.com

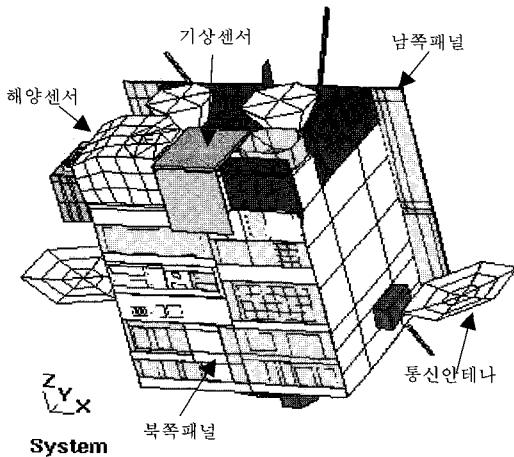


Fig. 1 Geostationary satellite (thermal model)

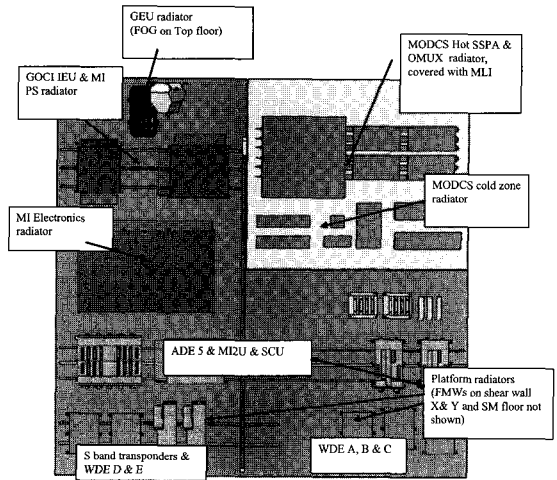


Fig. 2 Component layout on internal north panel

한 열설계 기본 개념과 열해석에 관한 내용을 다루고 있다. 이 북쪽 패널에는 통신, 해양 및 기상에 관련된 장비들이 부착되어 있다. 즉 SSPA(Solid State Power Amplifier), OMUX(Output Multiplexer), WDE(Wheel Drive Electronics), GEU(Gyroscope Electronic Unit) 및 기상 및 해양 탑재체 전자 장비들이 부착되어 있다. 이 북쪽 패널에는 열의 고른 분산을 위해 내장형 히트 파이프가 사용되었으며, 외부 표면은 방열판으로 사용된다. 또한 기존 위성 패널[1,2]과는 다른 프렌지가 넓은 외장형 히트 파이프가 내장형 히트 파이프와 함께 사용되었다. 외장형 히트 파이프의 사용은 패널 설계에 있어 내장형만을 사용하는 경우에 비해 설계 및 변경이 쉽고, 열수송량이 내장형에 비해 큰 장점을 갖고 있다. 패널 전체를 균일한 온도로 유지하기 위한 열제어 방법[1,2] 대신에 부품의 온도 및 발열량에 따라 패널 영역을 몇 개로 나누어, 각각 제어하는 방법을 사용하고 있다.

2. 열설계

Fig. 1은 통신 및 기상 탑재체를 탑재한 정지궤도 위성이다. 본 위성은 기상 센서 방열판의 시야각을 확보하기 위해 남쪽 패널에만 태양 전지판이 부착되어 있다. 북쪽 패널에 대한 기본적인 열설계는 다음과 같다.

2.1 패널의 열설계

Fig. 2와 같이 발열량이 많은 SSPA들은 외장형 히트 파이프 위에 장착되어 있으며, 작동 온도가 비슷한 부품들을 몇 개의 영역으로 나누어 열제어를 수행한다. 해양 센서와 기상 센서 전자 장비들은 센서와 가까운 북쪽 패널 상단 방열판 패널에 부착되어 있다.

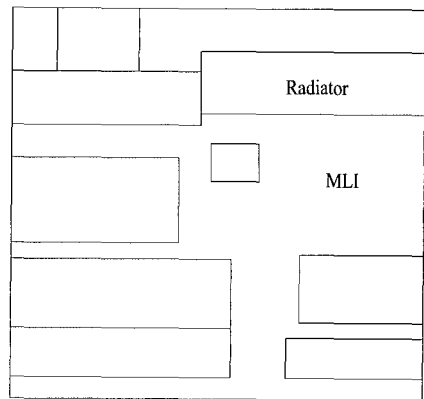


Fig. 3 Radiator/MLI layout on external north panel

MODCS(Meteorological and Ocean Data Communication Subsystem)와 관련된 부품들도 안테나와 가까운 패널 상단에 장착되어 있으며, 내장형 히트 파이프와 OSR를 이용해 열제어를 수행한다. SSPA와 OMUX는 외장형 히트 파이프 위에 장착되어 있다. 최종적인 열의 방출은 외부 표면의 OSR를 통해 우주로 방출된다. 또한 SSPA와 OMUX는 다층박막절연재(MLI)로 싸여 있어, 온도가 낮은 패널의 다른 영역과 분리된다. GEU는 독립적인 방열판 위에 장착된다. ADE5(Actuation Drive Unit), MI2U(Meteo Imager Interface Unit), SCU(Spacecraft Computer Unit)들은 같은 방열판 위에 장착되며, 내장형 히트 파이프를 통해 열을 분산시킨다. S-band 송수신기(TRSP)는 WDE와 같이 패널 하단 방열판 위에 장착되며, 역시 내장형 히트 파이프를 사용하여 열제어를 수행한다. Fig. 3은 북쪽 패널의 방열판을 나타내며, 방열판을 제외한 나머지 부분은 외

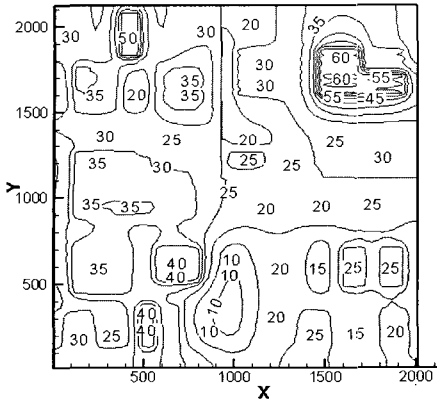


Fig. 4 Temperature plots (no heat pipe case)

부(우주공간)와 열적으로 차단하기 위해 다층박막절연재(MLI)로 싸여 있다. Table. 1은 각 부품의 온도 요구 조건을 나타낸다. 또한 Table. 2는 부품의 발열량 및 열 모델에 사용된 노드 번호를 나타낸다. 표에서 알 수 있듯이 북쪽 패널은 총 523.8 W의 열이 발생된다.

2.2 열해석

2.2.1 히트 파이프 없는 패널 열해석(CASE 1)

히트 파이프 배치에 앞서 기본적인 부품의 배치를 바탕으로(Fig. 2) 히트 파이프 없이 열해석을 수행하였다. 북쪽 패널의 온도가 가장 높을 때는 임무말 동지이며, 이 때 태양에 의한 열유입량이 일년 중 가장 많다. 각 부품이 Table. 2와 같이 작동하고 있다고 가정하여 열해석을 수행하였다. 이 때 우주공간과 복사에 의한 열교환 및 태양열 유입량을 고려하였다. SSPA 및 OMUX 지역은 MLI로 싸여 있으며, 그 외 위성체 내부는 검은색 페인트가 사용된다고 가정하였다. 본 정지궤도 위성 패널의 열해석에 있어서는 5°C 불확실성 온도 여유를 고려하며, 해석이 결과가 기본적으로 인증(Qualification) 온도로부터 10°C 이상(불확실성 포함하여 15°C 이상)의 여유를 갖

Table. 1 Temperature requirements

Equipment	TFO (C)		TNF (C)		TSU (C)
	min	max	min	max	
MODCS SSPA	0	65	-40	80	-40
MODCS OMUX	-10	60	-40	80	-40
MODCS others units	-10	60	-40	75	-40
MI Electronics	-5	40	-30	40	-30
MI Power Supply	-5	45	-30	45	-30
GOCI Electronics	-25	60	-40	75	-40
GEU (GYRO)	-20	60	-40	75	-40
WDE	-15	60	-40	75	-40
SCU	-25	60	-40	75	-40
ADE5	-25	60	-40	75	-40
MI2U	-25	60	-40	75	-40
TRSP	-10	55	-40	75	-40

TFO : Operating temperature
 TNF : Non functioning temperature
 TSU : Start-up temperature

도록 열제어계를 설계한다.

패널의 열해석을 위해서 일반적으로 널리 사용되는 상용 프로그램인 SINDA(Systems Improved Numerical Differencing Analyzer)를 사용하였다[3]. SINDA는 열전달이 일어나는 격자(노드)를 집중 열용량법으로 모사하고 격자(노드)간 열저항으로 연결시켜 해를 구하는, 식 (1)과 같은 네트워크 해석법을 사용한다[3,4].

$$m_i c_i \frac{dT_i}{dt} = \sum_j C_{ij} (T_j - T_i) + \sigma \sum_j R_{ij} (T_j^4 - T_i^4) + QS_i + QI_i + QR_i \quad (1)$$

여기서, 하첨자 i, j는 노드를 나타내며, mc는 노드의 열용량(J/K), T는 온도(K), C_{ij}는 노드 i와 j사이 전도 연결 계수(W/K), R_{ij}는 노드 i와 j사이 복사 연결 계수(m²), QS는 외부 태양에 의한 열유입량(W), QI는 내부의 발열량, QR는 히터의 발열량(W)을 각각 나타낸다.

Fig. 4는 안쪽 패널 면재의 열해석 결과를 보여주고 있다. 그림과 같이 국부적으로 열이 많이 발생하는 곳(SSPA)은 온도가 60°C까지 올라감을 알 수 있으며, 이 때의 부품의 온도는 62°C로 5°C 해석의 불확실성 여유를 고려했을 때는 67°C로 요구 조건인 65°C를 만족시키지 못한다. 또한 SSPA영역은 열의 분산이 제대로 이루어지지 않아, 같은 방열판에서도 온도 구배가 심함을 알 수 있다. 이와 같은 심한 온도 구배는 열제어 있어도 바람직하지 않지만, 열변형을 유발시킬 수 있어 역시 바람직하지 않다. 따라서 각 방열판이 장착된 부분의 온도를 일정하게 유지하기 위해 내장형 히트 파이프와 외장형

Table. 2 Power dissipation of components

Equipment	Heat dissipation (W)	Node number
MODC SSPA 1	39	250001
MODC SSPA 2	39	250002
MODC SSPA 3	39	250003
MODC SSPA 4	0	250004
MODCS OMUX	0	250005
MODCS Modulator 1	8	250006
MODCS Modulator 2	0	250007
MODCS Receiver 1	4	250008
MODCS Receiver 2	0	250009
MODCS Input Filter	0	250010
MODCS Coax Switch	0	250011
MODCS IMUX	0	250012
MI Electronics	90	280131-280154
MI Power Supply	33	280241-280252
GOCI Electronics	40	280042
GEU (GYRO)	40	280043
WDE 1 (D)	11	260001
WDE 2 (E)	0	260002
WDE 3 (A)	11	270003
WDE 4 (B)	0	270004
WDE 5 (C)	11	270005
SCU 1	19.7	270013
SCU 2	19.7	270014
ADE 5	43.2	260011
MI2U	45	260012
TRSP 1	31.2	260006
TRSP 2	0	260007
Total	523.8	

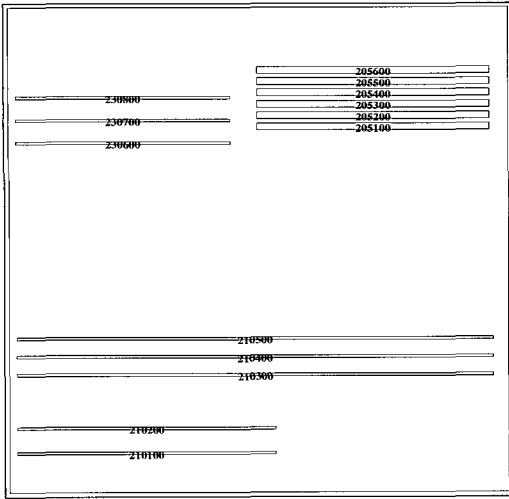


Fig. 5 Heat pipe(vapor) node layout

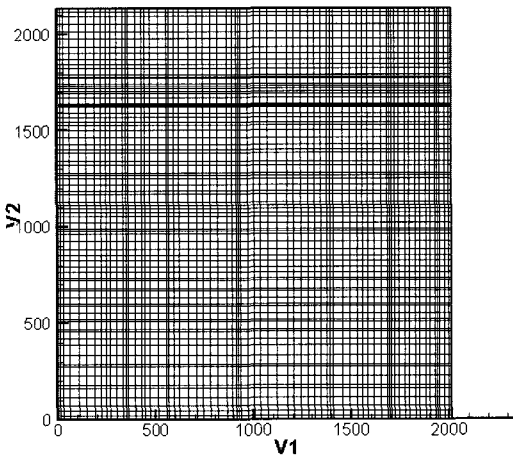


Fig. 6 Computation grid (70 x 80, unit: mm)

히트 파이프를 배치하여 부품에서 발생하는 열을 분산시킨다.

2.2.2 히트 파이프 패널 열해석(CASE 2)

효율적인 열의 분산 및 고른 온도 분포를 위해, Fig. 5와 같이 6개의 외장형 히트파이프와 8개의 내장형 히트 파이프가 북쪽 패널에 사용되었다.

CASE 1과 동일한 조건 및 환경하에서 내장 및 외장형 히트 파이프를 고려하여 북쪽 패널에 대한 열해석을 수행하였다. Fig. 6은 히트 파이프, 부품, 방열판의 위치를 고려한 패널의 상세 격자를 보여주고 있다.

패널은 총 5600개의 노드로 구성 된다(x축은 70개, y축은 80개 노드로 나누어진다). 히트 파이프는 각각 한 개의 증기 노드와 다수의 히트 파이프 노드로 나누어진다(총 14개의 증

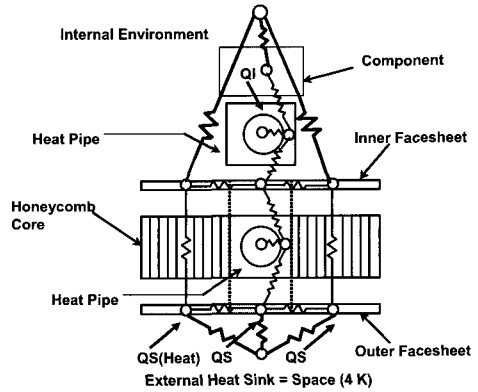


Fig. 7 Thermal couplings through the panel

기노드와 536개의 히트파이프 노드가 사용되었다). Fig. 7은 패널의 부품, 히트 파이프, 하니콤 면재와의 열적 연결을 보여주고 있다. 내부 면재는 내부 환경과 복사로 연결되어 있고, 외부 면재는 우주공간과 복사로 연결되어 있다. Fig. 7에서 굵은 선으로 표시된 연결은 복사연결을 나타내며, 나머지는 전도 연결을 나타낸다. 패널의 면재 및 하니콤 재료로는 각각 Al-2024-T81과 Al 3/16-5056-10P이 사용되었으면 패널의 총두께는 25mm 이다.

SINDA에 대한 입력 값으로는 각 노드에 대한 C_{ij} , R_{ij} , QS , QI 및 QR 이 필요하며, 식 (2)와 식 (3)과 같다. 본 경우는 히터 작동이 없기 때문에 QR 를 고려하지 않는다.

$$C_{ij} = \frac{kA_i}{L}, R_{ij} = \epsilon_i A_i F_{ij} \tag{2}$$

$$Q_i = QS_i = \alpha_i A_i S \cos \alpha \tag{3}$$

여기서 k 는 열전도, A 는 면적, L 은 노드 사이의 열적 길이, S 는 계절에 따른 태양상수, ϵ_i 는 표면의 방사율, α_i 는 표면의 흡수율, F_{ij} 는 View Factor, α 는 외부 표면에 대한 태양 입사각을 각각 나타낸다[4].

Fig. 8은 각 부품의 패널 배치 및 모델에 사용된 노드를 나타낸다. 그림에서와 같이 ADE5, MI2U, SCU는 내장형 히트 파이프를 통해 하나의 영역으로 묶여 있음을 알 수 있다.

히트 파이프는 알루미늄이며, 히트 파이프의 작동유체로는 위성체에 일반적인 암모니아를 사용하였다. 각각의 히트 파이프 노드는 면재와 연결된다. 외장형 히트 파이프의 한면은 패널의 본딩을 통해 접합되고 다른 쪽에는 발열량이 큰 부품들(SSPA, OMUX)이 장착된다. 각 부품은 발열량에 따라 필러를 사용하여 열 전도성을 증가 시킨다.

열해석을 통해 히트 파이프의 열수송 능력 및 각 부품 및

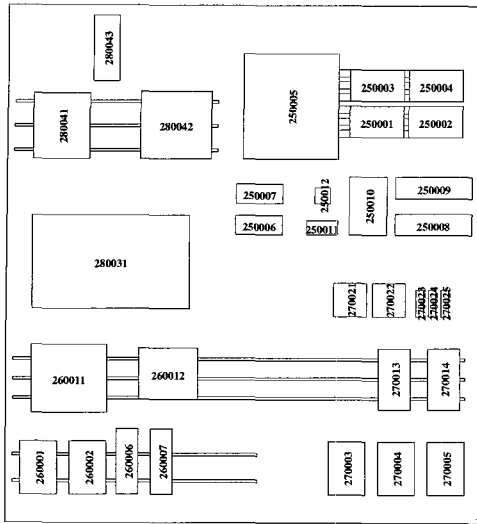


Fig. 8 Component layout and node number

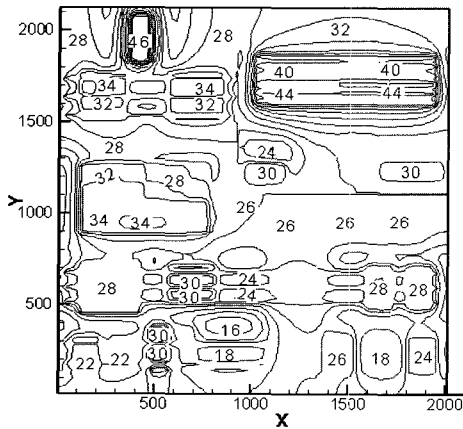


Fig. 9 Temperature plot (with heat pipe case)

패널의 온도를 구하였다. 패널 안쪽 면재의 온도 분포는 Fig. 9와 같다. SSPA가 장착된 부분의 온도가 44°C를 나타내고 있으며, GEU 부분의 온도는 이 보다는 다소 높은 46°C를 나타낸다. 방열판이 위치한 지역의 온도는 히트 파이프의 영향으로 비교적 균일한 온도 분포를 가지고 있다. 모든 부품 및 주요 구조체의 온도가 요구 조건을 만족함을 알 수 있다. 이 때 부품, SSPA는 최고 46°C 온도를 나타내며, 해석의 불확실성 5°C를 고려했을 때, 14°C의 온도 여유를 갖고 있으며, GEU는 7°C(60°C:운용온도-48°C:열해석 온도-5°C:불확실성) 정도의 온도 여유를 갖고 있다.

히트 파이프의 열 수송 능력은 증기 노드와 각 히트 파이프 노드간의 열 교환량을 히트 파이프 길이 방향을 따라 적분하여 구하였다. Fig. 10과 Fig. 11은 SSPA 영역 및 ADE5, SCU, MODCS에 사용된 히트 파이프의 열 수송능력을 나타낸

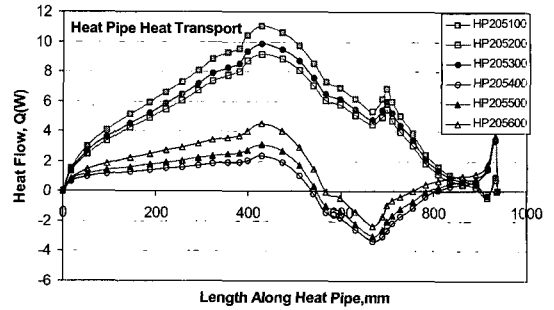


Fig. 10 Heat transport capacity (surface heat pipe)

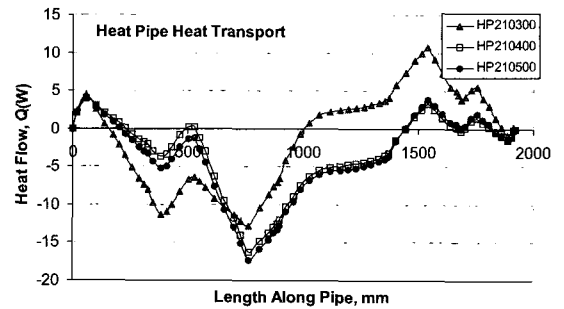


Fig. 11 Heat transport capacity (embedded heat pipe)

다. 외장형 히트 파이프(HP205100 - HP205600)와 내장형 히트 파이프(HP210300-HP210500)의 위치는 Fig. 5와 같다. HP205100에서 5.46 Wm, HP210300에서 10.8 Wm의 열 수송량을 구하였다.

2.2.3 히트파이프 파손 경우(CASE 3)

히트 파이프가 파손된 경우의 열해석을 수행하였으며 이때의 부품의 온도 및 히트 파이프의 열 수송량도 각각 구하였다. 각 방열판 영역에서 가장 수송능력이 큰 히트 파이프를 각각 선택하여 작동하지 않는다고 가정하였다. 따라서 3개의 내장형 히트 파이프(HP210200, HP210300, HP230600)와 한개의 외장형 히트 파이프(HP205100)를 선정하였다.

열해석을 통해 전체적인 패널의 온도 분포 및 열 수송능력을 구하였으며, 온도 분포는 Fig. 12와 같다. Table. 3은 각 경우의 부품의 온도를 나타낸다. 히트 파이프 파손의 경우(CASE 3) 전체적인 온도 분포는 CASE 2와 비교해 큰 차이가 없으며, 부품의 온도 역시 비슷하다. 단 SSPA가 1.5°C, S-band TRSP의 온도가 3.3°C 올라갔으나 역시 온도 요구조건을 만족한다.

Table. 4는 열 수송량을 나타낸다. 전체적으로 수송량이 증가했으며, 외장형에서는 HP205200이 2.15 Wm, 내장형에서는 HP210400이 4.05 Wm 만큼 증가 하였다.

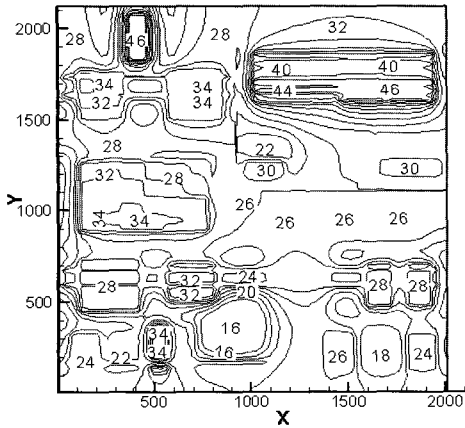


Fig. 12 Temperature plot (heat pipe failure case)

Table. 3 Temperature of the components

Equipment	Node number	T(no hp)	T(hp)	T(hp failure)
MODC SSPA 1	250001	61,8	46,1	47,6
MODC SSPA 2	250002	57,5	46,0	47,5
MODC SSPA 3	250003	60,6	43,3	43,3
MODC SSPA 4	250004	37,0	41,1	41,0
MODCS OMUX	250005	30,9	42,5	42,2
MODCS Modulator 1	250006	27,0	30,3	30,0
MODCS Modulator 2	250007	19,2	23,5	23,0
MODCS Receiver 1	250008	27,7	30,5	30,4
MODCS Receiver 2	250009	27,6	29,2	29,3
MODCS Input Filter	250010	26,2	28,6	28,5
MODCS Coax Switch	250011	23,9	27,1	26,9
MODCS IMUX	250012	24,1	27,7	27,3
GOCI Electronics	280042	37,0	34,6	35,3
GEU (GYRO)	280043	48,3	48,1	48,2
WDE 1 (D)	260001	28,7	23,1	24,1
WDE 2 (E)	260002	24,5	21,2	21,6
WDE 3 (A)	270003	23,0	26,3	25,9
WDE 4 (B)	270004	15,7	18,5	18,3
WDE 5 (C)	270005	22,5	25,1	25,0
SCU 1	270013	26,7	28,3	29,0
SCU 2	270014	27,1	28,2	28,9
ADE 5	260011	35,3	28,2	29,3
MI2U	260012	41,6	33,4	34,2
TRSP 1	260006	43,0	31,1	34,4
TRSP 2	260007	26,8	22,1	22,6

Table. 4 Heat transport capacity

Heat Pipe	Transport Capability (W m)	
	Normal	Failure
205100	5,46	Failure
205200	4,5	6,65
205300	4,85	6,36
205400	1,39	1,43
205500	1,56	1,66
205600	1,92	2,02
210100	2	2,89
210200	2,5	Failure
210300	10,8	Failure
210400	8,3	12,88
210500	9,48	11,94
230600	1,4	Failure
230700	0,88	1,027
230800	0,75	0,76

3. 결 론

세 경우에 대한 열해석을 수행하였으며, 특히 발열량이 많은 SSPA는 히트 파이프의 영향으로 CASE 1과 CASE 2를 비교했을 때 15°C, S-band TRSPI는 11.9°C의 온도차이가 있음을 알 수 있었다. 히트 파이프를 사용한 경우는 온도 구배가 상대적으로 균일하여 열변형을 감소시킬 수 있고, 열의 분산을 통해 부품의 온도 요구 조건을 만족시킬 수 있었다. 히트 파이프의 파손을 가정한 경우 역시 큰 무리 없이 온도 요구조건을 만족시킴을 알 수 있다.

열해석 결과에서도 알 수 있듯이 전체적인 패널의 온도를 균일하게 유지하는 방법이 아닌, 발열량이나 안테나의 위치등을 고려해서 영역을 나누고, 그 영역의 온도를 일정하게 유지하는 방법을 통한 열제어를 수행하였다. 일반적으로 이와 같은 방법은 열 방출량을 극대화 할 수 있고 상대적으로 방열판의 면적을 줄일 수 있다.

열 수송능력은 전체적으로 히트 파이프 요구조건보다는 낮은 영역에서 작동하고 있음을 알 수 있다. 외장형 히트 파이프는 열 수송 능력이 크고 설계에 있어 유연성을 갖고 있어, 내장형에 비해 설계 변경이 유리하다. 따라서 초기 위성 개발에 있어 개발 기간을 단축할 수 있는 매우 큰 장점을 갖고 있다. 하지만 부품이 외장형 히트 파이프에 장착되는 관계로 다소 큰 공간이 필요하다.

패널에 대한 열해석 통해 현 단계 (Preliminary Design) 패널의 열설계를 검증할 수 있었으며, 부품의 온도 요구 조건 및 히트 파이프의 요구 조건을 충족시킴을 알 수 있다.

패널 단계의 열해석 결과에 대한 검증은 향후, 위성체 수준의 열진공 실험을 통해, 위성체 모델에 대한 검증과 동시에 같이 실시할 예정이다.

참고문헌

- [1] Choi, S. and Han, H., 1998, "Thermal Design of the Prototype Payload Panel," *Space Technol.*, Vol.18, No.46, p.247-253.
- [2] Kim, J., Choi, S. and Yang, K., 2003, "Thermal Design of MGSE Panel for Thermal Vacuum Test of Ka-band Engineering Qualification Model Payload of Communication and Broadcasting Satellite," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol.31, No.2, p.96-102.
- [3] *Network Analysis Inc.*, 2002, SINDA/G User's Guide (Version 2.2).
- [4] Agrawal, B.N., 1986, *Design of Geosynchronous Spacecraft*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey.