



기판에 부착된 인공위성용 필름 히터의 성능 및 온도 변화 특성

최진우^a, 성재용^{b,*}, 김준현^c

Performance and Temperature Change Characteristics of a Film Heater Attached to Substrates for Satellite Applications

Jinwoo Choi^a, Jaeyong Sung^{b,*}, Joon Hyun Kim^c^a Graduate Student, Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Science & Technology^b Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science & Technology^c NDT Research Center, Seoul National University of Science & Technology

ARTICLE INFO

Article history:

Received 7 September 2023
Revised 27 September 2023
Accepted 4 October 2023

Keywords:

Silver paste
Film heater
Satellite
Power density
Performance curve

ABSTRACT

This study has examined the performance and temperature change characteristics of a satellite film heater fabricated using screen printing technology using silver paste. The temperature variations in the film heater attached to CFRP and Al 6061 substrates were modeled numerically in an FM (Flight Model) environment incorporating radiation heat transfers in a vacuum state under various sink temperatures. The results demonstrate that the constrained distance between heaters increases non-linearly with the sink temperature. The required power density to reach the maximum allowable temperature diminishes with the sink temperature. The required power density is higher than the ESCC standard of 0.54 W/cm^2 , which is assessed in an EM (engineering model) environment without substrate.

1. 서론

우주에서 임무를 수행하는 인공위성은 수많은 기술이 집약되어 있다. 필름 히터는 내부 센서나 전자 장치에 부착되어 열을 제어하는 역할을 한다. 궤도를 돌면서 지구 그림자에 가려지게 되면 영하의 온도에 노출되게 되고 이는 인공위성 임무 수행에 있어서 해결해야 할 문제다. 그렇기에 얇은 필름 히터를 부착하여 전자 장치의 온도를 일정하게 유지되도록 한다.

상용화된 필름 히터의 주재료는 절연체인 폴리이미드 필름과 열선 역할을 하는 인코넬을 사용한다. 얇은 두께와 정밀한 가공을 위해 폴리이미드 필름 위에 에칭 공정으로 제조한다. 히터의 성능을 평가하는 지표는 power density(전력 밀도)이며, ESCC(european space

components coordination)기준에 따르면 전력 밀도는 히터에 사용되는 전력을 유효 면적으로 나눈 값이다^[1]. 히터의 총면적에서 전선 연결 터미널과 가장자리 부분을 제외한 면적을 유효 면적이라 정의한다. 히터의 최대 온도는 전력 밀도에 비례하여 상승하며, 과도한 출력을 제한하기 위한 전력 밀도 기준이 필요하다. ESCC에서는 0.54 W/cm^2 를 전력 밀도 상한선으로 제시하고 있다. ESCC 기준인 0.54 W/cm^2 는 EM(engineering model)급 환경, 즉 상온(25°C)의 대기 상태에서 필름 히터를 공중에 매달아 필름 히터의 온도가 200°C 이하로 유지되는 조건이다. 그러나 이는 기판의 목표 온도를 위한 전력이 아닌 필름 히터 재료가 버틸 수 있는 전력을 기준으로 제시된 값이기에 기판에 부착된 필름 히터의 성능 평가에는 적절하지 않다. 특히 인공위성에서 사용될 시 외부 환경은 FM(flight model)급 환

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6398

E-mail address: jysung@seoultech.ac.kr (Jaeyong Sung).

경, 즉 대기 조건이 아닌 진공 조건이고 주변 온도도 크게 변화기 때문에 전력 밀도 기준이 달라질 수 있다²⁾.

필름 히터 자체에 관한 연구는 크게 제작 공정에 관한 연구, 재료 특성에 관한 연구 그리고 성능 평가에 관한 연구로 나눌 수 있다. 필름 히터 제작 시간 및 비용을 절감할 수 있는 방안으로 스크린 프린팅 기술이 제안되었다. 인코넬 재료를 대체하여 실버 페이스트(silver-paste)를 폴리이미드 필름 위에 인쇄하는 방식으로 실버 페이스트의 비저항을 조절하여 열선의 저항을 컨트롤 할 수 있다. 폴리머 형태 실버 페이스트는 순수한 실버의 비저항보다 대략 30 배 큰 값을 가지게 되며 $4.0 \times 10^{-5} \sim 9.0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ 로 그 범위가 넓은 편이다³⁾. 이는 다양한 전압 환경에서 중요한 변수가 되며 Kim 등⁴⁾은 스크린 프린팅 방식으로 제작한 실버 페이스트 필름 히터의 성능 평가에 대한 연구를 수행하였다.

필름 히터는 인공위성 전자 장치의 금속판 또는 복합재 판에 부착되어 사용된다. 필름 히터가 기판에 불완전하게 부착될 경우 히터의 박리나 접합 면에 공극을 발생시켜 주름 박리나 burn-out 등 고장을 일으킬 수 있다. 따라서 인증된 접착제를 사용하여야 하고 정밀한 부착 공정을 통해 열을 효과적으로 전달해야 한다^{5,6)}. 접착 강도가 유지되고 진공 상태에서 히터 물질이 밖으로 토출되는 현상(outgassing)이 적은 3M 사의 966 양면 접착제를 일반적으로 사용하고 있다. Schlitt 등⁷⁾은 Minco 사의 필름 히터를 CFRP와 알루미늄에 부착한 형태로 파워 스텝을 증가시켜 한계 전력 밀도를 측정하였다. 그러나 진공 상태이면서도 다양한 우주 환경 온도를 가지는 FM급 조건에서 인공위성의 기판에 부착된 필름 히터의 열전달 특성 및 성능 곡선에 대해서는 아직 구체적으로 연구되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 기판에 부착된 인공위성용 필름 히터의 성능 및 온도 변화 특성을 연구하고자 한다. 이를 위해서 서로 다른 기판에 따라 최대 허용 온도를 넘지 않는 FM급 성능 곡선을 작성하고자 한다. FM급 해석 기법을 구축하기 위해서 EM급 실험과 해석의 결과 비교를 통해 해석 기법을 검증한다. 시간에 따른 온도 분포를 통해 필름 히터의 부착으로 기판의 최소 온도를 유지하기 위한 히터 간 한계 거리를 추정하고자 한다. 또한 성능 곡선의 특성을 분석하고 기판의 종류가 성능 곡선에 어떠한 영향을 살펴보고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 재료 물성치 및 실버 페이스트 열선의 비저항 측정

본 연구에서 사용한 재료는 크게 5가지로 기판 재료인 CFRP, Al 6061 2개와 필름 히터에 사용된 폴리이미드, 실버 페이스트 마지막으로 접착제인 3M-966이다. 자세한 수치는 Table 1에 정

Table 1 Materials properties

Value	Density ρ [kg/m ³]	Resistivity R_0 [$\Omega \cdot \text{cm}$]	Conductivity k [W/(m·K)]	Specific heat C_p [J/(g·°C)]
Al 6061	2700	3.99×10^{-6}	167	0.896
CFRP	1620	0.025	10	1.04
Silver-paste	10490	4.23×10^{-5}	8.9	0.3
Polyimide	1420	1.5×10^{17}	0.12	1.09
Adhesive (3M-966)	1012	4×10^{15}	0.178	1.47

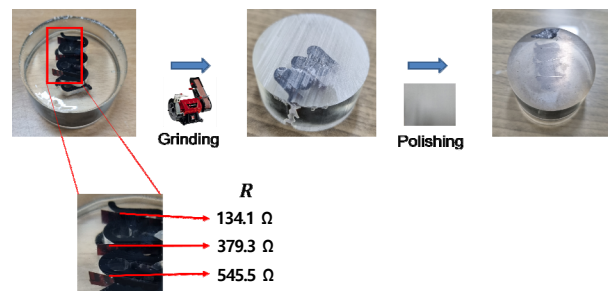


Fig. 1 Process of making sample for SEM imaging

리하였다. 여기서 중요한 점은 실버 페이스트의 비저항을 따로 계산해야 하는 것이다. 제작 공정의 레시피를 다르게 하면 비저항도 달라지기 때문에 도선 저항식을 이용해 비저항을 계산해야 한다.

$$R = R_0 \frac{l}{wt} \quad (1)$$

여기서 R_0 는 비저항이고 R 은 저항, l 은 열선의 길이, w 는 열선의 폭, t 는 열선의 두께다.

Fig. 1은 평균적인 비저항 값을 구하기 위해 서로 다른 저항을 가진 필름 히터 3개의 샘플을 제작하는 과정이다. 저항은 134.1, 379.3, 545.5 Ω 각각 1개씩 사용하였다. 정밀한 두께 산출을 위해 열선이 노출되게 절단 후 epoxy로 cold mount를 진행하였다. 그 라인딩과 폴리싱 과정을 거쳐 샘플을 완성한 뒤 SEM을 이용하여 정밀 측정하였다.

Fig. 2는 샘플들의 SEM 이미지 결과 사진이고 열선의 두께를 측정하여 제시하였다. 134.1 Ω 열선의 두께는 1.89~3.30 μm ,

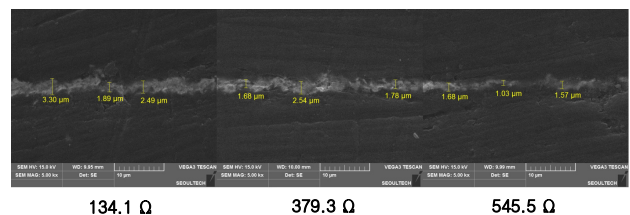


Fig. 2 Samples of SEM images

Table 2 Average thickness and the measured range of resistivity according to the sample's resistance

R [Ω]	134.1	379.3	545.5
\bar{t} [μm]	2.56	2.00	1.43
R0 [$\Omega \cdot \text{cm}$]	$1.40 \times 10^{-5} \sim 2.44 \times 10^{-5}$	$3.51 \times 10^{-5} \sim 5.30 \times 10^{-5}$	$3.09 \times 10^{-5} \sim 5.04 \times 10^{-5}$

379.3 Ω 은 1.68~2.54 μm , 545.5 Ω 은 1.03~1.68 μm 로 측정되었다. 샘플의 평균 두께와 최대 최소의 두께를 이용하여 측정된 비저항의 범위를 Table 2에 정리하였다. 379.3 Ω 과 545.5 Ω 의 경우 측정 비저항의 범위가 매우 유사하지만 134.1 Ω 은 매우 다른 값을 나타낸다. 본 연구에서 사용한 필름 히터는 실버 페이스트의 비저항을 고정하고 인쇄 두께를 조절하여 저항을 변화시킨다. 샘플 제작과정 중에 문제가 발생하여 134.1 Ω 의 비저항이 다른 값을 나타낼 가능성이 있다. 그리하여 134.1 Ω 은 배제하고 평균 비저항 값을 구하였다. 열선의 길이와 폭은 각각 1,817 mm, 1 mm이며 이를 이용한 비저항 값은 $4.23 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ 로 계산되었다. 이 수치는 기존 연구^[3]에서 제시한 폴리머 형태의 실버 페이스트 비저항 범위에 들어가는 것을 확인하였다.

2.2 기판에 부착된 필름 히터 설계 및 평가

Fig. 3은 연구에서 사용된 해석모델로 필름 히터가 부착된 기판의 크기는 가로, 세로 25×25 cm², 두께 2 mm 이다. 기판의 재질은 CFRP와 Al 6061이며, 기판의 정중앙에 필름 히터가 부착되어 있다. 필름 히터의 규격은 길이 152.4 mm, 폭은 작업을 통해 얇은 필름 히터를 제조 하였다. 열선 패턴은 균일한 열전달을 위해 대칭적인 구조를 띤다. PI 필름 위 은 잉크의 접착력은 KS G2606 규격

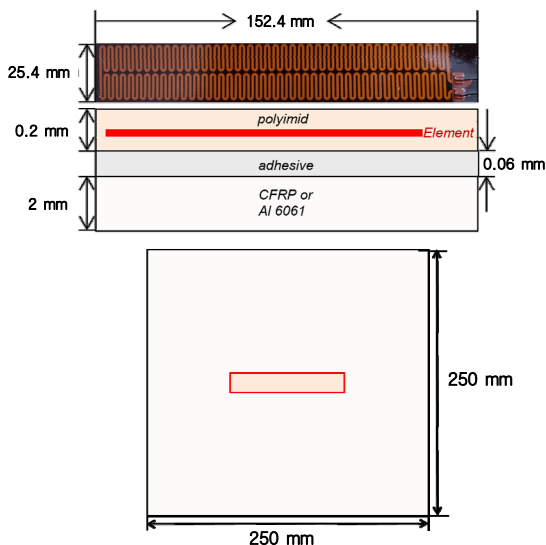


Fig. 3 Vertical layout and top view of the film heater attached to the substrate

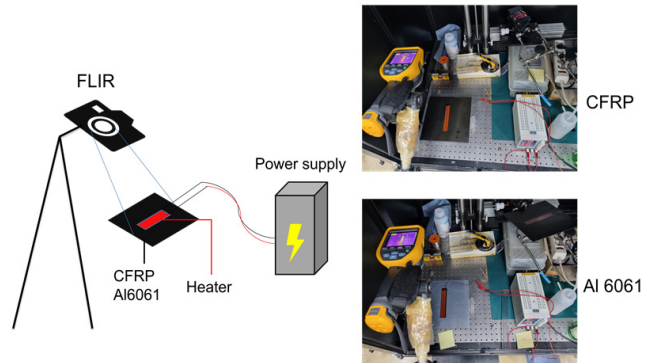


Fig. 4 Schematic and photo of temperature measurement system using FLIR in EM environment

에 따라 평가하였으며, 열처리 온도별 4~5B 이상으로 나타났다.

Fig. 4는 EM급 실험을 위한 개략도와 실제 실험 사진을 보여주고 있다. EM급 실험은 대기가 존재하는 환경에서 전압을 인가시켜 진행한다. 외부 공기 흐름을 최대한 차단한 장소에서 실험을 진행하였다. 모델을 바닥에서 10 cm가량 높게 올려서 아랫면에도 공기와 열 교환이 이루어지게 설정하였다. 부착 상태에서 직류로 전원을 공급한다. 촬영은 열화상 카메라(FLIR)로 진행하였으며, 최대한 수직으로 내려다보는 각도로 설정하였다. 기판 종류에 따른 온도 분포의 변화, 온도 상승 추이를 비교하기 위해 CFRP, Al 6061 판재를 사용하는 두 가지 실험을 진행하였다. 실험 시간은 충분한 정상 상태에 도달하기 위해 1,800초로 진행하였고, 실내 온도는 19°C이다. 두 판재에 대해서 전력 밀도의 값은 동일하게 0.395 W/cm²로 설정하였다.

FM급 전산 해석을 위해 사전에 EM급 전산 해석 모델이 진행되었다. Fig. 5는 EM급 전산 해석에 사용된 초기 및 경계조건과 모델, 열 저항을 도식화 한 것이다. 해석 시간은 실험과 동일하게 1,800 s로 비정상 상태로 진행하였다. 초기 온도는 19°C로 설정하였다. 대류 열전달 계수와 열 접촉 저항의 수치는 실험 데이터와 비교하여 잘 일치하는 값을 찾았다. 그 결과 자연 대류 열전달 계수

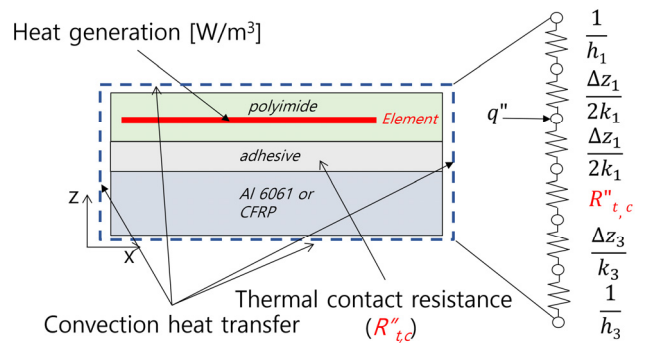


Fig. 5 Initial and boundary conditions used in EM environment simulation

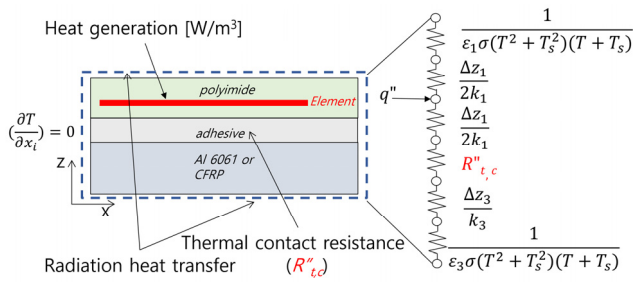


Fig. 6 Initial and boundary conditions used in FM environment simulation

(h_i)는 10 W/(m²·K)로 나타났으며, 기존 문헌^[8]에서 제시하는 2.5~25 W/(m²·K) 범위에 들어 있다. 열저항도에서 i = 1일 때 폴리이미드, 2는 접착제, 3은 Al 6061 또는 CFRP를 나타낸다. 또한 k는 재료의 열전도도를 의미한다. 필름 히터가 CFRP에 부착될 때 접착제에 의한 접촉 열 저항(R''_{t,c})은 1/150 m²·K/W, Al 6061은 1/4,730 m²·K/W로 나타났다. 접촉 열 저항이 다른 이유는 접촉 압력, 표면 거칠기, 접촉면의 유체나 온도 등등 여러 가지 복잡한 변수들이 많아 같은 접착제와 필름 히터를 부착하였음에도 차이가 발생한다. 열선에서 위 방향으로서는 폴리이미드를 거쳐 바로 공기와 열전달이 발생하고 아래쪽으로는 추가로 열 접촉 저항과 기판을 거쳐서 열이 공기로 빠져나간다. 옆면으로는 면적이 매우 작아 대류 열전달이 미미하지만 이점도 계산에 반영하였다.

Fig. 6은 FM급 해석을 위한 초기 조건과 경계조건을 나타낸다. 표면에 복사 열전달 조건을 적용하였으며, 주위 온도는 태양에 노출될 때와 지구 그림자에 가려져 온도가 영하까지 떨어지는 것을 고려하여 주위 배경 온도인 sink 온도(T_s)를 -150°C에서 100°C까지 설정하였다. ε_i는 재료의 방사율, σ는 스테판 볼츠만 상수를 의미하며 표면에 복사 열전달을 위한 CFRP의 방사율은 0.85, Al 6061의 방사율은 0.1, 폴리이미드의 방사율은 0.74를 사용하였다^[9-11]. 접촉 열저항과 i는 Fig. 5와 동일하다. 기판과 히터의 옆면은 상대적으로 매우 작은 면적이기에 단열 조건을 적용하였다. 전압과 sink 온도는 최대 온도에 영향을 준다. 같은 전압을 사용하더라도 sink 온도가 변하면 히터의 최대 온도가 달라진다. 따라서 본 전산 해석에서 사용한 전압은 히터의 최대 온도가 150~200°C 사이에 유지되도록 sink 온도별로 다르게 사용하였고, Table 3에 그 구체적인 값을 제시하였다.

필름 히터의 성능 평가는 앞에서 언급한 전력 밀도로 판단할 수 있다.

$$\text{Power density} = \frac{P}{A} = \frac{V^2/R}{A} [W/cm^2] \quad (2)$$

여기서 P는 전력, V는 전압, R은 저항, A는 필름 히터의 유효

Table 3 Voltage applied to the film heater for both substrates in FM environment simulation

Sink temp.	CFRP	Al 6061
-150°C	27 V ~ 33 V	25 V ~ 34 V
-100°C	26 V ~ 32 V	26 V ~ 33 V
-50°C	25 V ~ 32 V	25 V ~ 33 V
0°C	23 V ~ 30 V	23 V ~ 32 V
50°C	20 V ~ 28 V	20 V ~ 30 V
100°C	15 V ~ 23 V	15 V ~ 26 V

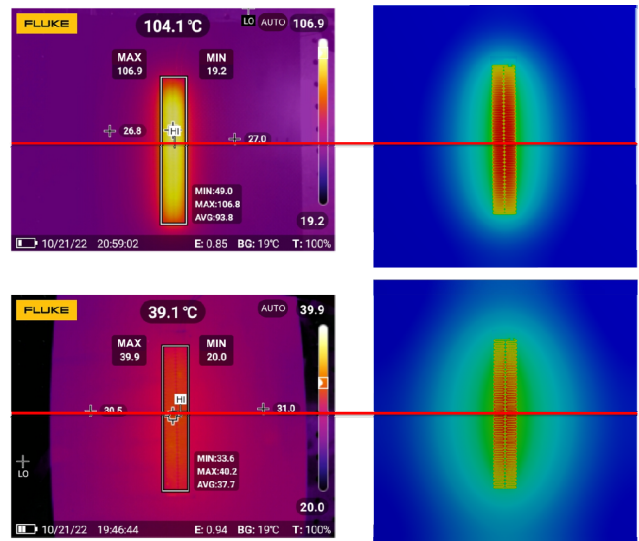


Fig. 7 FLIR images and simulated temperature contours for the film heater attached to the substrates of CFRP(up) and Al 6061(down)

면적이다. 히터의 성능은 전압의 제곱에 비례하게 된다. 히터의 유효 면적과 저항 그리고 인가된 전압으로 히터의 성능을 수치적으로 표현할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 EM급 실험 및 전산 해석 결과

Fig. 7-8은 EM급 실험값과 해석 결과를 비교한 것을 나타낸다. 좌측은 열화상 카메라로 1,800 s 이후에 촬영한 이미지이며, 온도는 거의 정상 상태에 도달한 것으로 확인되었다. Fig. 7의 상부 그림은 기판이 CFRP, 하부 그림은 Al 6061이다. 빨간 선이 온도를 추출한 기준선이 된다. 히터 옆면에서부터 10 mm 간격으로 점을 찍은 뒤 온도를 측정하였으며, 우측의 해석 결과에서도 같은 위치에서 온도를 추출하였다. 추출된 EM급 실험 데이터와 해석 데이터를 Fig. 8에 각각 CFRP, Al 6061에 따라 비교하여 나타내었다. 이는 가로 방향 거리에 따른 온도 값을 나타내며 빨간색 두 개의 실선은 히터의 너비이다. 대칭적인 열선 패턴을 가지기 때문

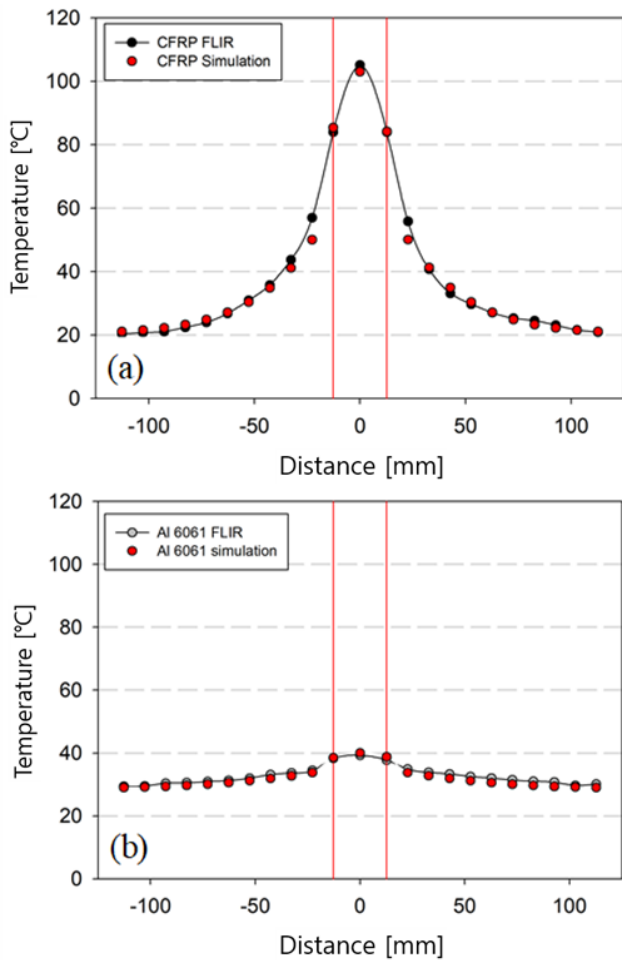


Fig. 8 Comparison of experimental and numerical results in temperature distribution which is extracted horizontally for the film heater attached to the substrates of (a) CFRP, (b) Al 6061

에 온도 분포 또한 중앙을 기준으로 좌우 대칭 형태다. Fig. 8(a)의 기판이 CFRP인 경우 낮은 열전도도로 인해 히터와 가까울수록 높은 온도를 보이며, 멀수록 초기 온도와 매우 유사함을 알 수 있다. Fig. 8(b)의 기판이 Al 6061인 경우 온도 분포가 매우 고르며 히터의 열이 판 전체에 영향을 미치는 것을 확인하였다. Fig. 8(a), (b) 모두 실험값과 해석 값이 잘 일치함으로써 본 해석 모델의 적절성을 검증할 수 있었고, 이 모델을 이용하여 FM급 해석 적용이 가능하다.

3.2 FM급 전산 해석 결과

대류 열전달이 없고 전도, 복사 열전달이 존재하는 실제 인공위성에서의 FM급 적용 전산 해석을 위해 Fig. 6의 초기 및 경계조건을 적용하여 해석을 진행하였다. Fig. 9는 FM급 해석 결과이며 온도 분포를 제시하고 있다. 해석 시간은 총 5,400 s로 진행하였으며 sink 온도는 -150°C 로 설정하였다. 인가전압은 31 V를 사용하

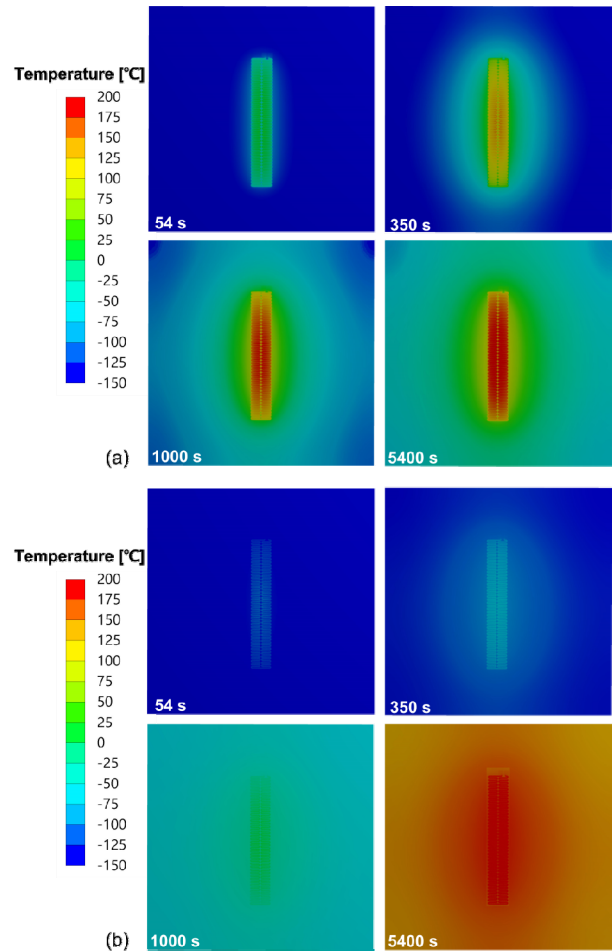


Fig. 9 Variations of temperature contours in FM environment when the applied voltage is 31 V and the sink temperature is -150°C for the substrates of (a) CFRP and (b) Al 6061

였다. 필름 히터 작동 후 54 s, 350 s, 1,000 s, 5,400 s에서의 온도 변화 추이를 나타냈다. Fig. 9(a)는 기판이 CFRP일 때 해석 결과이며, 기판으로 열이 퍼지는 속도는 매우 낮아서 시간이 지나도 히터 부분에 열이 집중되어 있다. 그에 반해 Fig. 9(b)에서 기판이 Al 6061일 때는 상반된 결과를 보여준다. 전체적으로 온도의 편차가 적으며 시간이 지남에도 모든 곳에서 동시에 온도가 상승하는 것으로 확인된다. 특히 시간이 5,400 s 지나면 모든 부분에서 Al 6061을 포함하여 높은 온도를 띤다.

FM급 전산 해석 결과에서 시간에 따른 최대, 최소 온도의 편차가 얼마나 큰지 정량적 평가를 진행하였다. Fig. 10은 FM급 환경에서 시간에 따른 최대, 최소 온도의 변화이다. 필름 히터가 기판에 부착될 때 접착제의 내구성을 고려하여 최대 허용 온도를 200°C 로 설정하였다. sink 온도는 -150°C , 0°C , 100°C 로 설정하였다. sink 온도의 변화는 초기 온도의 변화에만 영향을 미친다. 전압은 동일하나 상이한 sink 온도를 사용한 경우 초기 온도의 변화로 인해 최대 온도는 달라진다. 따라서 최대 온도가 200°C (최대 허용 온도)

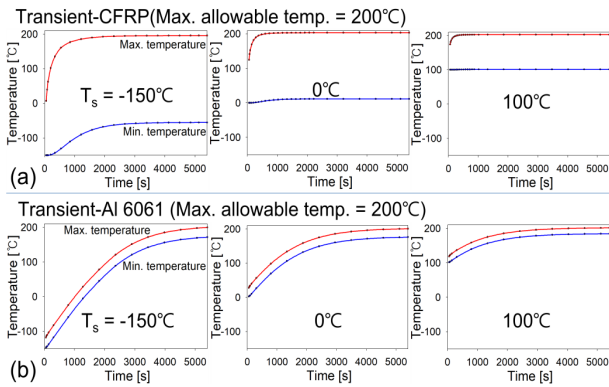


Fig. 10 Maximum and minimum temperature histories in FM environment for various sink temperatures (T_s); (a) Temperature history of the film heater attached to CFRP when the applied voltages are 31 V, 28 V and 22 V, respectively; (b) Temperature history of the film heater attached to Al 6061 when the applied voltages are 31 V, 29 V and 24 V, respectively

를 넘지 않는 조건에 대응할 수 있도록 전압을 미세 조정하여 사용하였다. Fig. 10(a)은 기판이 CFRP일 때 최대 최소 온도 변화이며 사용한 전압은 좌측부터 31 V, 28 V, 22 V를 사용하였다. 최대 온도 변화를 살펴보면 sink 온도에 무관하게 초기부터 급격한 상승을 보이며 최대, 최소 온도의 간격은 크게 나타난다. 하지만 sink 온도가 증가할수록 이는 줄어드는 양상을 보인다. 또한 온도가 빠르게 정상 상태로 돌입한다. Fig. 10(b)은 기판이 Al 6061일 때 그래프이며 좌측부터 31 V, 29 V, 24 V를 사용하였다. 최대, 최소 온도는 Fig. 10(a)와 비교하였을 때 매우 느리게 증가하며 시간에 지남에도 매우 비슷한 기울기로 증가한다. 또한 두 온도의 차는 시간이 지나도 일정하다.

Fig. 11은 FM급 환경에서 시간에 따른 온도 분포 변화와 최대, 최소 온도 차(ΔT)의 변화이다. Fig. 9의 결과를 이용하여 데이터를 추출하였으며, 시간이 충분히 지나면 모두 최대 온도가 200°C에 근접한다. Fig. 11(a)는 기판이 CFRP일 때 시간에 따른 온도 분포이며, 충분한 시간이 지나면 EM급 해석 결과(sink $T = 19^\circ\text{C}$)와 유사하게 히터 부위에 열이 집중됨을 알 수 있다. 또한 매우 짧은 시간에 최대 온도와 최소 온도의 차가 커진다. Fig. 11(b)는 기판이 Al 6061일 때 시간에 따른 온도 분포이며, EM급 해석 결과와 달리 FM급에서는 Al 6061도 CFRP와 비슷한 최대 온도를 가진다. EM급 환경에서는 대기로 인한 대류 열 전달이 지배적이라 기판의 종류에 따라 최대 온도에 큰 차이가 있었다. 하지만 FM급에서는 복사 열전달이 지배적이라 열전달이 대기 환경보다 훨씬 적어 전체적으로 매우 높은 온도를 가진다. 이 그림에서 흥미로운 점은 기판이 Al 6061일 때 시간이 지남에 따라 온도는 올라가지만 온도 분포의 형태는 큰 변화가 없

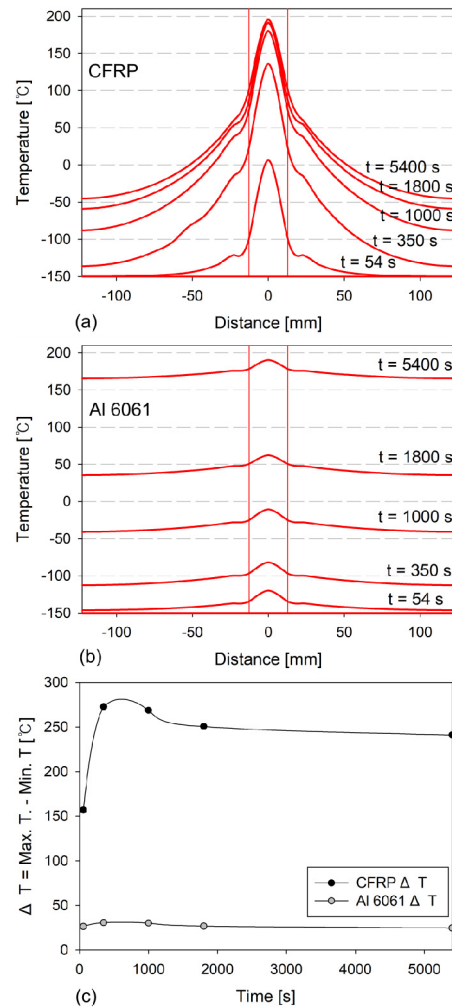


Fig. 11 Temperature variations in FM environment; Temperature distribution of (a) CFRP and (b) Al 6061 substrates, (c) ΔT time history

는 것으로 나타났다. Fig. 11(c)은 Fig. 11(a), (b)에서 최대, 최소 온도의 차 ΔT 를 시간에 따라 정리한 그래프이다. Al 6061의 온도 차는 처음부터 매우 안정적이고 CFRP의 온도 차는 초기에 급격한 상승을 이루다가 일정 시간 이후에는 안정된 모습을 보인다. 하지만 그 수치는 Al 6061과 비교하였을 때 약 10배 차이 날 정도로 매우 큰 값인 것을 확인하였다. 필름 히터를 Al 6061에 부착하였을 시 넓은 면적을 발열시킬 수 있어 히터의 개수가 적어도 일정 온도를 유지할 수 있지만, CFRP의 경우 히터에서 멀어지면 기판의 온도가 급격히 내려간다. 따라서 CFRP 기판에 히터를 부착할 경우 일정 온도 수준 이하로 떨어지지 않게 하는 가장 효율적인 히터 간 거리를 찾아야 한다.

Fig. 12는 기판이 CFRP일 때 기판의 최소 제어 온도를 유지할 수 있는 히터 간 한계 거리(D)의 유도 과정을 도식화하여 나타낸 것이다. 작동 시간이 5,400 s, sink 온도가 -150°C 이고 기판의 최

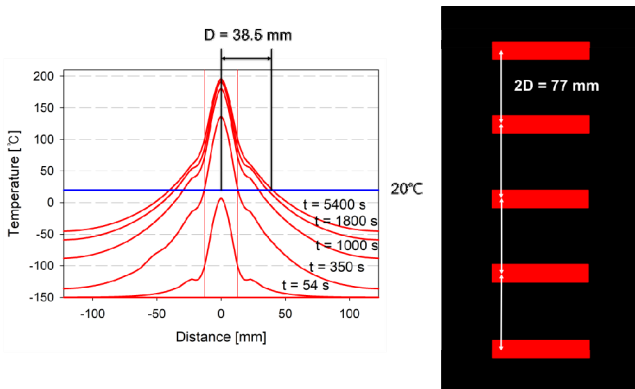


Fig. 12 Evaluation of the limited distance(D) between heaters which can maintain the minimum control temperature (20°C) at $T_s = -150^\circ\text{C}$ in the CFRP substrate

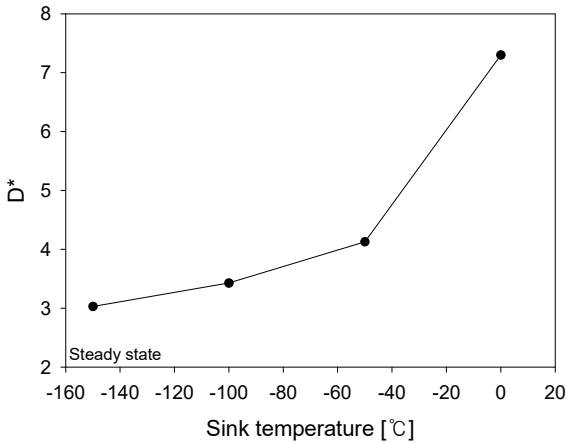


Fig. 13 Non-dimensional limited distance D^* with respect to the sink temperature ($D^* = 2D/W$, W = heater's width)

소 제어 온도를 20°C 로 설정했을 때 히터 간 한계 거리를 확인할 수 있다. 온도 분포 함수를 2차 함수로 가정하고 온도가 20°C 까지 떨어지는 거리 D 를 구하면 38.5 mm 가 된다. 즉, 히터를 $2D$ 거리 만큼 떨어지게 배치하면 기관 온도를 최소 제어 온도보다 높게 유지할 수 있다.

Fig. 13에서는 sink 온도에 따른 무차원화된 히터 간 한계 거리 D^* 를 나타내었다. D^* 는 히터 간 거리 $2D$ 를 히터의 너비 W 로 나눈값으로 정의하였다 ($D^* = 2D/W$). sink 온도를 -150°C , -100°C , -50°C , 0°C 로 변화시켰을 때의 결과이며 정상 상태에 도달한 후의 온도 분포를 이용해 구하였다. 최대 온도가 200°C 의 99.9%에 도달하는 시간부터 정상 상태로 간주하였다. sink 온도가 -150°C 일 때 한계 거리 D^* 는 가장 작으며 sink 온도가 증가할수록 D^* 는 비선형으로 증가한다. 기관의 최소 제어 온도를 20°C 로 설정하였기에 sink 온도가 20°C 인 경우 D^* 는 무한대의 값을 가진다. 따라서 인공위성 전자기기의 기관에 히터를 부착하기 위해 히터 간 거리는 히터 폭의 D^* 배로 설계하면 된다.

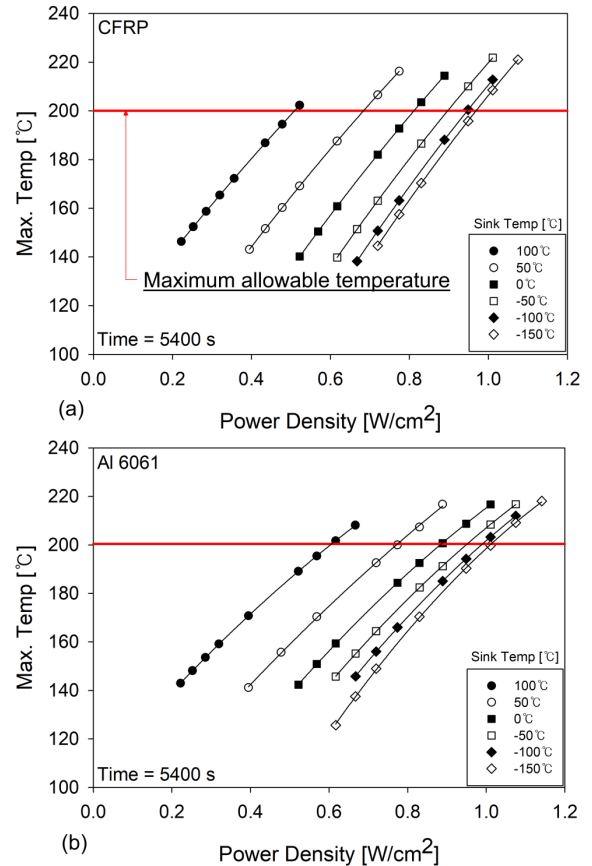


Fig. 14 Maximum temperature of the film heater attached to the substrates with respect to the power density under various sink temperatures; (a) CFRP substrate, (b) Al 6061 substrate

3.3 FM급 필름 히터 성능 곡선

히터의 성능 곡선을 이용하게 되면 최대 허용 온도 내에서 안전하게 히터를 사용할 수 있다. 성능곡선은 sink 온도에 따라서 최대 허용 온도에 도달하는 필요 전력 밀도를 나타낸다. 성능 곡선을 작성하기 위해서는 FM급 시뮬레이션을 통해 sink 온도와 전압을 변수로 하여 모델의 최대 온도 변화를 하나의 지표로 정리하여야 한다. Fig. 14는 서로 다른 sink 온도 환경에서 전력 밀도에 따른 기관에 부착된 필름 히터의 최대 온도 변화이다. FM급 전산 해석으로 정상상태에 도달할 때까지 계산을 수행하였으며, 우주 환경을 반영한 다양한 sink 온도에서 히터의 최대 허용 온도를 200°C 로 설정하였다. sink 온도별로 전압을 변화시켜 최대 온도를 추출하고 이를 라인으로 연결하였다. Fig. 14(a)는 기관이 CFRP일 때의 최대 온도 변화이다. 전력 밀도가 증가할수록 최대 온도는 동일한 sink 온도에서 선형적으로 증가한다. Fig. 14(b)는 기관이 Al 6061일 때 최대 온도 변화이며 그 특성은 CFRP 기관의 경우와 경향이 비슷하다.

Fig. 15는 2가지 종류의 기관(CFRP, Al 6061)에 대하여 최대

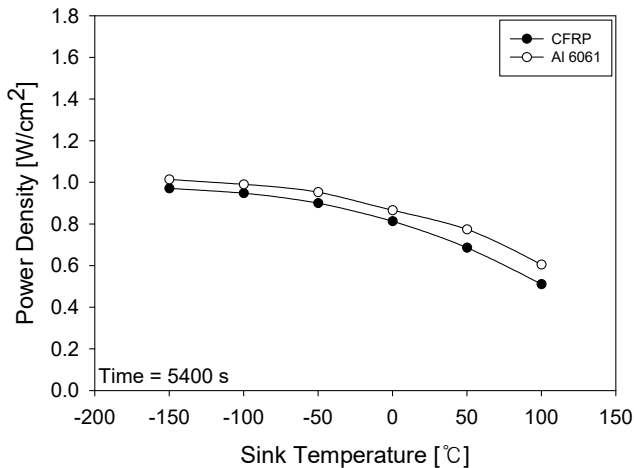


Fig. 15 Performance curve of the film heater attached to CFRP and Al 6061 substrates when the maximum allowable temperature is 200 °C

허용 온도에 도달하는 필요 전력 밀도의 변화를 sink 온도에 따라 정리한 히터의 성능 곡선이다. Fig. 14에서 최대 허용 온도 (20 0°C) 선과 6개의 라인이 교차하는 점의 전력 밀도를 추출하여 sink 온도별 필요 전력밀도를 계산하였다. 이 그림에서 sink 온도가 증가하면 필요 전력 밀도는 비선형으로 감소한다. 특히 sink 온도가 -50°C를 넘어서게 되면 필요 전력 밀도는 급격히 감소한다. CFRP, Al 6061의 기판에 대해 비교해 보면 약간의 차이를 보인다. 즉, 상온조건(sink T = 25°C)에서 필요 전력 밀도는 CFRP인 경우 0.75 W/cm², Al 6061인 경우 0.82 W/cm²로 기판의 열전도율이 높을수록 필요 전력 밀도가 증가한다. FM급 환경에서의 시물레이션을 통해 얻은 필요 전력 밀도는 동일한 상온조건에서 제시된 ESCC 기준인 0.54 W/cm² 보다 크게 나타났다. ESCC 기준은 EM급 환경에서 기판에 부착되지 않고 독립적으로 작동한다는 조건에서 제시된 값이기 때문에 히터가 기판에 부착되고 FM급 환경에서 작동할 경우 새로운 기준이 필요하다.

4. 결론

본 연구에서는 기판에 부착된 인공위성용 필름 히터의 성능 및 온도 변화 특성을 연구하였다. 필름 히터를 CFRP, Al 6061에 부착하고 FM급 전산 해석 기법을 개발하여 시간에 따른 온도 분포를 확인하였다. CFRP 기판에 부착할 경우 히터 부분에 온도가 집중되고 시간이 지나면서 히터 내부의 온도가 급격히 상승한다. 반면, Al 6061 기판에 부착할 경우 온도가 기판으로 확산되고 시간이 지나면서 기판과 히터의 온도가 같이 상승한다. 기판이 CFRP 일 때 기판의 최소 제어 온도를 유지할 수 있는 히터 간 한계 거리를 추정하였으며 sink 온도가 증가할수록 한계 거리는 비선형으로

감소한다. 최대 허용 온도에 도달하기 위한 필요 전력 밀도는 sink 온도가 증가함에 따라 비선형으로 감소하는데, sink 온도가 -50°C 이상이 되면 필요 전력 밀도는 급격히 감소한다. 필요 전력 밀도는 FM급 환경에서 기판의 열전도율이 높을수록 크게 나타났다. 이는 동일한 상온조건에서 제시된 ESCC 기준인 0.54 W/cm² 보다 큰 것으로 나타나 FM급 환경에서는 새로운 기준이 필요하다.

후 기

이 연구는 2020년 우주개발기반조성 및 성과확산산업 일환으로 한국연구재단의 연구비 지원(NRF-2020M1A3B2A01082442)의 2단계 사업으로 수행되었습니다.

References

- [1] ESA, 2020, viewed 14 Oct.2023, Resistors, Heaters, Flexible Single and Double Layer (ESCC Detail Specification No. 4009/002), European Space Agency, <<https://escies.org/download/specdraftappub?id=4002>>.
- [2] Kim, J. H., Sung, J., Lee, G., Kim, M., Cho, Y. -J., 2021, Analysis of Heat Transfer for an EM-Class Patch Heater with Polyimide Insulation, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 30:3 224-232, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2021.30.3.224>.
- [3] Ono, A., Okada, K., Kondo, N., Kurosawa, M., Ohyama, M., Kodate, S., Okamoto, K., Ito, M., 2006, Applications of Highly Conductive Silver Paste, Fujikura Technical Review, 35 33-36.
- [4] Kim, J. H., Choi, J., Sung, J., Lee, G., Kim, M., Cho, Y.-J., 2021, Thermal Analysis of Film Heaters with a Silver-Paste Heating Element Fabricated using Screen Printing Process for Satellite Applications, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 30:6 495-504, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2021.30.6.495>.
- [5] Kang, S., Lee, D., Shin, S., Choi, D., Jeong, M. D., 2018, An Experimental Study for Effect of Bonding Process on Heating Performance of Patch Heater Using in Satellite, The Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. Fall Conf., 178-179.
- [6] Lee, C.-H., Lee, J.-J., Kim, Y.-K., 2017, Failure Mode Analysis and Process Verification of Patch Heater used in Satellite, The Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. Fall Conf., 980-983.
- [7] Schlitt, R., Kuhlmann, S.-A., Sander, B. C., Neustadt, S., 2016, Assessment of the Rules on Heater De-Rating, ESA Space Passive Component Days.
- [8] Kosky, P., Balmer, R., Keat, W., Wise, G., 2020, Exploring

Engineering, Academic Press, US.

- [9] Adibekyan, A., Kononogova, E., Monte, C., Hollandt, J., 2019, Review of PTB Measurements on Emissivity, Reflectivity and Transmissivity of Semitransparent Fiber-Reinforced Plastic Composites, *Int. J. Thermophys.*, 40:4 36, <https://doi.org/10.1007/s10765-019-2498-0>.
- [10] Okada, T., Ishige, R., Ando, S., 2016, Analysis of Thermal Radiation Properties of Polyimide and Polymeric Materials Based on ATR-IR Spectroscopy, *J. Photopolymer Sci. Technol.*, 29:2 251-254, <https://doi.org/10.2494/photopolymer.29.251>.
- [11] Weng, K.-H., Wen, C.-D., 2011, Effect of Oxidation on Aluminum Alloys Temperature Prediction using Multispectral Radiation Thermometry, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 54:23-24 4834-4843, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.06.038>.



Jinwoo Choi

Graduate Student in the Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interest is Heat Transfer.
E-mail: chlwsdn27@seoultech.ac.kr



Jaeyong Sung

Professor in the Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interest is Flow Visualization.
E-mail: jysung@seoultech.ac.kr



Joon Hyun Kim

Research Professor in NDT Research Center, Seoul National University of Science and Technology. His research interest is Tribology and Thermal Fluid.
E-mail: joonk61@seoultech.ac.kr