

Pyrolytic Graphite Sheet (PGS)를 적용한 송수신 모듈의 열적 영향성에 대한 수치 해석적 연구

A Study of the Thermal Effectiveness of Pyrolytic Graphite Sheet in the Transmit Receive Module Housing

안상혁^{1,#}, 임성환¹, 박준우¹, 라영은¹Sang Hyeok Ahn^{1,#}, Sung Hwan Yim¹, Jun Woo Park¹, and Young Eun Ra¹¹ LIG넥스원 기계연구소 (Department of Mechanical R&D, LIG Nex1 Co., Ltd.)

Corresponding Author / E-mail: sanghyeok.ahn@lignex1.com, TEL: +82-31-8026-4686

ORCID: 0000-0001-5086-0357

KEYWORDS: Pyrolytic graphite sheet (열분해 그리파이트 시트), Pyrolytic graphite (열분해 그래파이트), Heat spreader (히트 스프레더), Thermal conductivity (열전도율)

In this study, pyrolytic graphite was applied to overcome the conventional cooling system. Pyrolytic graphite is an anisotropic material with high thermal conductivity in the X-Y direction and low thermal conductivity in the Z direction. The advantage of high thermal conductivity in the plane direction is applied to improve the performance of the cooling capacity transceiver module housing made of aluminum. In comparison with the housing using the aluminum, the housing applied to the PGS plate shows a higher cooling performance on the average temperature of chips and the temperature variations by 2.79% and 49.98%. The heat dissipation performance was investigated according to the thickness of the PGS and the via the shape. When the factor of thickness in PGS plate was "0.375", the average temperature of the chip was the lowest, and the temperature variation decreased due to increasing the factor of thickness in the PGS plate. In the case of the via shape, the "separation plate" showed the lowest average temperature of chips and the "plate" showed the lowest temperature variation.

Manuscript received: July 11, 2019 / Revised: December 12, 2019 / Accepted: December 16, 2019

NOMENCLATURE

 ρ = Density t = Time u = Velocity p = Pressure x = Unit volume τ = Tensor q = Heat flux e = Internal energy per unit volume S = External force per unit volume Q_H = Heat generation unit volume T = Temperature h = Enthalpy per unit volume F_t = Factor of thickness C_p = Specific heat PGS = Pyrolytic graphite sheet

1. 서론

최근 전자소자들은 성능 향상을 위하여 소형화, 고집적화되고 있으며 이에 따라 높은 열 밀도를 지닌다. 이러한 추세에 따라 높은 열 밀도를 지닌 발열 부품에 대한 열적 안정성 또한

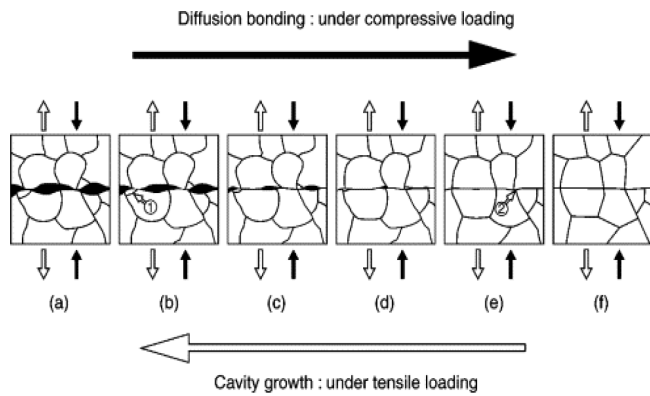


Fig. 1 Process of diffusion bonding (Chaturvedi)⁶

중요해지고 있다. 기존의 냉각 방식인 공랭식, 수랭식 이외에 상변화 물질을 이용한 Heat Pipe, 열전 소자 등을 이용한 방열 설계가 이루어지고 있다. 또한 신소재인 CNT (Carbon Nano Tube) 등을 활용한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이러한 동향에 따라 열분해 그래파이트(Pyrolytic Graphite)를 이용한 많은 연구가 이루어지고 있다. 실제 BOYD Corporation,^{1,2} Minerals Technologies³ 등의 제조사에서는 열분해 그래파이트를 활용하여 방열 성능을 크게 높인 제품들을 제작하고 있다.

일반적으로 열분해 그래파이트는 취성 재료이기 때문에 파괴에 취약하다는 단점을 지니고 있다. 그에 따라 기존에 사용되는 일반적인 금속 재료들인 알루미늄, 구리 등 내부에 삽입하여 사용하게 된다. 내부에 삽입하여 금속과 그래파이트를 접합할 때 일반적으로 2가지 방법을 사용하게 된다.

첫 번째는 일종의 접착 본드 역할을 하게 되는 Filler를 적용하여 접합하게 된다.^{4,5}

두 번째는 내부 Filler를 적용하지 않고, 진공 상태에서 Diffusion Bonding을 이용하는 Vacuum Hot Pressing 공정을 사용하게 된다. Diffusion Bonding은 Fig. 1과 같이 이종 재료의 금속 재료를 밀착시켜 접합 면에서 원자의 확산을 이용하여 접합하는 기술이다. 내부의 기공, 균열 등이 없다는 특징을 지니고 있으며 재료의 열화 또는 열 응력 등에 의한 변화가 없다는 특징을 지니고 있다.⁶⁻¹⁰

열분해 그래파이트는 열전도율이 이방성 특성을 지닌 재료로써 평면 방향으로의 열전도 계수가 약 1200-1800 W/m-K로 높은 열전도 계수를 지니고 있다. 따라서, 기존 히트 싱크 등을 제작할 때 사용되는 금속 소재인 알루미늄이나 구리에 비해 4-8배 이상 우수한 특성을 보인다. 반면, 두께 방향으로의 열전도 계수는 5-7 W/m-k 정도로 매우 낮다.¹¹ 이러한 특징을 지닌 그래파이트에 대한 연구는 두께 방향의 낮은 열전도율을 극복하기 위하여 Via를 적용하거나, 그래파이트의 형상 변화에 따른 영향성 등에 대한 많은 연구들이 진행 중이다. Sabatino¹²는 평판 히트 싱크의 중심부에 발열 소자를 적용한 연구를 진행하였다. 히트 싱크의 재질을 알루미늄과 열분해 그래파이트를 적용하여 비교하였다. 열분해 그래파이트를 적용하였을 때 열전도율 및 중량,

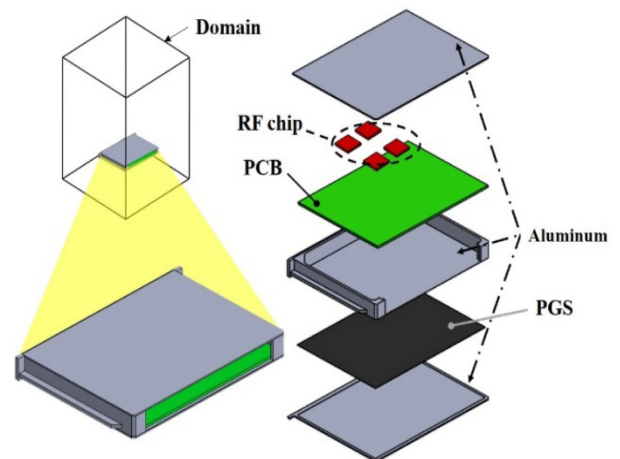


Fig. 2 Figure of analysis area and geometry

크기에서의 이점이 있다고 설명하였다. Tilford¹³는 Highly Oriented Pyrolytic Graphite (HOPG)를 적용하는 연구를 진행하였다. HOPG 적용 플레이트 위에 발열 소자 4개를 적용하였으며 방열 경로를 전도로만 수행하였다. HOPG, 알루미늄 등의 금속을 플레이트에 적용하여 최대 온도를 비교하였다. Fan¹⁴은 Momentive Inc.의 Thermal Pyrolytic Graphite (TPG)를 적용하였다. LED 헤드라이트의 히트 스프레더와 히트 싱크에 적용하여 비교하였고 LED 동일 출력 대비 발열 온도를 3.0-5.9°C 감소시켜 성능을 향상시켰다. 그 외에도 그래파이트를 적용한 다양한 연구들이 이루어지고 있다.¹⁵⁻¹⁹

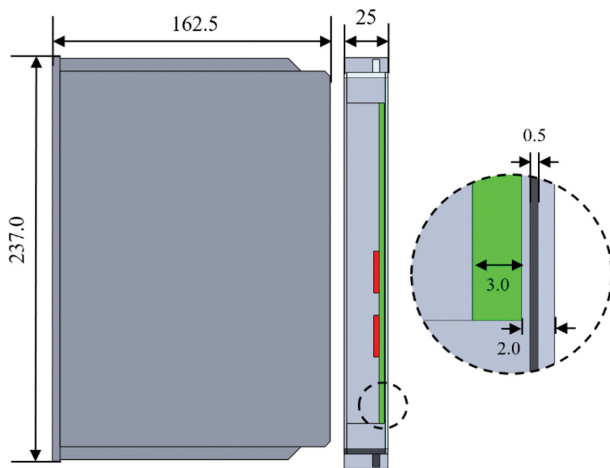
본 연구에서는 기존 송수신 모듈의 알루미늄 하우징과 수 μm 단위의 PGS의 적층 구조가 포함된 알루미늄 하우징의 열적 특성을 수치 해석적으로 분석하였다. 또한, PGS의 두께에 따른 영향성 및 Via 적용에 따른 열적 특성도 분석하였다. 수치 해석은 범용 CFD Code인 ICEPAK 19.1을 사용하였다.

2. 수치 해석

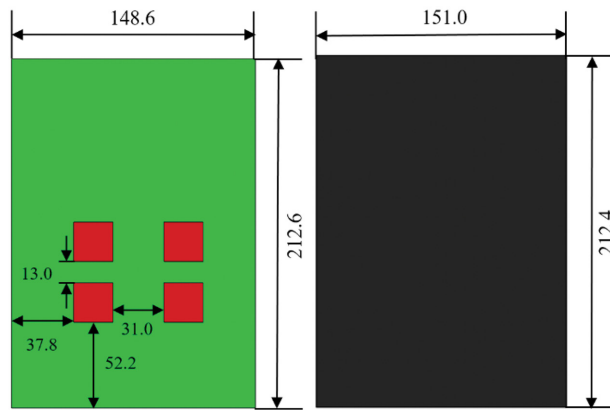
2.1 해석 모델

본 연구의 해석 모델은 실제 3차원 능동위상배열 레이더에 적용된 안테나 송수신 모듈이며, 주요 발열 소자 및 PCB의 형상과 물성치는 제조사에서 제공된 정보를 적용하였다. 송수신 모듈의 형상은 Fig. 2와 같으며, 그에 대한 해석 모델의 자세한 크기 및 주요 발열 소자 위치 정보 및 하우징, PCB, PGS의 두께는 Fig. 3과 같다. 소자의 형상은 Fig. 4이며, 발열 소자의 자세한 형상 정보는 Table 1과 같다. 주요 발열 소자의 발열량은 2.3 W이다.

해석에 사용한 PGS의 정보는 Minerals Technologies사의 Heat Spreader 소재인 열분해 그래파이트를 적용하였다.³ 사용한 PGS의 물성치는 Table 2와 같다. 해석은 자연 대류의 Steady-State 조건에서 수행하였다. 또한, 해석 격자에 대한 격자 테스트



(a) Housing



(b) PCB & RF chip

(c) PGS

Fig. 3 Size of analysis components

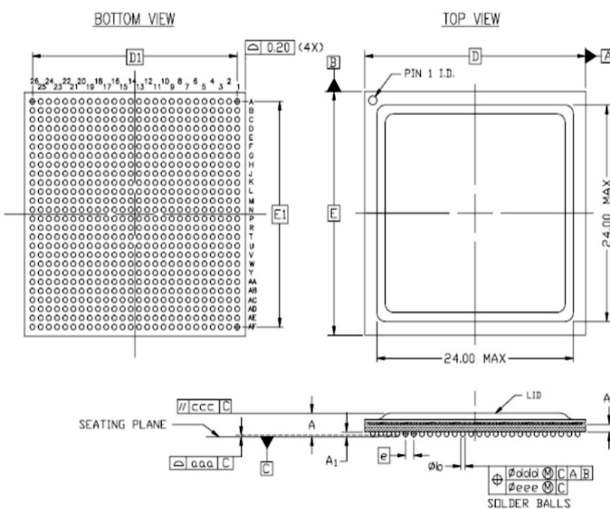


Fig. 4 Configuration of RF Chip

를 진행하였다. 전체 해석 영역 기준 Grid의 수를 500만-1000만 개 적용한 결과 720만개의 Grid를 적용하였을 때 약 1.9%의 오차를 포함한 Grid-Independent를 보였다.

Table 1 Data of RF Chip

Symbol	Values (mm)		
	Min		Max
A	2.35		3.00
A ₁	0.40		0.60
A ₂	0.65		1.00
D/E ₁	27.00		
D ₁ /E	25.00		
e	1.00		
Øb	0.50	0.60	0.70
aaa	-	-	0.20
ccc	-	-	0.25

Table 2 Property of PGS

Property	Values	Units	Symbol
Density of PGS	2235	kg/m ³	ρ_{PGS}
Specific heat of PGS	762.5	J/kg·K	C_p
Thermal Conductivity of PGS	1659.3	W/m·K	$k_x = k_y$
	6.5	W/m·K	k_z

Vacuum Hot Pressing 공정은 서로 다른 이중 재질 접합 시 사용되며, 일반적인 Brazing 공정과 달리 접합 시 필요한 Filler가 포함되지 않는다.

따라서 본 연구에서는 수치 해석 시 알루미늄과 PGS간 Filler에 의한 접촉 저항과 Delamination에 의한 공기 층의 접촉 저항은 고려하지 않았다.

2.2 지배방정식

수치 해석에 사용된 지배방정식은 일반적인 형태의 질량, 운동량, 에너지 보존방정식으로 각각 식(1)부터 식(3)과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial \rho}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}(u_j(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \frac{\partial p}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho e + S_i u_i + Q_H \quad (3)$$

위 식의 ρ , u , p 는 단위 체적당 유체의 밀도, 속도, 압력이며, 식(2)의 S 는 유체에 작용하는 단위 체적당 외력이다. 식(3)의 $H = h + u^2/2$ 로 단위 체적당 엔탈피와 운동에너지의 합, τ 는 점성 전단응력 Tensor, q 는 열 유속, e 는 내부에너지를 의미한다. 또한 Q_H 는 열 생성항이며, τ^R 는 난류 변동으로 인한 운동량 유속이다. 따라서, Reynolds 응력에 대한 Tensor를 의미하며, 이 항은 층류 유동에서는 무시된다.

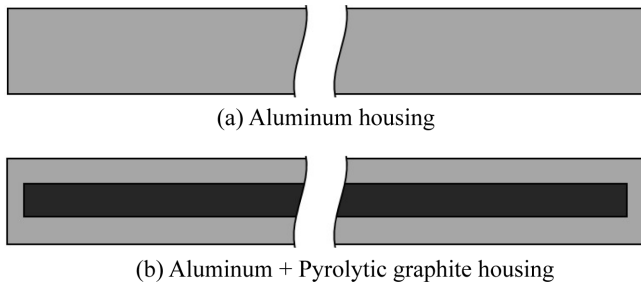


Fig. 5 Configuration of case 1

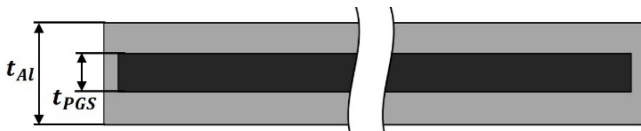


Fig. 6 Configuration of case 2

고체 영역의 열전달 방정식은 다음 식(4)와 같다.

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q_H \quad (4)$$

위 식의 T 는 온도를 의미하며, k 는 열전도도를 의미 한다. 열전도도 텐서인 k 는 등방성 재료일 때 모든 방향에 따라 같지만, PGS는 이방성 재료로 평면 방향의 값만 같고 높이 방향의 값은 다르다.

2.3 해석 조건

해석 조건은 총 3가지이다. Case 1은 Fig. 5와 같이 알루미늄 하우징과 하우징 내부에 PGS 적용 유무에 따른 방열 성능을 비교하고자 한다. 또한, Case 2는 Fig. 6과 같으며 PGS의 두께에 대한 방열 성능을 비교한다. 특히, Case 2의 경우 식(5)를 사용하여 하우징의 알루미늄 대비 PGS의 두께를 무차원 정의했다.

$$f_t = \frac{t_{PGS}}{t_{Al}} \quad (5)$$

따라서 f_t 는 0.125, 0.25, 0.375, 0.5를 적용하며, Case 3은 Via 형상에 대한 영향을 비교하였다. 세부 형상은 Fig. 7과 같다. Via 형상 인자로는 일반 평판, 평판을 8개로 분할 적용 및 분할 형상에 원형 Via 적용 및 주 발열 소자와 동일한 형상의 Via 적용의 경우로 총 4가지 형상이다.

3. 해석 결과

3.1 PGS 적용 유무 비교

Fig. 8은 알루미늄 하우징과 PGS가 적용된 하우징의 온도 분포이다. Figs. 8(a)와 8(b)는 발열 소자인 RF Chip이 부착되는 PCB의 온도 분포이며, Figs. 8(c)와 8(d)는 PCB가 놓여지는 하우징의 온도 분포이다.

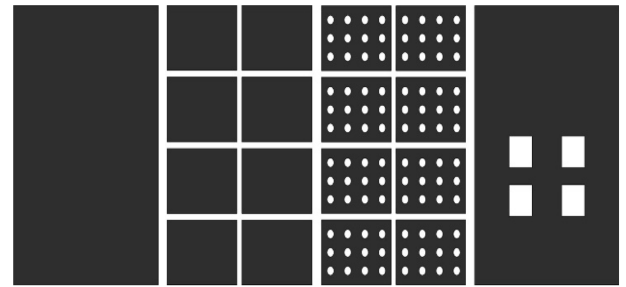


Fig. 7 Configuration of case 3

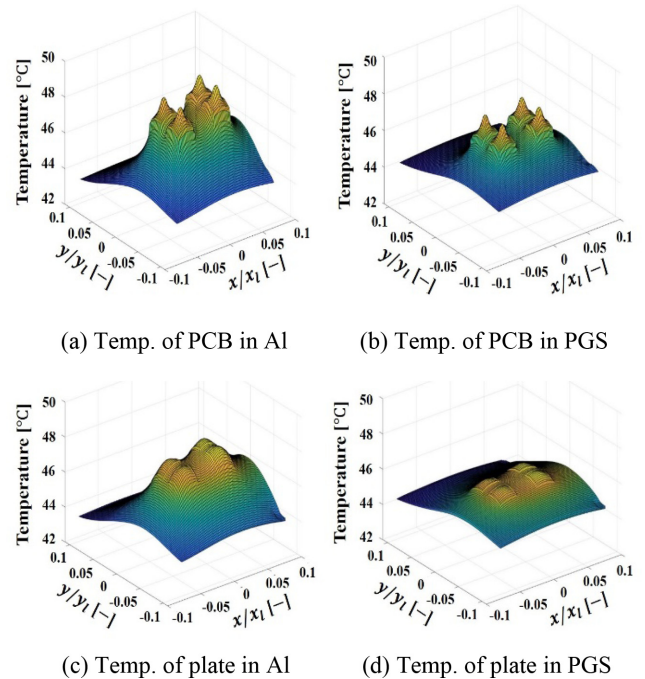


Fig. 8 A comparison of the temperatures between the aluminum and PGS

4개의 발열 소자 각각의 평균 온도 중 가장 높은 온도를 지닌 RF Chip의 온도는 기존 알루미늄 하우징의 경우 48.68°C, PGS 적용 하우징의 경우 47.32°C로 약 2.79% 감소하였다. 또한, PCB의 온도 분포 확인 결과, 기존 하우징 최고 온도는 49.43°C이며, PGS 적용 하우징의 경우 최고 온도는 48.04°C로 PGS 적용 시 최고 온도 대비 약 2.81%정도 감소 효과를 얻었다. 또한, PCB가 놓여지는 하우징의 경우, 기존 하우징 최고 온도는 48.14°C, PGS 적용 시 최고 온도 46.58°C로 약 3.24%, 또한 최고 온도와 최저 온도의 차이 정도인 온도 편차는 각각 5.13, 2.56°C로 약 49.98%의 감소 효과를 얻었다.

이는 PGS의 수평 방향으로 매우 높은 열전도 계수를 지니고 있기 때문이다. 따라서 PGS를 적용하게 되면 RF Chip의 발열할 때 고온의 열이 놓여진 PCB를 지나 하우징에 전달될 때 PGS의 평면 방향으로 빠르게 전도되며, 온도 편차 또한 감소하게 된다. 따라서 실제 장비 제작 및 적용 시 내부 발열 소자의 최고 온도

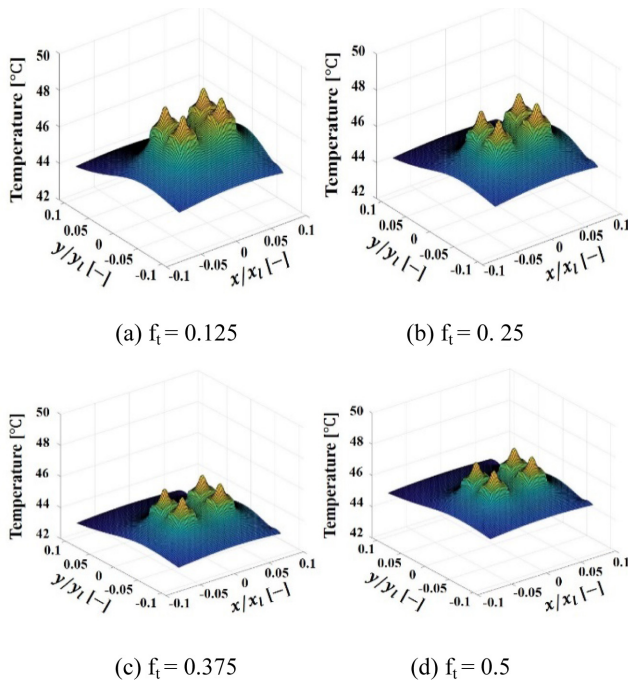


Fig. 9 Variations of the PCB temperature according to the factor of thickness

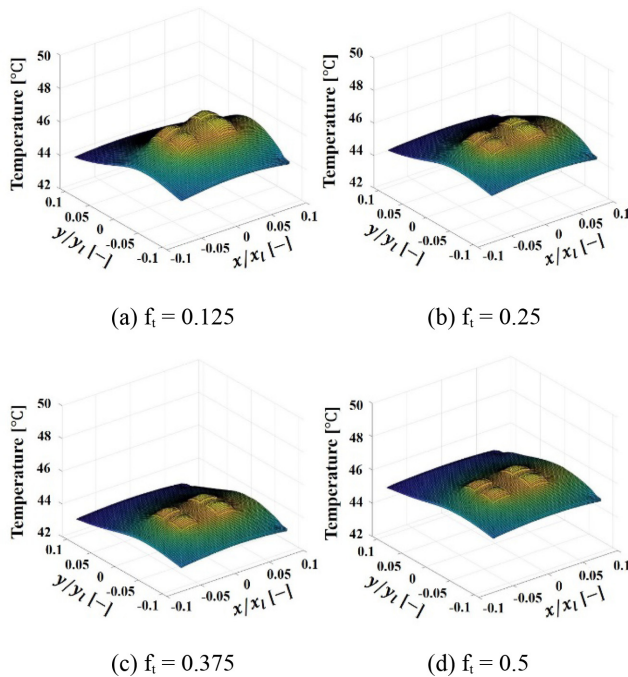


Fig. 10 Variations of the housing temperature according to the factor of thickness

감소 및 장착되는 하우징의 온도 편차 감소로 인한 온도 균일화에 따라 평면 방향으로 방열 경로를 형성하게 되었을 때 더 큰 방열 효과를 기대할 수 있다.

3.2 PGS 두께 영향성 비교

4개의 발열 소자 중 가장 높은 RF Chip의 평균 온도는 Fig. 9와

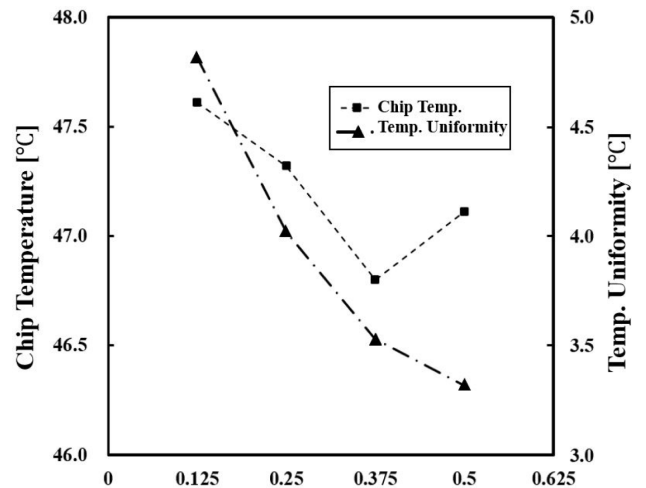


Fig. 11 Variations of the chip temperature and the temperature variation according to the factor of thickness

같이 f_t 의 값이 0.375일 때 평균 온도 값이 46.8°C로 가장 낮았고, Fig. 11의 f_t 별 RF Chip 온도 변화를 보았을 때 f_t 값이 증가함에 따라 0.125-0.375 구간에서는 감소하며 f_t 가 0.375 이후에는 증가하는 거동을 보였다. 그에 반해 온도 편차는 f_t 가 증가할수록 감소한다. 하지만, f_t 가 0.5인 경우 온도 편차가 더 감소하지만 Figs. 9와 10과 같이 f_t 의 값이 0.5인 경우 최저 온도 구간도 다른 값들에 비해 매우 높다는 점을 알 수 있다. 이는 PGS의 높이 방향의 열전도율이 매우 낮고 평면 방향에서의 열전도율이 매우 높기 때문에 발생하게 된다. f_t 값이 증가하게 되면 두께 증가로 인하여 높이 방향의 열 저항이 변하게 되는데 f_t 값이 0.375보다 크게 되면 평면 방향의 열전도 영향보다 높이 방향으로 열 저항의 증가 영향이 더 커지게 되어 RF Chip의 발열량을 제거하지 못하게 된다. f_t 가 0.375보다 작은 경우에는 전체 알루미늄 하우징 대비 PGS의 두께가 차지하는 비율이 작기 때문에 높이 방향으로 단열 효과를 보이는 영향보다 알루미늄 하우징으로 열 에너지가 전달되어 더 고른 온도 균일도 효과 및 RF Chip의 온도를 낮추게 된다.

따라서, PGS를 적용함에 있어 실제 제작되는 형상에 최적의 성능을 위하여 목표 발열 소자의 온도 이외에도 냉각 성능 향상을 위한 온도 편차 감소를 위한 PGS의 두께 최적화가 필수적이다.

3.3 Via 형상 영향성 비교

Via 유형에 따라 발열 소자 4개중 최대 평균 온도는 Fig. 12와 같으며 온도는 45.4°C이다. Fig. 7의 PGS를 8개로 분할하여 적용한 경우이다. 또한, 온도가 최대인 경우는 평판 형상을 적용한 경우로 최고 온도 47.32°C이다. 최대 및 최저 온도의 차이인 온도 편차의 경우, Fig. 14와 같이 평판 형상을 적용하였을 때 2.56°C로 가장 낮았다.

이는 PGS의 평판 형상은 평면 방향으로 열전달 계수가 높다는 장점을 지니고 있으나, 높이 방향의 열전달 계수는 매우

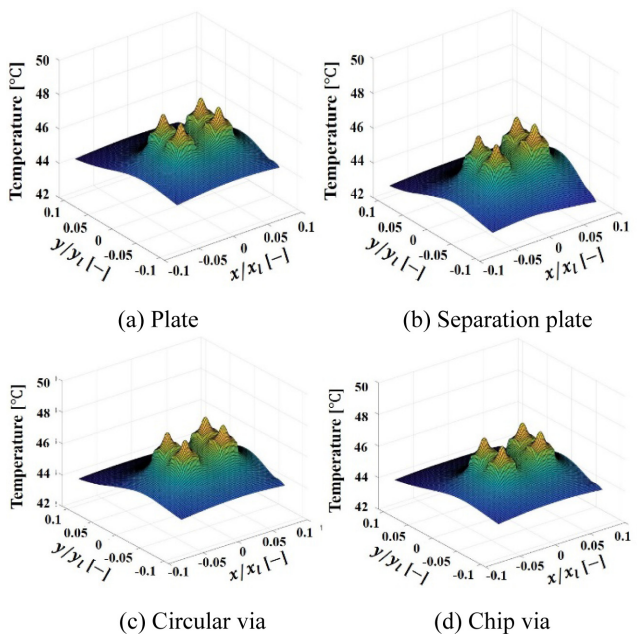


Fig. 12 Variations of the PCB temperature according to the via types

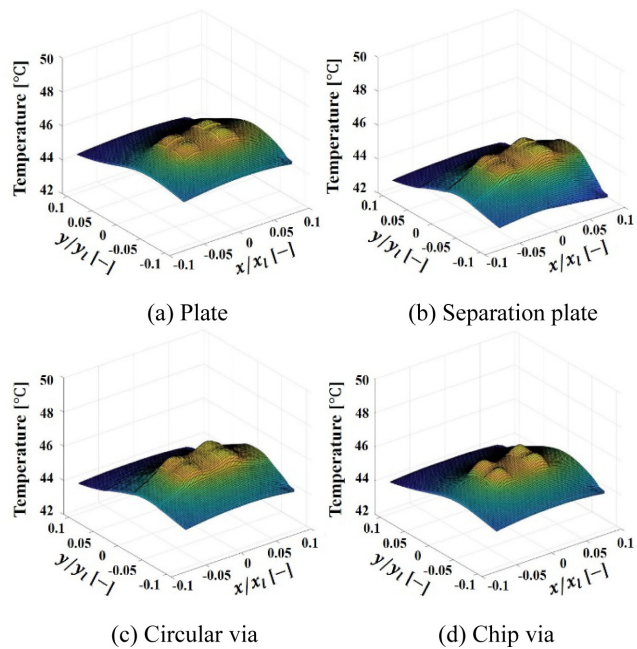


Fig. 13 Variations of the housing temperature according to the via types

낮다. 이러한 원인으로 Fig. 15와 같이 평면 방향으로 열전달은 크지만, 높이 방향에서는 열전달이 상대적으로 작다. 소자의 온도가 가장 낮은 경우인 PGS를 8분할한 형상의 경우 중간 틈에 알루미늄이 채워져 있어 높이 방향으로 열에너지를 전달해주는 Thermal Via의 역할을 수행하여 높이 방향의 열전도율이 낮다는 단점을 보완하게 된다. 그 반면에 다른 형상의 Via들은 다시 온도가 증가하는 추세를 보인다. 특히, Fig. 14에서 PGS에 Circular Via를 적용한 경우 내부 PGS에 적용된 Via의 수량이

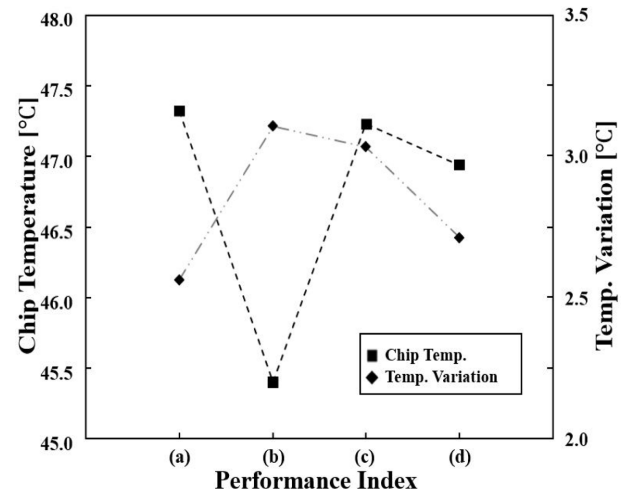


Fig. 14 Variations of the chip temperatures and the temperature variation according to the via types

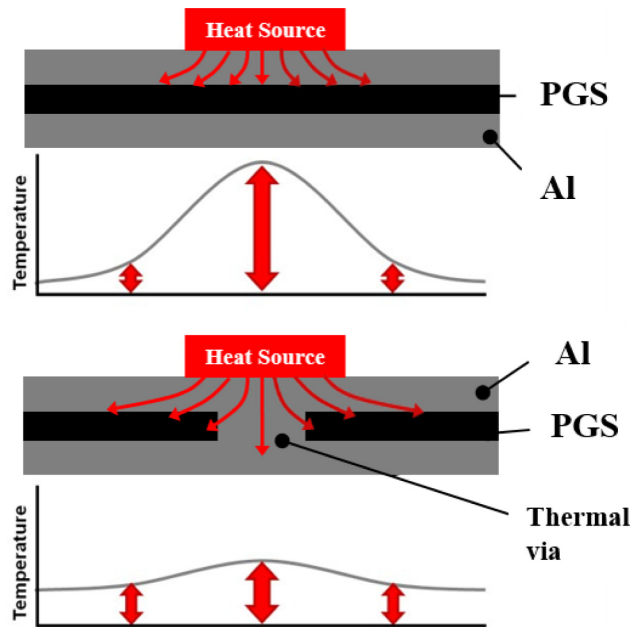


Fig. 15 A comparison of the temperatures between the aluminum housing and PGS applied housing

많아 높은 평면 열전도율을 지닌 PGS의 열전도를 방해하는 일종의 저항 역할을 하게 된다.

Fig. 14의 온도 편차는 평판 형상을 적용한 경우가 가장 좋았지만 전체적으로 높은 온도를 지니고 있다. 이는 두께 영향성과 같은 원인으로 평면 방향으로만 열전달을 시키기 때문이다. 온도 편차 측면에서는 기존 PGS 평판 형상 적용보다는 온도가 낮고 편차의 정도가 낮은 Via의 형상이 Chip 형상과 같은 경우가 가장 적절하다고 판단된다.

따라서 PGS의 단점인 높이 방향의 낮은 열전도율을 극복하기 위한 Thermal Via 적용은 하우징의 방열 패스 등을 고려하여 형상 및 수량을 최적화 적용하여야 한다.

4. 결론

본 연구에서는 능동위상배열 레이더에 실제 제작되어 적용되는 송수신 모듈과 동일한 형상을 갖는 하우징에 대하여 방열 성능 향상을 위해 알루미늄과 PGS를 Hot Pressing한 하우징의 방열 성능을 수치 해석적으로 분석하였다. PGS는 평면 방향의 열전도율이 높고 높이 방향의 열전도율이 낮다는 장단점을 지니고 있다. 이러한 장단점을 이용하기 위하여 기존 알루미늄으로 제작된 하우징 내부에 PGS를 적용하였다. 또한, 적용하는 PGS의 두께 변화와 높이 방향 열전도율 증가를 위한 Via 형상에 따른 영향성을 수행 및 검토하였다.

(1) 알루미늄 하우징과 PGS 평판을 적용한 하우징을 비교한 결과 RF Chip 평균 온도는 약 2.79% 감소, 하우징의 최고 및 최저 온도의 차인 온도 편차는 약 49.98% 감소하였다.

(2) PGS의 두께에 따른 영향성 검토 결과 $f_i = 0.375$ 일 때 RF Chip 평균 온도가 46.8°C로 가장 낮았으며, f_i 의 값이 0.375보다 이하인 경우 f_i 가 증가함에 따라 RF Chip의 평균 온도가 감소하고, f_i 가 0.375 이상일 때 RF Chip의 평균 온도가 증가함을 확인하였다.

(3) $f_i = 0.5$ 일 때 하우징 온도 편차는 1.83°C로 가장 낮았고, f_i 가 증가함에 따라 온도 편차가 감소하는 거동을 보였다.

(4) Via의 형상에 따른 영향성 검토 결과 PGS를 8개로 분할 적용하였을 때 Chip 평균 온도는 45.4°C로 가장 낮고, 평판 형상을 적용하였을 때 하우징의 온도 편차가 약 2.56°C로 가장 낮았다.

이와 같이 PGS의 방열 특성을 이용하면 다른 전자 구성품의 하우징 적용이 가능할 것으로 판단된다. 향후 실험적인 방법을 통해 검증이 필요할 것이다.

REFERENCES

1. BOYD Co., "K-Core® Graphite Technology," [https:// ko.boydcorp.com/thermal-management/k-core-graphite-technology.html](https://ko.boydcorp.com/thermal-management/k-core-graphite-technology.html) (Accessed 8 JAN 2020)
2. BOYD Co., "Aavid Thermacore," <https://ko.boydcorp.com/thermacore.html> (Accessed 8 JAN 2020)
3. Minerals Technologies Inc., "Pyrolytic Grphite," <https://www.mineralstech.com/business-segments/minteq/pyrolytic-graphite> (Accessed 8 JAN 2020)
4. Minerals Technologies Inc., "High Performance Pyrolytic Graphite Composite Heat Spreaders," https://www.mineralstech.com/docs/default-source/refractories-documents/pyrogenics/pyroid/high-performance-pyrolytic-graphite-composite-heat-spreaders.pdf?sfvrsn=50359b20_2 (Accessed 8 JAN 2020)
5. Fan, W., Liu, X., and Mariner, J., "Thermal Pyrolytic Graphite Composite with Coefficient of Thermal Expansion Matching for Advanced Thermal Management," Proc. of the International Microwave Symposium Digest, pp. 1-3, 2012.
6. Chaturvedi, M. C., "Welding and Joining of Aerospace Materials," Elsevier, 2011.
7. Tanabe, J., Sasaki, T., and Kishi, S., "Diffusion Bonding of Ti/Graphite and Ti/Diamond by Hot Isostatic Pressing Method," Journal of Materials Processing Technology, Vols. 192-193, pp. 453-458, 2007.
8. Arhami, F., Mirsalehi, S. E., and Sadeghian, A., "Effect of Bonding Time on Microstructure and Mechanical Properties of Diffusion Brazed IN-939," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 265, pp. 219-229, 2019.
9. Assari, A. and Eghbali, B., "Solid State Diffusion Bonding Characteristics at the Interfaces of Ti and Al Layers," Journal of Alloys and Compounds, Vol. 773, pp. 50-58, 2019.
10. Eergyn Extreme Technology, "Diffusion Bonding Tech Outsourcing," <https://www.energyn.com/25?category=593448> (Accessed 8 JAN 2020)
11. Heusch, C. A., Moser, H. G., and Kholodenko, A., "Direct Measurements of the Thermal Conductivity of Various Pyrolytic Graphite Samples (PG, TPG) Used as Thermal Dissipation Agents in Detector Applications," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Vol. 480, Nos. 2-3, pp. 463-469, 2002.
12. Sabatino, D. and Yoder, K., "Pyrolytic Graphite Heat Sinks: A Study of Circuit Board Applications," IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Vol. 4, No. 6, pp. 999-1009, 2014.
13. Tilford, T., Cook, A., Lu, H., Ramambasoa, A., and Conseil, F., "Numerical Analysis of the Performance of Highly Oriented Pyrolytic Graphite Heat Spreader in Thermal Management of Microelectronics Assemblies," Proc. of the 5th Electronics System-Integration Technology Conference, pp. 1-6, 2014.
14. Fan, W., Galestien, E., Tomek, C., and Manjunath, S., "Doubling the Output of Automotive LED Headlight with Efficient Cooling Using Thermal Pyrolytic Graphite," Proc. of the 15th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, pp. 180-184, 2016.
15. Chung, D. and Takizawa, Y., "Performance of Isotropic and Anisotropic Heat Spreaders," Journal of Electronic Materials, Vol. 41, No. 9, pp. 2580-2587, 2012.
16. Annika, B., "Design of Graphite Heat Spreaders for Avionics," <http://www.diva-portal.se/smash/get/diva2:542590/FULLTEXT01.pdf> (Accessed 8 JAN 2020)
17. Boadu, E. O. and Lin, Y., "Thermal Analysis of Laminated (Copper-Graphite) as Heat Spreader Material," American Journal of Engineering Research, Vol. 3, No. 5, pp. 36-47, 2014.
18. Monier-Vinard, E., Nguyen, M. N., Laraqi, N., Bissuel, V., and Daniel, O., "Steady-State Temperature Solution for Early Design of Annealed Pyrolytic Graphite Heat Spreader: Full Results,"

Proc. of the 15th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, pp. 945-953, 2016.

19. Li, R., "Optimization of Thermal via Design Parameters based on an Analytical Thermal Resistance Model," Proc. of the 6th Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic System, pp. 475-480, 1998.



Sang Hyeok Ahn

Senior researcher in LIG Nex1.
received his M.S in 2016 at School of Mechanical Engineering in Sejong University. His research interests include computational fluid dynamics and heat transfer and fluid mechanics.

E-mail: sanghyeok.ahn@lignex1.com



Sung Hwan Yim

Chief researcher in LIG Nex1.
master in the Department of Mechanical Engineering, Yonsei University. His research interest is computational fluid dynamics and heat transfer.

E-mail: shyim1031@lignex1.com



Jun Woo Park

Senior researcher in LIG Nex1.
master in the Department of Mechanical Engineering, Hongik University. His research interest is computational fluid dynamics and heat transfer.

E-mail: junwoo.park@lignex1.com



Young Eun Ra

Chief researcher in LIG Nex1.
master in the Department of Mechanical Engineering, Yonsei University. His research interest is computational fluid dynamics and heat transfer.

E-mail: youngeun.ra@lignex1.com