

항공기 장착물에 탑재되는 KW급 전력변환장치의 방열설계

Heat Dissipation Design for KW Class Power Control Unit Mounted on Aircraft Store

최석민* · 김형재 · 정재원 · 이철

LIG넥스원 연구개발본부

Seok-min Choi, Hyung-jae Kim, Jae-won Jung, Chul Lee

R&D Center of LIG Nex1 Co, Ltd, Gyeonggi-do, 13488, Korea

[요 약]

항공기 장착물에 KW급 전력변환장치가 탑재되는 경우, 전력 변환 시 발생하는 대량의 발열에 대한 방열설계가 고려되어야 한다. 적절한 방열을 하지 못하는 경우, 장비 오작동 및 화재의 우려가 발생하며 이는 항공기 운항에 있어 치명적인 요인이 될 수 있다. 본 논문은 항공기 장착물에 탑재되는 KW급 전력변환장치의 방열설계에 관하여 기술하였다. 전산해석을 통한 설계 및 제작 후 시험을 수행하였으며, 고전력 변환에 따른 발열부품의 급격한 발열 현상을 확인하여 해석 모델을 보정하였다. 모델 보정 후 방열 구조가 개선된 형상으로 설계를 개선하였으며, 미 군사규격인 MIL-STD-810G의 고온동작 시험을 수행하여 개선된 형상의 타당성을 검증하였다.

[Abstract]

When a KW-class power control unit is installed in an aircraft installation, a heat dissipation design for a large amount of heat generated during power conversion should be considered. Failure to provide adequate heat dissipation can lead to equipment malfunction and fire, which can be a fatal factor in aviation operations. This paper describes the heat dissipation design of a KW-class power control unit installed in aircraft installation. The design and manufacturing test were conducted through computerized analysis, and the analysis model was corrected by confirming the rapid heat generation phenomenon of the heating element due to high power control. After the model revision, the design was improved, and the high-temperature operation test of the US military standard MIL-STD-810G was performed to confirm the feasibility of the improved design.

Key word : Aircraft store, Power control unit, Heat dissipation design, MIL-STD-810G, High temperature test.

<https://doi.org/10.12673/jant.2020.24.4.261>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 5 August 2020; Revised 7 August 2020

Accepted (Publication) 15 August 2020 (30 August 2020)

*Corresponding Author; Seok-Min Choi

Tel: +82-42-718-3635

E-mail: seokmin.choi@lignex1.com

I. 서론

전력변환장치는 각종 산업에서 다양하게 사용되고 있다. 산업용 전기에너지를 사용하는 대용량 설비 시설의 경우, MW급 전력을 다루는 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 해당 분야에서는 경량화 개발 시, 고전력 변환에 따른 발열 문제를 공랭식 히트싱크 설계에 주안점을 두고 설계를 수행한다[1]. 하지만 차량 또는 항공기에 적용되는 경우, 전자기과간섭의 영향을 고려하여 밀폐된 공간에 장치를 탑재하는 경우가 대부분이며 이런 조건에서는 일반적으로 방열판 또는 장치 기구류를 통한 전도방열을 수행한다[2],[3]. 항공기 또는 항공기 장착물의 내부에 탑재되는 장치들이 KW급 전원을 갑작스럽게 사용하는 경우, 고전력을 변환해주는 전력변환장치를 적용하여 고전력 사용 시에도 안정적인 전원 공급이 이루어져야 하며 이 때 장치의 발열이 시스템 운용에 문제를 일으키지 않도록 효과적인 방열이 수행되어야 한다. 모든 산업 분야에서 안전의 문제가 중요하지만, 특히 항공분야에서는 순간의 오작동이 항공기 운항에 문제를 일으키는 경우 심각한 인명피해를 초래할 수 있기에 더욱 중요하다고 할 수 있다. 본 논문에서는 항공기 장착물에 적용되는 KW급 전력변환장치에 대하여 M&S (modeling & simulation)를 통하여 방열 설계를 수행하였으며, 시험을 통한 해석 모델 및 설계 개선을 수행하였다. 최종적으로 MIL-STD-810G 규격의 환경시험을 수행하여 장비운용 안정성을 확인하였다. M&S를 위해 상용 해석프로그램인 ANSYS의 ICEPAK 20.0을 이용하였다.

II. 장치구성 및 방열구조

2-1 장치구성

유한요소 해석을 위하여 구성된 전력변환장치는 외부 하우징 및 내부 전자 구성품으로 구성되어있다. 외부 하우징은 상부 덮개와 몸체로 구성되며, 내부 전자 구성품은 회로카드 조립체와 AC 및 DC 전원을 변환해주는 각종 부품 및 하우징 몸체로의 열전도 및 직접 접촉에 의한 손상을 방지하기 위한 열전도 패드 등으로 구성되어 있다. 열전도 패드는 발열부품과 하우징 사이에 적용되어 열전달을 수행하는데 직접적인 영향을 주는 부품으로 소량이지만 배제해서는 안 되는 부품이다. 일반적으로 비행체에 탑재되는 전자장비 하우징의 경우, 구조 강도를 고려하여 금속재를 적용하는 경우가 대부분이며 이로 인하여 장치 중량의 대부분을 차지한다. 또한, 항공기의 경우 중량에 민감한 시스템으로 구성품별 중량 제한조건이 존재하기 때문에 운용 요구 성능을 만족시키는 범위 내에서 중량을 최소화하는 설계가 필요하다. 본 장치에서는 하우징 측면과 바닥면, 상부 덮개에 자리파기를 통하여 경량화를 적용하였다. 장치의 크기와 기계적인 체결을 고려하여 하우징 바닥면과 장착면의 전체 접

촉이 아닌, 그림 1과 같이 체결부위와 하우징 바닥면 간의 높낮이 차를 적용하였다. 바닥면 전체 접촉을 하는 경우, 체결부위 외의 곳에서는 완벽한 밀착이 아닌 미세한 간극이 발생 가능하며 이러한 미세 간극은 고주파 진동에서 장치 내부의 전자 부품에 영향을 미칠 수 있기 때문이다.

2-2 시스템 방열구조

자연대류 조건에서 단혀있는 시스템 내부의 열전달은 주로 전도를 통하여 수행된다. 본 연구에 적용된 시스템도 강제 대류가 없는 단혀있는 시스템이며, 방열을 위한 전력변환장치의 시스템 열전도 경로는 그림 2와 같다. 주요 발열 부품인 전원 변환용 컨버터들은 하우징 바닥면으로 전도시키며, 하우징 바닥면은 내부 전도를 통하여 하우징 전체로 열을 전달시킨다. 전도된 열은 체결부위를 통하여 장착면으로 열전달이 일어난다. 이러한 열전도 경로 구성은 하우징의 열용량이 운용 시간동안 발생하는 발열 소자들의 발열량보다 크기 때문에 가능하다.

III. 유한요소해석

단혀있는 시스템에서 강제 대류가 없는 조건의 방열설계를 수행하는 경우, 초기 설계 단계에서는 전도에 의한 열전달을 주로 고려하여 발열 부품으로부터 하우징과 외부 열전도까지의 방열 경로 구성 등을 먼저 수행한다. 이후 유한요소해석 단계에서 더 현실화된 모델 구성과 해석조건을 적용하여 설계를 수행하게 된다.

3-1 해석조건 정의

설계단계에서는 실제 현상을 모사할 수 없으므로, 가혹한 조건 하에서도 안정적인 운용이 가능하도록 설계한다.

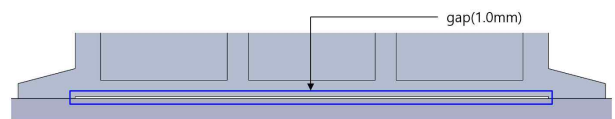


그림 1. 장치 바닥면과 장착면 사이의 간극
Fig. 1. The gap between the device bottom surface and the mounting surface

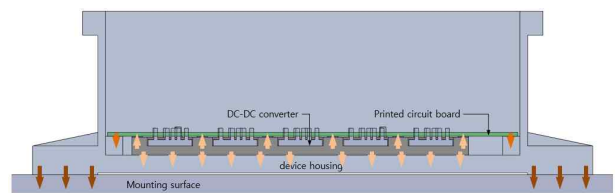


그림 2. 시스템 열전도 경로
Fig. 2. System thermal conduction path

표 1. 운용 환경 조건 비교

Table 1. Comparison of operating environment conditions

	outside temp(°C)	device internal temp(°C)	operation time(min)	remark
high temp operation	71	71	5	
ground test	71	40	120	

본 연구에 적용되는 전력변환장치는 MIL-STD-810G의 환경 시험 규격을 적용하며, 온도 관련 시험으로는 고온 동작 시험이 존재한다. 해당 시험보다 가혹한 운용 조건이라고 판단되는 경우는 고온 조건에서 장치 점검을 위한 지상에서의 장시간 운용이라고 판단되며, 각각의 조건은 다음 표 1과 같다.

3-2 지배방정식

해석모델의 계산 영역은 비정상상태이며, 공기의 밀도 및 점성계수 등의 물성 값이 일정한 비압축성유동으로 가정하였다.

지배방정식으로는 (1) 연속방정식, (2) 운동량방정식, (3) 에너지방정식이 사용되었으며, 고체 내부에서의 전도 방정식은 (8)과 같다. 작동유체인 공기는 이상기체로 정의하였으며, 난류 유동의 해석을 위하여 zero equation 난류 모델을 사용하였다. 복사효과를 고려하기 위하여 해석도구에서 제공하는 광선추적 기법을 적용하였다. 광선추적기법은 광자의 움직임에 따른 운동 방향과 크기를 벡터화시켜 공간 내에서 광자의 운동 경로를 수학적으로 예측하는 기법으로 정밀도를 높이기 위해 표면 격자를 복사표면 수로 나누어 적용할 수 있다. 강제대류가 없는 모델로써 자연대류 조건을 적용하였으며, 이에 따라 밀도 변화에 따른 확산효과를 모사하기 위해 부력항만 압축성 효과를 반영하였다. 이런 경우 부력항은 운동효과를 반영하기 위한 밀도 변화율이 고려되어야 하며, 식(4)와 같이 표현할 수 있다. (4)에서와 같은 밀도 변화가 온도 변화에만 의한 것이라면, 체적열팽창계수 (5)를 적용하여 식(6)과 같이 온도 함수로 단순화시킨 Bousinesque 근사화를 적용할 수 있으며, 밀도의 변화는 체적 열팽창 계수의 변화에 따른 영향이 명백한 것을 알 수 있다. 체적 열팽창계수는 이상기체인 경우 식 (7)과 같이 도출된다.[4]

1) 유체 영역

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \tag{1}$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{u}) + \rho g \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} H) = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) \tag{3}$$

$$\rho g = \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} \right) g = \left(\frac{\rho_\infty - \rho}{\rho} \right) g \tag{4}$$

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P \tag{5}$$

$$(\rho - \rho_\infty) \approx \rho \beta (T - T_\infty) \tag{6}$$

$$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{p}{RT^2} = \frac{1}{T} \tag{7}$$

2) 고체 영역

$$q = -k \nabla T \tag{8}$$

3-3 해석모델

해석 모델을 실제 운용 조건과 유사하게 구성하되 비용적인 면을 고려하여 주 현상 이외의 부가적인 부분 축소 및 모델 형상을 단순화하는 과정 역시 필요하다. 다양한 전자 부품과 각각의 발열량을 단순화하여 집중요소로 치환하고, 주요 발열 부품과 관계된 구성품인 외부 하우징, 전원용 회로카드, 전원변환 컨버터인 AC-DC 컨버터, DC-DC 컨버터와 관련 방열 부품인 브래킷 및 열전도패드의 단순화 모델을 작성하였다. 시스템 열전도 경로와 동일하게 전원 변환 컨버터들의 열전도 경로를 구성하였다. 주요 발열 부품인 전원변환 컨버터 각각의 방열 구조는 다음과 같다.

그림 3은 AC-DC 컨버터의 열원 부어 및 전도경로를 나타낸 것이다. 본 장치에 적용된 AC-DC 컨버터는 부품 상부로 대부분의 열을 방출하며, 전도 효율을 높이기 위해 상부면에 방열판이 적용된 제품이다.

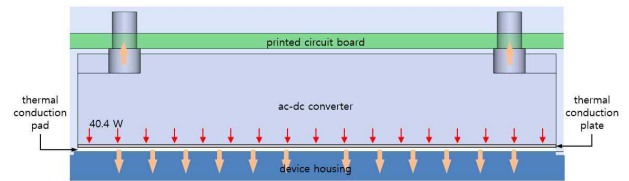


그림 3. AC-DC 컨버터 열전도 경로

Fig. 3. AC-DC convertor thermal conduction path

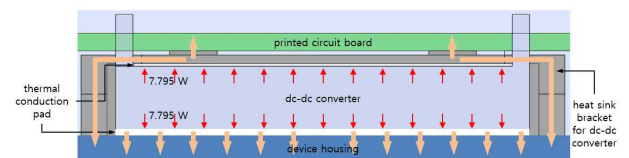


그림 4. DC-DC 컨버터 열전도 경로

Fig. 4. DC-DC convertor thermal conduction path

이와 동일한 구성을 위하여 컨버터 몸체의 재질과 방열판 재질을 구분하고, 몸체 상부면과 방열판 간의 접촉면에 발열량만큼의 열원을 적용하였다. 또한, AC-DC컨버터와 하우징의 직접 접촉 시, 진동 등에 의하여 부품손상이 발생할 수 있기 때문에 방진 목적을 겸하여 열전도 패드를 적용하였다. 그림 4는 DC-DC 컨버터의 열원 부여 및 전도경로를 나타낸 것이다. DC-DC 컨버터는 부품 상하부로 대부분의 열을 방출한다. 이런 부품의 경우, 부품 하부면과 회로카드를 직접 접촉시키면 발열에 의한 오작동이 발생하는 경우가 발생한다. 따라서 회로카드와 부품 사이의 간격을 유지해주고 하우징으로 열전도를 일으키는 고정용 브래킷을 적용하였다. 열원은 DC-DC 컨버터의 상/하부면 각각에 발열량을 50%로 나누어 부여하였다. 또한, AC-DC컨버터와 동일한 목적으로 DC-DC컨버터 상부면과 하우징 사이에 열전도패드를 적용하였다. 표 2는 해석모델에 적용된 주요 발열 부품의 발열량 및 동작범위를 나타내며, 표 3은 해석모델에 적용된 구성품의 재질 및 열전도율을 나타낸다. 해석 모델의 격자는 hexagonal 격자를 주로 사용하였고 일부 tetrahedral 격자를 사용하였으며, 격자 구성 효율을 위해 ICEPAK에서 제공하는 conformal mesh 기법을 적용하였다. 과도응답해석을 수행하였으며 time step은 0.05초, iteration은 step 당 20회로 수행하였다.

표 2. 주요 발열 부품의 발열량 및 허용 동작 온도 범위

Table 2. Major heat dissipation parts and amounts of heat generation

	part name	quantity	power dissipation (W)	operating temp(°C)
1	AC-DC converter	2	40.4	-40~125
2	DC-DC converter	5	15.59	-40~125
3	printed circuit board	1	1.0	
total			56.99	

표 3. 구성품의 재질 및 열전도율

Table 3. Material and conductivity of components

part name	material	thermal conductivity (W/m-K)	비고
top cover	A6061-T6	167.0	
housing body	A6061-T6	167.0	
thermal conduction pad	IDHT-G3050	3.0	
printed circuit board	FR4	plane : 11.09 normal : 0.38	
AC-DC converter (heat sing included)	Ceramic (A6061-T6)	15.0 (167.0)	
DC-DC converter	Ceramic	15.0	
heat sink bracket for DC-DC converter	A6061-T6	167.0	
mounting plate	A6061-T6	167.0	

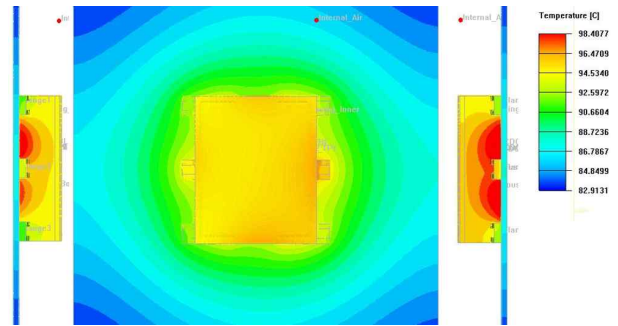


그림 5. 전력변환장치 온도 분포 형상

Fig. 5. Temperature contour of power conversion unit

표 4. 해석 조건과 시험과의 차이

Table 4. Difference between analysis condition and test

	part name	quantity	operating temp(°C)	maximum temp(°C)	temp margin(%)
1	AC-DC converter	2	-40.0 ~ 125.0	111.7	10.6
2	DC-DC converter	5	-40.0 ~ 125.0	112.5	10.0

3-4 해석 결과

그림 5는 장치 외부의 온도 분포 형상을 나타낸 것이며, 표 4는 발열 소자별 온도 결과를 나타낸 것이다. 그림 5의 분포 형상을 통하여 하우징 바닥을 통해 측면으로 전도된 열이 체결부위를 통하여 전도된 형상을 관찰할 수 있으며, 표 4에서 주요 발열 부품의 부품 온도 여유를 확인할 수 있다. 해당 형상을 기준으로 제작을 수행하였으며, 시험을 통한 검증을 수행하였다.

IV. 설계 개선 및 시험

4-1 간이시험 및 해석 보정

설계형상으로 구성된 전력변환장치를 제작하여 운용성능 사전 검증을 위한 간이시험을 수행하였다. 간이시험은 실제 환경시험에 적용되는 MIL-STD-810G의 고온동작 시험 조건과 동일한 조건으로 수행하였으며, 동작 성능 확인은 장치의 최대 운용 조건과 동일하게 1.2 KW 부하를 인가하여 확인하였다. 전력 변환에 의한 장비 내부 발열 관측을 위하여 그림 6과 같이 저항온도 감지(RTD; resister temperature detector)센서를 발열 부품이 집중된 DC-DC 컨버터 조립부의 회로카드면에 부착하였다. 시험을 통해 획득한 실측 값과 해석상의 값을 비교하기 위하여 고온동작 시험과 동일한 조건으로 해석을 수행하여 시험에 적용한 온도센서 위치와 동일한 지점의 온도분포를 확인하여 그림 7과 같은 결과를 얻었다.

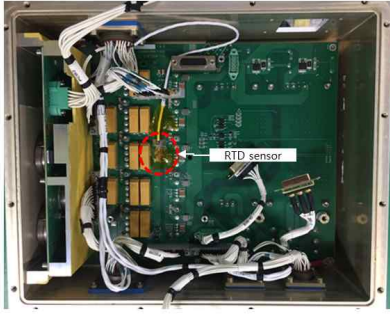


그림 6. 전력변환장치 내부 온도센서 적용위치
 Fig. 6. RTD sensor position in power conversion unit

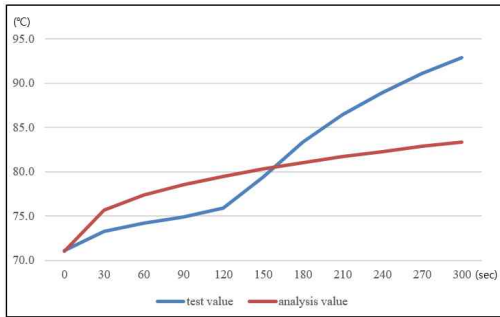


그림 7. 시험과 해석 간 온도 분포 형상 비교
 Fig. 7. Comparison of temperature contour between test and analysis result

실측과 해석 결과의 차이의 가장 큰 원인은 고전력 변환에 따른 부품의 급격한 온도 변화에 있다. 실제 장비에서 고전력 변환시, 부품 발열량이 증가하여 부품과 장치 내부 온도가 높아지고 이에 따라 부품의 효율이 저하되면서 발열량이 급격하게 증가하기 때문에 판단할 수 있다. 설계단계에서는 이러한 부품 운용 온도와 효율에 따른 발열 모델 구현이 현실적으로 어렵다. 본 연구에서는 시험 결과를 바탕으로 DC-DC컨버터의 발열 모델을 그림 8과 같이 오차율 1.4% 이내로 보정하였다.

4-2 설계 개선 및 환경시험

기 설계 형상의 방열구조는 장시간 동작 시에도 하우징의 열용량이 내부 발열량보다 크다는 조건으로 장착면과 장치 체결부를 통하여 전도시키는 구조였으나, 시험으로부터 확인된 것과 같이 동작 초기부터 급격한 발열의 증가가 발생하는 DC-DC컨버터의 경우 신속한 방열을 통하여 부품의 운용 안정성을 확보해주어야 한다고 판단하였다. 기존에 바닥면과 장착면 사이에 부여한 간극을 제거하여 하우징 바닥면 전체를 통해 장착면으로 신속하게 열을 전도시키는 구조로 그림 9와 같이 재구성하였다. 장착면 전체 접촉에 대한 고려는 체결부위 외의 바닥면에 열전도 패드를 적용하여 하우징 바닥면과 장착면 간 미세 간극이 발생하지 않도록 하였다.

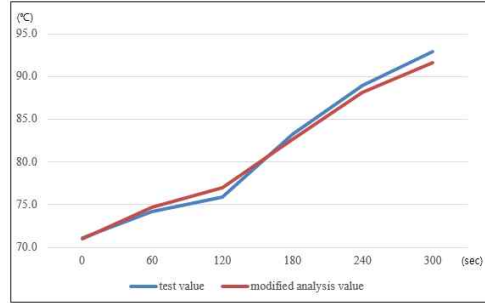


그림 8. 해석 모델 수정 후 온도분포 형상 비교
 Fig. 8. Comparison of temperature contour after analysis model modified

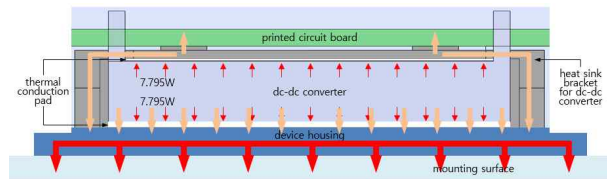


그림 9. 수정된 시스템 열전도 경로
 Fig. 9. Modified system thermal conduction path

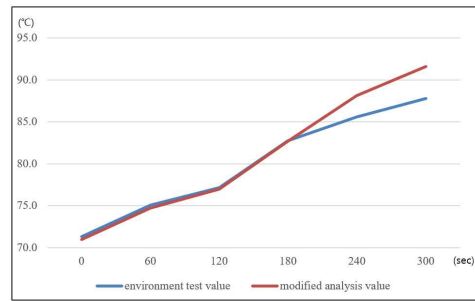


그림 10. 환경 시험 결과와 해석 간 온도분포 형상 비교
 Fig. 10. Comparison of temperature contour between environment test and analysis result

4-3 환경시험 결과

개선된 형상으로 시제를 제작하여 환경시험을 수행하였다. 시험과 해석과 간 그림 10과 같은 결과를 얻었으며, 최대 오차 4.4% 범위로 일치함을 확인할 수 있었다. 운용 시간이 길어질수록 실제 시험 결과의 온도가 낮은 것은 하우징 하부면을 자리 파괴 없이 제작 후, 열전도 패드에 의한 직접 방열을 수행하여 신속한 열전도가 이루어지기 때문으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구를 통하여 고전력 변환 시 급격한 발열이 발생하는 부품에 대하여 시험을 통한 해석 모델 보정을 통해 4.4% 오차

내로 합리적인 해석 모델을 제시할 수 있었으며, 시험 결과 안정적인 부품 운용 온도 확보에 따른 안전한 장치 운용이 가능함을 확인할 수 있었다. 또한, 강제대류가 없는 조건에서 고전력을 사용하는 장치를 개발하는 경우, 동작 초기부터 발열 부품을 신속하게 전도 방열해주는 구조 설계를 진행하여야 고온 환경에서도 안정적인 장비 운용이 가능함을 확인할 수 있었다.

References

[1] S. Y. Kim, S. D. Kim, S. R. Ryoo, N. K. You, T. B. Kim, C. O. Hong and H. S. Ko, "Thermal-fluid analysis for cooling performance improvement of 3.3KV(105A) compact rack type medium voltage inverter system," *The Korea Society of*

Computational Fluids Engineering, Vol. 19, No. 3, pp. 24-28, Sep. 2014.

[2] I. H. Kim, "A numerical study on heat dissipation in enclosed electronic equipment," in *The Korean Society of Mechanical Engineering 2018 Conference*, Gangwon-do: Korea, pp. 3179-3183. 2018.

[3] S. M. Choi, J. C. Hyun, and J. Y. Lee, "A study on the thermal design for a global positioning system in the guided missile," in *The Institute of Military Science and Technology 2015 Conference*, Jeju: Korea, pp. 945-946. 2015.

[4] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, *Principles of Heat and Mass Transfer*, 7th ed. Hoboken, NJ: John Wiley&Sons, Inc, 2012.



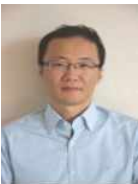
최 석 민 (Seok-Min Choi)

2010년 2월 : 건국대학교 항공우주정보시스템공학과 (공학석사)
2010년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원 선임연구원
※ 관심분야 : 유도탄 체계, 항공기체계설계, 열전달



김 형 재 (Hyung-Jae Kim)

2011년 8월 : 경희대학교 동서의료공학과 (공학석사)
2013년 4월 ~ 현재 : LIG넥스원 선임연구원
※ 관심분야 : 유도탄체계, 전력전자



이 철 (Chul Lee)

1999년 2월 : 한양대학교 기계설계공학과 (공학석사)
1999년 3월 ~ 현재 : LIG넥스원 유도무기1연구소 수석연구원
※ 관심분야 : 유도탄 체계, 열전달, 기계설계



정 재 원 (Jae-Won Jung)

1999년 2월 : 부산대학교 전기공학과 (공학석사)
2000년 7월 ~ 현재 : LIG넥스원 수석연구원
※ 관심분야 : 유도탄체계, 전력전자