

적층형 디지털송수신모듈의 방열특성 분석

윤기철^{*,1)} · 김상운²⁾ · 허재훈²⁾ · 곽노진²⁾ · 김찬홍¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제3기술연구본부

²⁾ 한화시스템(주) 기계설계팀

Analysis on Heat Dissipation Characteristics of a Tile-Type Digital Transmitter/Receiver Module

Kichul Yoon^{*,1)} · Sangwoon Kim²⁾ · Jaehun Heo²⁾ · Nojin Kwak²⁾ · Chan Hong Kim¹⁾

¹⁾ The 3rd Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

²⁾ Mechanical Design Team, Hanwha Systems, Korea

(Received 30 October 2018 / Revised 29 January 2019 / Accepted 8 March 2019)

ABSTRACT

A Digital Transmitter/Receiver Module(DTRM), which is an essential part in active phased-array radar systems, generates a high heat density, and needs to be properly cooled for stable operation. A tile-type DTRM that is a stacking structure of multi-layer components was modeled with simplification and heat dissipation characteristics of the DTRM model were studied using computational fluid dynamics(CFD) simulations. Most of the heat was dissipated by the heat conduction through the cold plate, but the heat transfer by the forced convection on top of the DTRM also was found to play an important role in the thermal management. Under the given conjugated heat transfer environment, the DTRM was confirmed to secure a stable operating temperature range.

Key Words : Heat Dissipation(방열), Liquid Cooling(액체냉각), Cold Plate(냉각판), Active Phased-Array Radar(능동위상배열 레이더), Digital Transmitter/Receiver Module(디지털송수신모듈)

기 호 설 명

μ : 점성계수	k : 열전도도
ρ : 밀도	p : 압력
τ : 점성 전단응력 텐서	q : 확산 열유속
τ^R : Reynolds-stress 텐서	Q_H : 열생성률/단위부피

C_p : 비열	S : 외력/단위부피
e : 내부에너지/단위부피	T : 온도
h : 엔탈피/단위부피	u : 유체 속도

1. 서 론

능동위상배열(Active phased array) 레이더의 안테나는 다수의 디지털송수신모듈(Digital Transmitter/Receiver

* Corresponding author, E-mail: yoonkc@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

Module, DTRM)로 구성되어 전자적으로 빔조향 및 빔형성이 가능하므로 고정형 안테나 구조로 운용이 가능하다^[1]. 따라서 기계식 빔조향 레이더 안테나에 비해 기계 구조가 단순하며 상대적으로 낮은 RCS(Radar Cross Section) 특성을 갖는다. 이러한 이점 때문에 능동위상배열 레이더는 점차 많은 분야에서 기계식 빔조향 레이더를 대체하며 발전해오고 있다.

능동위상배열 레이더 안테나의 핵심 구성품 중 하나인 DTRM은 반도체 기반의 TRM으로써 송신용 고출력 증폭기(High Power Amplifier, HPA)와 수신용 저잡음 증폭기(Low Noise Amplifier, LNA) 등 고밀도 발열 소자를 포함한다. 따라서 방열 설계가 시스템 신뢰성 확보 측면에서 대단히 중요하다. 냉각공기에 의한 방열 방식만으로는 능동위상배열 레이더 안테나의 열적 신뢰성 확보가 어려우므로 많은 경우에 냉각판에 의한 열전달 방식이 병행된다^[2-5].

능동위상배열 레이더에 적용되고 있는 DTRM은 구조에 따라 크게 brick형 및 tile형으로 구분된다^[6]. Brick형 DTRM은 LITA(Longitudinally Integrated and Transversally Assembled) 구조로 넓은 전열 면적 확보가 가능한 장점이 있지만, 부피/중량이 크므로 설치에 제약 받을 수 있다. Tile형 DTRM은 적층형태의 TILA(Transversally Integrated and Longitudinal Assembled) 구조로써 소형/경량 구조로 제작이 가능하므로 RCS 감소 등 여러 이점이 있는 반면, 방열설계에 더욱 많은 노력이 필요하다. 최근 미국 및 이스라엘 등에서 개발된 함정용 능동위상배열 레이더의 경우 tile형 DTRM을 적용하고 있다.

본 논문에서는 실제 적용 가능한 형태의 적층형(tile형) DTRM과 금속냉각판을 단순화하여 모델링 하였으며, 레이더 운용환경에서의 예측 발열량을 고려하여 DTRM과 금속냉각판의 복합열전달 해석을 통해 DTRM의 방열특성을 분석하였다.

2. 해석 모델 및 조건

2.1 지배방정식

본 연구에서의 복합 열전달 해석은 상용 Computational Fluid Dynamics(CFD) 소프트웨어인 FloEFD 16.1을 통해 수행되었다. 유체의 유동/열 해석을 위해 FloEFD에서 사용되는 일반적인 형태의 질량, 운동량, 에너지 보존 방정식은 각각 식 (1) ~ (3)과 같다.

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

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

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

위 식에서 ρ , u , p 는 각각 유체의 밀도, 속도, 압력이다. S 는 유체에 작용하는 단위 부피당 외력, $H = h + u^2/2$ 로써 단위 부피당 엔탈피와 운동에너지의 합, τ 는 점성 전단응력 텐서, q 는 확산 열유속, e 는 단위 부피당 내부에너지, Q_H 는 단위 부피당 열생성률이다. τ^R 은 Reynolds-stress 텐서로써 층류 유동에서는 무시된다. 추가적으로, 난류 유동에서는 난류 운동에너지 및 소산률에 대한 수송 방정식($k-\epsilon$ 모델)이 이용된다.

고체 내부의 열확산 방정식은 식 (4)와 같다.

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

위 식에서 T 는 온도, k_i 는 열전도도 텐서로 등방성 매체의 경우 $k_1 = k_2 = k_3 = k$ 이다.

지배방정식 및 수치해석기법에 대한 보다 자세한 내용은 FloEFD Technical Reference를 통해 확인 가능하다. 본 연구에서는 이상기체(공기) 및 비압축성(냉각액) 유동의 정상상태 해를 계산하였다.

2.2 해석 모델

Computational Fluid Dynamics(CFD) 해석을 위한 단순화된 16채널 DTRM과 금속냉각판의 모델은 Fig. 1과 같다. DTRM은 총 4개의 층으로 구성되며, 내부는 주요 발열원 및 열전도 경로 등을 포함하도록 단순화하였다. 보수적 해석 및 편의성을 위해 기판은 일부를 제외하고는 모델에 반영하지 않았다. 각 냉각판은 두 개의 냉각채널(18 mm × 18 mm)을 포함하며, 두 냉각판에 하나의 DTRM이 걸쳐있는 형태로 모델링하였다.

DTRM 내부의 주요 발열원들로부터 발생한 열은 기본적으로 하우징을 통한 열전도에 의해 방열되도록

설계되었다. 발열원과 하우징의 양호한 접촉을 위하여 접촉면에 thermal pad를 적용하였으며, 해석 시 thermal pad의 두께(t)와 열전도도(k)에 상응하는 열저항($R'' = t/k$)을 접촉면의 열접촉저항으로 부여하였다. 다만, 1st layer 내의 HPA와 DRA1은 1st layer 하우징과 서로 매끄러운 금속면간의 볼트접합을 통해 안정적인 접촉을 하도록 설계되었으므로 thermal pad를 적용하지 않았다. DTRM 모델 각 층의 구조 및 주요 발열원은 Fig. 2와 같다. 1st layer에는 Fig. 2-A)와 같이 알루미늄 격벽 구조 내부에 HPA와 DRA1이 위치하며, 4개의 DC-DC는 알루미늄 격벽 위에 위치함으로써 격벽을 통한 열전도에 의해 방열된다. 각 4개의 LNA1/2/3 및 DRA2/3은 Fig. 2-B)와 같이, 8개의 T/R IC는 Fig. 2-C)와 같이, 그리고 FPGA와 OPTIC IC는 Fig. 2-D)와 같이 분포 배치되었다.

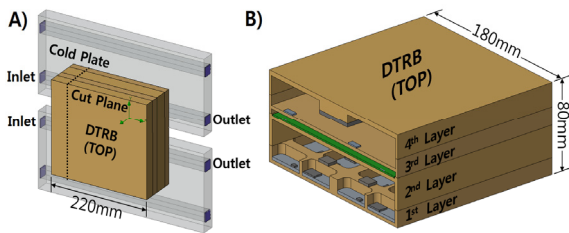


Fig. 1. The Computational Fluid Dynamics(CFD) simulation model. A) A DTRM on two cold plates, B) A cross section of DTRM

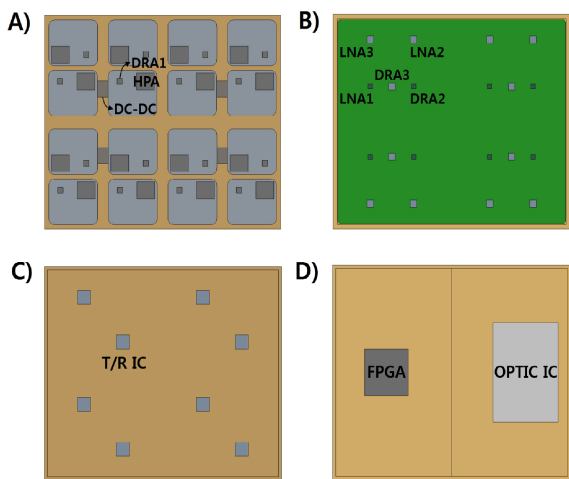


Fig. 2. Components of DTRM in each layer. A) 1st layer, B) 2nd layer, C) 3rd layer, D) 4th layer

주요 발열원들의 발열량 및 thermal pad 적용 두께를 Table 1과 같이 정리하였다. 발열량은 데이터시트 및 실험에 의해 확인된 각 소자별 소모전력과 효율을 고려하여 산정하였다. 발열량 산정시 고려한 효율은 DRA1(35 %)을 제외한 증폭소자(HPA, DRA2/3, LNA1/2/3)의 경우 50 %, DC-DC 85 %, 그 이외 구성품(TR/IC, FPGA, OPTIC IC)은 10 %를 적용하였다. DTRM의 총 발열량은 402.8 W로 계산되었다.

Table 1. Heat generation rate of the primary heat sources and the applied thermal pad thickness

Layer	Chip	HGR [W]	Thermal pad thickness [mm]
1 st layer	HPA (High Power Amplifier)	248.3	-
	DRA1 (DRiving Amplifier)	26.3	-
	DC-DC (DC-DC converter)	19.4	0.5
2 nd layer	DRA2	0.8	0.5
	DRA3	1.2	0.5
	LNA1 (Low Noise Amplifier)	2.9	0.5
	LNA2	3.2	0.5
	LNA3	3.2	0.5
3 rd layer	T/R IC (T/R Integrated Circuit)	60.1	0.5
4 th layer	FPGA (Field Programmable Gate Array chip)	18.0	1.0
	OPTIC IC (Optic Integrated Circuit)	19.4	1.0

2.3 해석 조건

복합 열전달 해석을 위한 해석 조건은 아래와 같다. 냉각액은 Ethylene Glycol(55 %)과 물(45 %)이 혼합된 EGW55로써 냉각관내 냉각채널을 통해 동일한 방향으로 흐르도록 모사하였다. 냉각액 공급 온도는 25 °C, 유량은 0.001 m³/s(60 LPM), 외기 온도는 25 °C로 현

실적인 레이더 운용환경을 고려하여 선정하였다. 입력된 경계조건은 냉각채널 입구 조건(inlet volume flow rate: 0.001 m³/s, inlet temperature: 25 °C, fully developed flow), 냉각 채널 출구 조건(environment pressure: 101325 Pa)과 같다. FloEFD External analysis의 외기 유동 조건은 (ambient temperature and pressure: 25 °C, 101325 Pa)과 같이 입력되었다. DTRM 외부 공기 유동에 의한 추가 냉각효과를 분석하기 위해 DTRM에 평행하도록 공기 유동을 형성하였으며, 공기 유속은 0 m/s(자연대류)와 3 m/s(강제대류) 두 가지 경우로 해석을 진행하였다. 해석에 사용된 냉각액(EGW55)과 냉각판 및 DTRM 하우징(Al6061)의 물성치는 Table 2와 같다. 각 하우징의 접촉면, DTRM과 냉각판 접촉면, HPA/DRA와 하우징 접촉면 사이의 열접촉저항은 일반적인 접촉 상황에서의 알루미늄-알루미늄 열접촉저항인 8.8×10⁻⁵ K·m²/W를 적용하였다^[7].

Table 2. Properties of the materials used in CFD simulations

Material	Property	
Cooling liquid (EGW55 @300K)	Density(ρ)	1080.7 [kg/m ³]
	Dynamic viscosity(μ)	0.00214 [Pa·s]
	Specific heat(C_p)	3278 [J/(kg·K)]
	Thermal conductivity(k)	0.393 [W/(m·K)]
Cold plate & DTRM housing (Al6061 @300K)	Density(ρ)	2700 [kg/m ³]
	Specific heat(C_p)	953.86 [J/(kg·K)]
	Thermal conductivity(k)	155.5 [W/(m·K)]
Thermal pad	Thermal conductivity(k)	3 [W/(m·K)]

3. 결과 및 토의

동일한 냉각액 공급 온도/유량 조건하에서 외부 유동조건에 따른 DTRM 내/외부 온도분포 Fig. 3과 같

다. FPGA와 OPTIC IC에 의해 발열되고 있는 DTRM 4th layer의 최고온도는 강제대류 조건하에서 약 3.8 °C 정도 낮게 형성되었다. 반면, 1st layer 내부의 온도는 자연대류와 강제대류 두 경우 모두 거의 유사하게 분포하였다. 즉, 외부 유동에 의한 추가 방열 효과는 1st layer까지는 거의 미치지 않고 2nd ~ 4th layer에 국한되는 것을 확인하였다. 또한, DTRM 1st layer에 위치하는 발열소자들은 매우 높은 발열량을 갖지만 금속냉각판에 의한 우수한 냉각효율로 인해 안정적인 온도범위로 분포하는 것을 확인하였다.

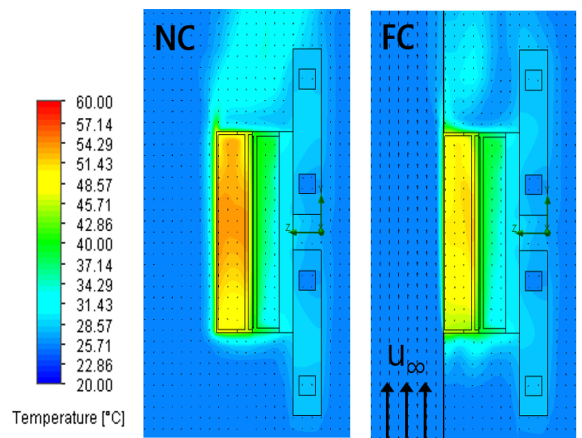


Fig. 3. Temperature distributions inside/outside the DTRM under natural convection(NC, left) and forced convection(FC, right) conditions

강제대류에 의한 추가 방열효과가 가장 두드러지는 DTRM 3rd 및 4th layer의 온도분포는 각각 Fig. 4-A)와 Fig. 4-B)와 같다. 외부 강제 유동에 의해 3rd layer의 경우 최대 약 2.8 °C, 4th layer의 경우 약 3.8 °C 낮게 온도가 형성되었다. 또한, Fig. 4-A)와 같이 8개의 T/R IC는 배치되는 위치에 따라 온도 편차가 형성되었으며, 자연대류와 강제대류 모두 약 5.5 °C의 온도 편차가 확인되었다. 이는 열전도 경로에 기인한 것으로, 바깥쪽 하우징까지의 전도 열저항의 크기에 영향을 받는 것으로 이해할 수 있다. 4th layer의 온도분포 경우에는 FPGA 및 OPTIC IC에서 발생한 열이 하우징 벽면을 통해 금속냉각판에 의해 냉각되기도 하지만 일부는 외부 유동에 의해 냉각되기 때문에 강제대류의 경우 온도편차가 적을 뿐만 아니라 전반적으로 온도가 낮게 형성되었다.

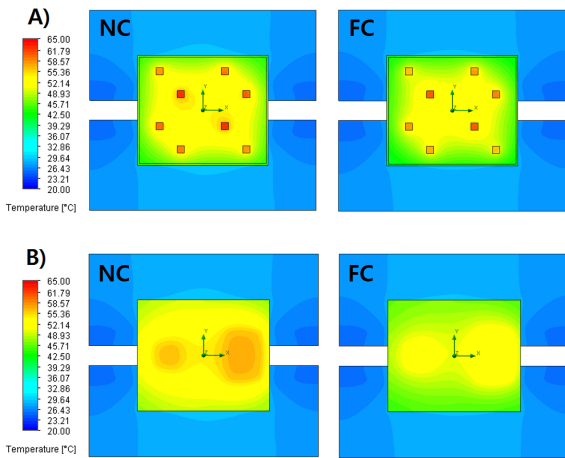


Fig. 4. Temperature distributions of the cold plates and A) 3rd layer & B) 4th layer of DTRM under natural convection (NC, left) and forced convection (FC, right) conditions

자연대류와 강제대류 하에서 분석된 주요 발열원에 대한 최대 온도는 Fig. 5와 같다. DTRM 1st layer에 위치하는 HPA 및 DRA1, 그리고 DC-DC의 경우 높은 발열량에도 불구하고 40 °C 이하의 안정적인 온도로 분포하고 있다. 하지만 냉각판에서 멀리 위치한 T/R IC, FPGA, 그리고 OPTIC IC는 50 °C 이상의 온도가 형성되었다. 강제대류에 의한 추가 방열효과는 냉각판에서 멀어질수록 두드러지는 것을 확인할 수 있다.

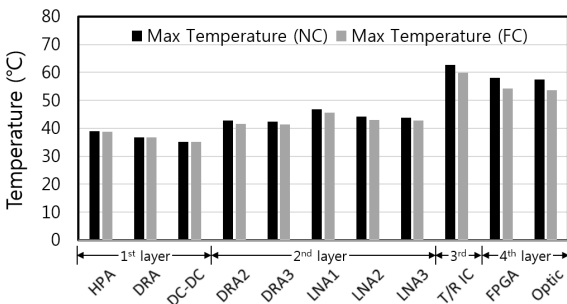


Fig. 5. Maximum temperatures of the primary chips under natural convection (NC) and forced convection (FC) conditions

자연대류 및 강제대류 시 외부 공기에 의한 냉각량과 냉각액에 의한 냉각량을 분석하였으며, 그 결과는 Fig. 6과 같다. 냉각액의 입/출구 온도차로부터 냉각액

에 의한 냉각량이 계산되며, 나머지 열은 외부 공기에 의한 냉각량으로 고려되었다. 자연대류 시 전체 발열량 대비 약 2.5 % 정도만이 외부 공기에 의해 냉각되었으며, 평균 열전달계수는 약 4.8 W/m²·K으로 강제대류 평균 열전달계수(15.5 W/m²·K)의 30 % 수준으로 확인되었다. 강제대류의 경우에는 약 5.0 % 정도의 발열량이 외부 공기에 의해 냉각되었으며, 이는 DTRM 2nd ~ 4th의 발열량 총합 108.8 W의 약 20 %에 해당하는 값으로 방열에 있어 중요한 역할을 하는 것으로 확인되었다. 더욱이, 다수의 DTRB가 대형 안테나를 구성하는 경우, 발열원 군집에 의한 온도 상승이 예상되며, DTRB 상층부의 효율적인 방열이 중요한 설계 요소일 것으로 판단된다.

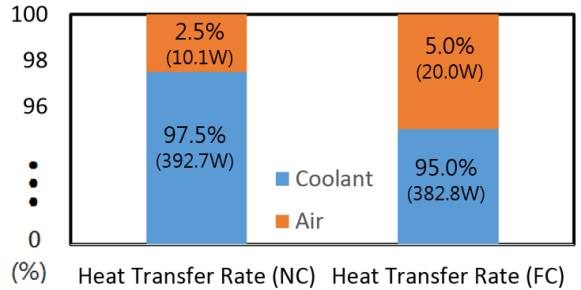


Fig. 6. Heat removal rate of coolant/air under natural convection (NC) and forced convection (FC) conditions

격자 의존성 및 해의 수렴성을 확인하였으며, 격자 의존도가 가장 크게 나타난 FPGA 평균온도의 수렴 결과는 Fig. 7과 같다. 본 논문은 Case 2 결과를 바탕으로 작성되었다.

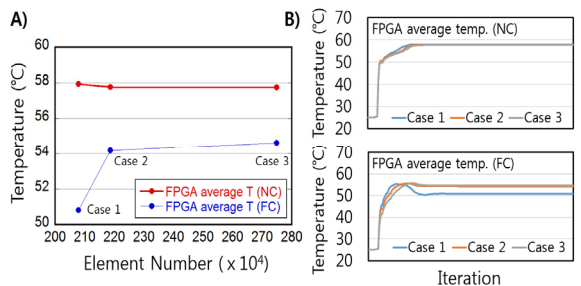


Fig. 7. Convergence results of FPGA average temperature with respect to A) the element number and B) iteration number

4. 결 론

복합열전달 해석을 통해 고밀도 발열소자를 다수 포함하는 DTRM의 냉각특성을 분석하였다. DTRM에서 발생하는 대부분의 열(약 95 % 이상)은 냉각판에 의한 열전도로 냉각되었으며, 외부 유동에 의한 냉각 효과는 DTRM 2nd ~ 4th layer에 국한되었다. 강제대류 하에서 전체발열량의 약 5%만이 냉각 공기에 의해 냉각되었으나, 그 냉각량은 DTRM 2nd ~ 4th layer 총 발열량의 약 20 %에 해당하는 양으로 외부 유동은 DTRM 냉각에 있어 중요한 역할을 하는 것으로 확인되었다. 냉각판에 의한 전도와 냉각 공기에 의한 강제대류 열전달에 의해 적층형 구조의 DTRM이 60 °C 이내의 안정적인 온도에서 동작할 수 있음을 확인 하였다. 방열 측면에서 적층형 DTRM의 능동위상배열 레 이더 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

References

- [1] M. I. Skolnik, "Introduction to Radar Systems 3rd Edition," McGraw-Hill, New York, pp. 559-566, 2002.
- [2] C. Jung, W. Lee, S. Kang, and K. Kim, "Analysis of Cooling Performance of AESA(Active Electronically Scanned Array) Radar Antenna System," Proceedings of the KSME 2011 Fall Annual Meeting, pp. 1673-1677, November, 2011.
- [3] L. Wang, Z. Wang, C. Wang, G. Li, and L. Yin, "Multiobjective Optimization Method for Multichannel Microwave Components of Active Phased Array Antenna," Mathematical Problems in Engineering, Vol. 2016, 5398308, 2016.
- [4] M. Parlak and M. Yaban, "Thermal Solution of High Flux Phased Radar Antenna for Military Application," ASME 2015 International Electronic Packaging Technical Conference and Exhibition, Vol. 2, IPACK2015-48055, 2015.
- [5] E. Alpsan, "Experimental Investigation and Numerical Analysis of Microchannel Heatsinks for Phased Array Radar Cooling Applications," MSc Thesis, Mechanical Engineering Department, METU, Ankara, 2008.
- [6] S. Rathod, K. Sreenivasulu, K. S. Beenamole, and K. P. Ray, "Evolutionary Trends in Transmit/Receive Module for Active Phased Array Radars," Defense Science Journal, Vol. 68, No. 6, pp. 553-559, November 2018.
- [7] Y. A. Cengel, "Heat Transfer: A Practical Approach 2nd Edition," Mcgraw-Hill, pp. 138-142, 2002.