

다중 냉각유로가 적용된 수랭식 군사용 대면적 안테나의 열성능 예측 기술

이예륜^{*,1)} · 장성욱¹⁾ · 최필경¹⁾ · 곽노진¹⁾ · 박준정²⁾

¹⁾ 한화시스템(주)

²⁾ MPSE

Development of Thermal Performance Prediction for Large Planar Military Antenna with Multi-Cooling Channels

YeRyun Lee^{*,1)} · SungWook Jang¹⁾ · PilGyeong Choi¹⁾ · NohJin Kwak¹⁾ · JunJung Park²⁾

¹⁾ Hanwha Systems Co., Ltd., Korea

²⁾ MPSE, Korea

(Received 19 October 2023 / Revised 25 November 2023 / Accepted 10 January 2024)

Abstract

Large planar military antenna boasts a range of electrical components, including TRA(Transmit-Receive Assembly), signal processors, etc. which engage in computations and calculations. These processes generate a significant amount of heat, leading to unforeseen consequences for the equipment. To mitigate these adverse effects, it's imperative to implement a cooling system that can effectively reduce heat-related issues. Given the antenna's intricate nature and the multitude of components it houses, a two-step estimation process is necessary. The first step involves a comprehensive model calculation to determine the total flow characteristics, while the second step entails a thermal analysis of individual TRA set. In this study, we depicted an antenna set using simplified 3D models of its components, considering their material and thermal properties. The sequential analysis process facilitated the calculation of branched flow rates, providing insights into the individual TRA. This approach also allowed us to design a cooling system for the TRA set, assessing its thermal stability in high-temperature environments. To ensure the optimal performance of TRA, breaking down the analysis into stages based on the cooling system's structure can assist operators in predicting numerical results more effectively.

Key Words : Multi-Function Radar(다기능 레이더), TRA(송수신조립체), Large Planar Antenna(대면적 안테나), AESA(능동위상배열), Multi Cooling Channel(다중 냉각 유로)

1. 서론

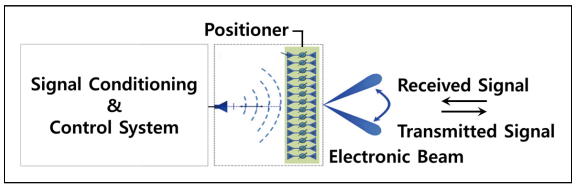
외부 위협에 효과적으로 대응하기 위하여 방어력 확

* Corresponding author, E-mail: iyr326@hanwha.com

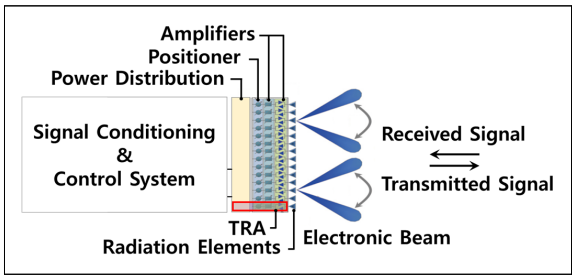
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

장용 기술이 활발히 개발되는 가운데, 국방부 중장기 계획에 따르면 대한민국은 방위력 개선을 최우선으로 하여 한국형 3축 체계 강화를 필두로 군사력을 보강하고 있다. 한국형 3축 체계는 킬체인, 한국형 미사일 방어, 대량 응징 보복으로 탐지, 지휘통제, 요격을 모두 아우르고 있다. 이 중 감시 및 탐지는 방어체계가 가동되는 단계에서 가장 처음 필요한 과정이며, 적아를 식별하여 목표물을 결정하고 그 위치를 추적함으로써 위협을 억제할 수 있는 개념이다. 다기능 레이더(MFR, Multi-Function Radar)가 도입되면서 적아식별, 미사일 유도 등의 일련의 감시 및 판단과 관련된 추가적인 기능을 모두 수행하는 특징이 있다.

Fig. 1과 같이 초기에 적용된 수동 위상배열 레이더는 단순 기계식 안테나로, 송수신 장치간 연동 한계를 극복하고자 반도체 기술이 도입된 능동 위상배열 레이더^[1]가 개발되었다. 개별 송수신 모듈 구동이 가능해진 AESA(Active Electronically Scanned Array)는 대용량의 신호와 데이터를 이용하여 빠르게 연산을 처리하는 장점이 있지만, 그 과정 중 상당히 많은 열이 발생한다. 이렇게 발생한 열은 각 소자에 열저항을 증가시켜 성능을 약화시키고, 결국 전체 시스템의 성능 저하로 이어진다.



(a) Passive electronically scanned array RADAR



(b) Active electronically scanned array RADAR

Fig. 1. PESA & AESA RADAR

이렇게 레이더 체계에서는 안테나 영역에서 발생하는 열을 효과적으로 방출시키기 위하여 냉각수를 흘려

순환시키는 수랭 냉각 방식을 사용한다. Jung^[2]은 수랭 방식의 안테나 TRM 냉각판 유로 형태에 따른 열성능을 연구하였고, Kim^[3], Lee^[4]은 공랭 방식의 AESA 레이더의 열 성능을 수치적으로 분석하였다. Park^[5]은 AESA레이더 냉각 특성 분석을, Gang^[6]은 천공 다기능 레이더에 대하여 소개하였다.

현재까지는 전투기 장착용 레이더의 냉각 방식에 대한 연구가 중심으로 이루어졌다. 이와 다른 갈래로 본 논문을 통해 고온 환경 지상용 레이더의 냉각 방식에 대한 냉각 설계 방식을 제안함으로써 고온 운용 환경에 따른 안테나 냉각 조건 및 효과를 예측한다.

열해석 과정 중 벽을 기준으로 서로 다른 유동이 존재할 때 벽면 근처의 난류 유동을 구체화하여 해석의 정확성을 개선한다. Jones^[7]는 난류 유동을 운동에너지, 에너지 소산율을 이용하여 국소 난류의 운동을 정의하였고, Bardina^[8]는 난류 모델을 $k-\epsilon$ Two-Equation Model, $k-\omega$ Two-Equation Model, SST Two-Equation Model, One-Equation Model 등을 실험적 결과로 각 난류 모델을 정리하였다. Kuznetsov^[9]는 복합재의 다공성 배관의 표면 거칠기에 따른 난류 모델에 대하여 Two-Layer $k-\epsilon$ Model을 이용한 수치해석 하였다.

지상용 대면적 안테나는 구성품의 종류와 개수가 다양한 집합체이고, 냉각 유체가 흐르는 유로의 길이와 단면적 크기가 경로마다 상이하기 때문에 보다 정교한 열성능 예측을 위하여 분석 및 해석을 단계화할 필요가 있다. 이를 위해 실전 배치가 예정된 고온 건조한 사막 운용 환경을 경계조건에 부여하여 전체 유동 분석 과정을 거쳐 분기 유동 조건을 획득하고, 이를 발열체 집합에 적용하여 안테나 내부에 적용된 냉각 시스템에 대한 열성능을 분석할 수 있다. 이러한 복합열전달 상황에서 CFD해석^[10,11](Computational Fluid Dynamics)을 이용하여 수랭 방식의 냉각 효과를 분석하였다.

2. 연구 방법

레이더가 높은 대기 온도 조건에서 운용될 때 각 소자에서 방출되는 발열량과 주변 환경을 함께 고려하여 열부하로 인한 제품 성능 저하를 최소화해야 한다. 이번 연구를 통하여 필수적으로 배치되어야 하는 RF (Radio Frequency) 송수신장치를 포함한 TRA(Transmit-Reflect Array)를 중심으로 그 주변을 지나가는 냉각

배관의 냉각 효과 및 안테나장치 내부 온도를 예측하여 효율적으로 운용할 수 있다.

2.1 해석모델 (Geometry)

Fig. 2와 같이 안테나장치 내부의 주배관은 안테나 장치의 좌, 우측 최외각에 위치한다. 냉각장치에서 주배관(Main pipes)을 통하여 냉각수를 공급받아 분기배관(Branch Pipes)을 통하여 열교환기로 분기된다. Fig. 3과 같이 동시에 주배관에서 나온 냉각수가 유연배관(Flexible pipes)을 통해 각 TRA에 도달하여 TRA 내부에 배열된 소자들이 가열된 상태에서 냉각수로 열을 방출하게 되고, 열을 흡수하여 온도가 높아진 냉각수는 회수 배관으로 흘러나간다. 이렇게 사이클이 반복되어 열적 성능을 유지하는 방식으로 운용된다.

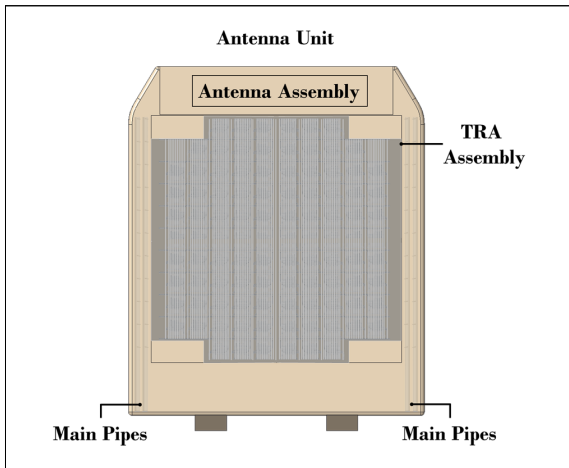


Fig. 2. Symmetric model of antenna unit

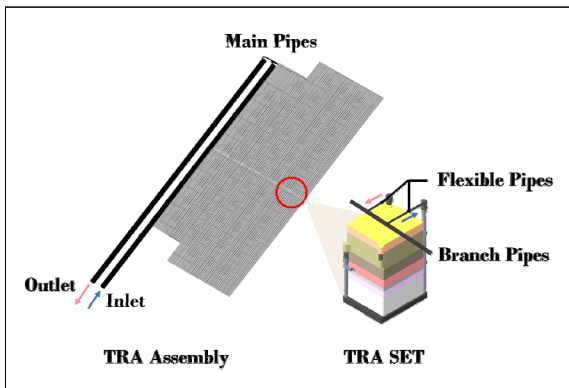


Fig. 3. A set of TRA with multi-layered PCBs

TRA 한 세트에는 RF 송수신장치, 전원공급부 등이 탑재되고 각 TRA를 냉각하는 냉각 유로 형상은 Fig. 4와 같다. 특히 반도체 소자인 HPA(High Power Amplifier)를 중심으로 개별 모듈에 조립되는 소자에서 상당한 열이 발생하게 된다. 또한 이 소자들이 조립되어있는 PCB기판은 절연 및 신호 분리를 위하여 마이크로미터(μm) 단위의 여러 개의 층으로 적층되었다. 여러 층의 PCB기판의 집합체로 볼 수 있는 TRA를 지나는 냉각관이 존재하며 그 내부의 냉각수가 TRA에서 발생하는 열을 흡수하게 된다.

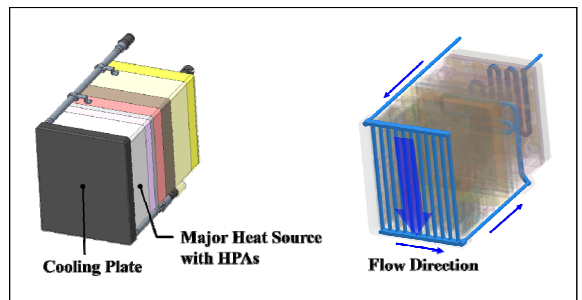
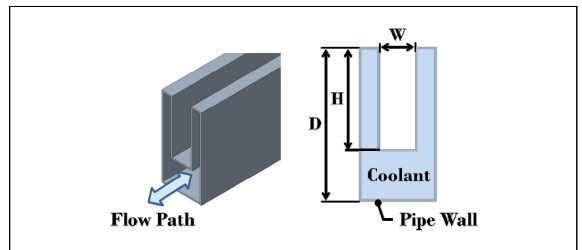
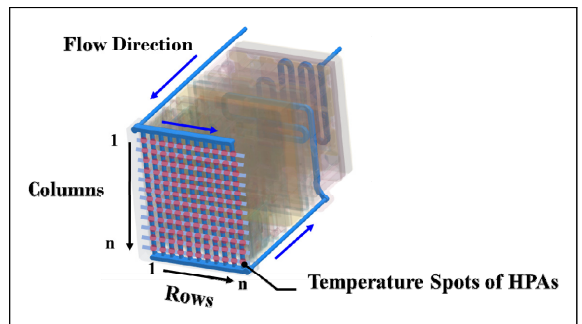


Fig. 4. Cooling pipes across a set of TRA



(a) Section shape of cooling plate's single channel



(b) Channels inside cooling plate

Fig. 5. Inner structure & section of TRA cooling pipe

효과적인 방열을 위하여 냉각관 내부에는 Fin 구조의 유로가 존재한다. 이는 냉각관 내부의 균일한 유동을 위하여 설계에 적용한 것이다. 이때 Fin의 유무, Fin의 높이(H), Fin 사이 간격(W), 냉각관 내부 높이(D)를 변수로 두고 동일한 입구 압력을 가했을 때 냉각관 내부의 분기된 채널간 유량 편차를 계산하여 비교하였다. 그 결과 Fin 사이 간격인 W와 Fin의 높이인 H의 중형비가 1:3인 경우 최적인 점을 본 모델에 적용하였고 그 형상은 Fig. 5와 같다.

Table 1. Material properties

Properties	EGW*	PCB	
		Copper	FR4
T [°C]	25	-	-
ρ [kg/m ³]	1,063	8,930	1,900
k [W/m·K]	0.4088	398	0.29
Cp [J/kg·K]	3,482	386	0.00084
ν [Pa·s]	0.003	-	-

*EGW: Etylene Glycol Water

안테나 장치의 중심을 기준으로 좌/우는 대칭이기 때문에 1/2 모델로 고려했으며, 냉각 유로의 형상이 TRA의 열 성능에 미치는 영향도 반영하기 위해 개별 TRA를 통과하는 유로를 실제와 같은 배치로 구현하였다. 실제 구동과 유사한 조건을 모사하기 위하여 TRA 내부의 각 모듈에 위치한 HPA를 중심으로 발열 소자들을 배치하여 발열량을 인가하였다. 또한 사막과 같은 극한 고온 상황을 반영하기 위하여 태양 복사 및 외부 공기에 의한 대류 조건을 고려하여 복합열전달(Conjugate heat transfer) 시스템을 구현하였다. 구조물에는 실제 적용된 재료의 물성을 적용하였고 상용 수치해석 프로그램인 STAR-CCM+ 17.0을 사용하였다. 여기서 냉각수 물성치는 Table 1과 같은데, 온도와 농도에 따라 물성치가 달라지는 EGW(Etylene Glycol Water)는 초기온도 25 °C일 때의 값으로 선정하였다. 냉각 배관은 하나의 벽면이므로 벽 근처의 층(layer)의

정교한 분석을 하기 위하여 난류의 에너지, 소멸속도, Prandtl수를 고려하는 K-Epsilon Two-Layer 모델^[12]을 적용하였고, 해의 수렴은(Turbulence intermittency) 10⁻⁴를 만족하도록 하였다.

TRA 집합체가 대면적을 형성하고, 이 집합체는 한대의 안테나장비로 취급되며, 보다 정교하게 성능을 분석하기 위하여 2개의 단계적인 해석 과정을 거친다. 그 첫 번째 단계로 안테나장치의 전반에 걸쳐 배치되어 있는 냉각배관의 유량과 압력손실을 예측하는 과정이 필요하다. 다음으로 한 세트의 TRA에 대한 열해석을 수행하여 유량이 최저, 최고일 때 온도를 분석한다. 이번 연구에서는 이 두 가지 단계를 거쳐 안테나장치 내부 구성품의 열적 성능을 분석하여 전체형상(Full model)에 적용하는 것이 타당한지 검증한다.

2.2 해석 단계 1: 배관 내부 유동, 압력손실 분석

첫 번째 분석은 냉각배관의 유동 및 압력손실을 분석하기 위한 단계이다. 형상이 같은 TRA 그룹이 육각형을 그리며 배치되어 있으며 계산의 복잡성 및 불필요한 해석 시간 소모를 방지하기 위하여 TRA 형상을 단순화했다. 안테나장치 전반에 걸쳐 흐르는 냉각수의 열 성능에 초점을 맞춰 분석해야 하므로 TRA 내부에 있는 상세 구성품 하나씩 구현하는 것보다 한 세트의 TRA 압력손실을 단순화하는 것이 효과적이다.

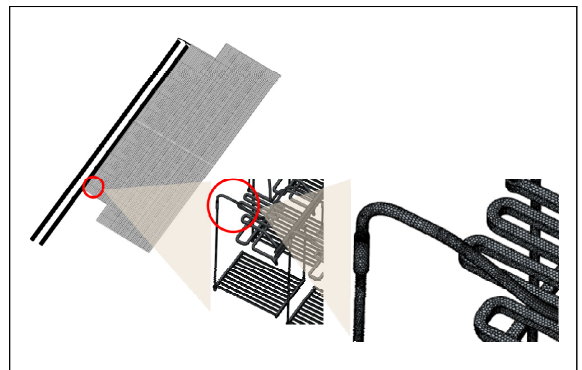


Fig. 6. Analysis model of the multi-function radar antenna: mesh shapes of pipes over TRA assemblies

실제 적용되는 냉각 배관과 안테나장치 구조물을 모두 모델에 반영하였고, Fig. 6과 같이 약 1천4백만 개의 3D hexahedron mesh를 생성하였다. 냉각 유체는

EGW로 선정하였고, 주배관을 통하여 인입되는 냉각수의 입구유량은 초기 설계된 냉각장치 사양에 따라 250 LPM, 초기온도 25 °C, 대기온도 63 °C로 설정한 것을 Table 2에 정리하였다. 분기배관으로 인입되는 냉각수의 입구 유량은 냉각장치 사양에 따른 각 분기배관당 산출된 유량을 적용하였다. 냉각 배관은 Steel 계열의 물성을 적용하였다.

Table 2. Boundary conditions

Boundary condition (1/2 symmetry model)	
Initial temperature	25 °C
Environment temperature	63 °C
Inlet flow rate	250 LPM
Number of total mesh	약 1천 4백만개

주배관과 분기배관은 KS규격에 따라 공급 압력(20 kPa 수준), 유량(250 LPM)을 가용할 수 있는 크기로 선정하였다. 이를 토대로 TRA를 냉각하는 분기 배관의 기준 입/출구의 유량 편차와 압력 편차를 구하였고, 최대 유량의 차이가 5 % 이하인 경우, 입/출력부 압력손실 비교시 4 bar 이하인 경우 두 가지 조건을 모두 충족했을 시 최적 성능에 도달했다고 판단하고 그 결과를 도출하였다.

2.3 해석 단계2: TRA 냉각유로 단품 분석

안테나장치의 열적 성능을 분석하기 위한 두 번째 단계로 TRA 한 세트에 대한 열해석을 수행하여 TRA 세트에 분기되어 흐르는 냉각수의 유입조건이 타당한지 검토하는 단계이다. 앞선 2.2의 결과를 이용하여 한 세트의 TRA 냉각유로에 분기되는 유량을 부여했다. TRA 구성 모듈의 발열량을 HPA소자를 중심으로 장착 위치에 맞춰 모사했다. 또한 각 TRA를 관통하는 냉각 유로에 Fin 형상을 반영했다. 이는 일반적인 Fin의 방열성능을 이용하는 것보다 유로의 단면 형상이 유동 균일도에 영향을 미치는 점을 이용한 것이다.

앞의 경우와 마찬가지로 냉각수 입/출력부의 유량 차이와 압력손실을 비교하였다. 해석을 수행하는 과정에서 기준에 적합한 결과에 도달하지 못했다고 판단될 때 냉각수의 공급/회수 조건을 수정하여 반복적으로 계산하였고, 마침내 목표 성능에 도달했을 시 이를 최적화된 냉각 성능으로 판단하였다.

3. 결 과

안테나장치 내부의 열부하로 인한 성능 저하를 최소화하기 위하여 수랭방식을 도입하였고, 이에 대한 열성능 개선여부를 관찰하기 위하여 구성품에 대하여 단계적으로 분석하였다.

우선 Fig. 7과 같이 냉각수가 공급/회수되는 주 냉각배관에 대한 유동 및 압력손실을 분석하였다. 냉각수 회수 압력과 공급 압력의 차는 약 3.5 bar로 계산되었다. 각 TRA를 관통하는 유로의 압력손실은 각 배관의 직경 차이로 인해 발생한다. 주배관에서 분기되어 설치된 TRA 냉각배관은 직경이 주배관에 비하여 약 1/6 작고, 배관 휘어짐이 많아 열저항이 크게 유발되는 것이다. 1/2 대칭 모델임을 고려하고 2배의 입구 유량으로 환산하여 실제 모델을 예측할 수 있다. 즉 계산 결과가 선형적이므로 전체형상으로 분석을 확장해 본다면 1/2모델과 같은 양상을 보일 것이다.

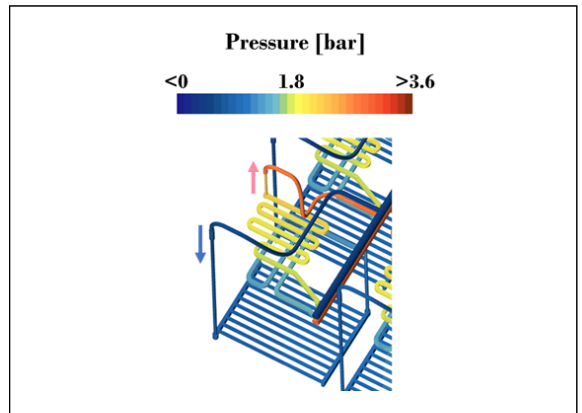


Fig. 7. Pressure loss of a group of TRA

TRA를 가로지르는 냉각 유로의 특성을 분석하면, 전체적으로 균일한 유량이 분포하는 가운데 첫 번째와 마지막 행에 위치한 TRA의 냉각 유로에서 유동 편차가 상대적으로 높다. 최대 유량은 TRA Assembly의 정면을 기준으로 최하단 왼쪽에 있는 위치에서 발생하고 최소 유량은 상단 세 번째 행의 첫 번째 유로에서 발생한다. 주배관에서 분기된 유로를 통해 냉각수가 공급될 때 각 TRA로 한 번 더 분기되는 구조에서 한 행에 TRA 세트의 개수가 많을수록 압력 손실이 커지기 때문에 이러한 최대, 최소 유량이 발생하는 것으로 분석할 수 있다.

Fig. 8은 개별 TRA의 냉각 유량 편차를 나타내는데, 계산값의 평균치인 5 LPM을 기준으로 최대, 최소 유량은 평균 유량의 각 약 2.4 %인 5.9 LPM, 1.9 %인 4.7 LPM에 해당한다. 이 정도의 차이는 위치별로 유량

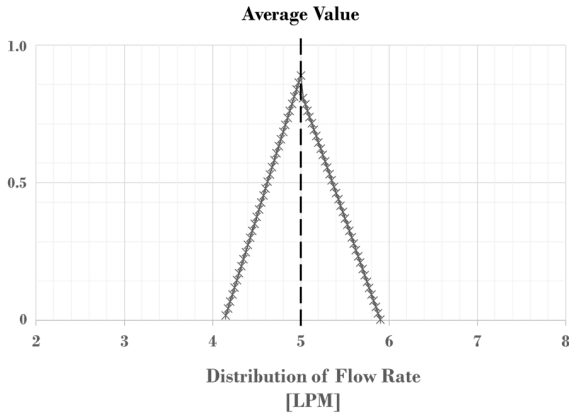
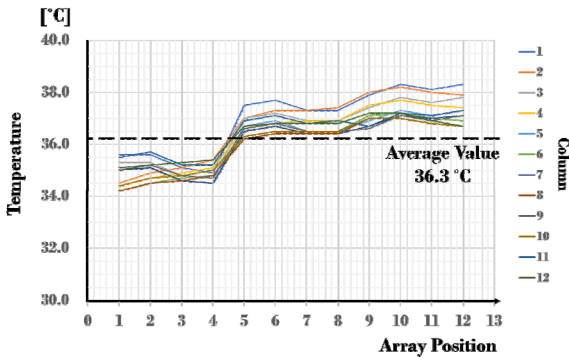
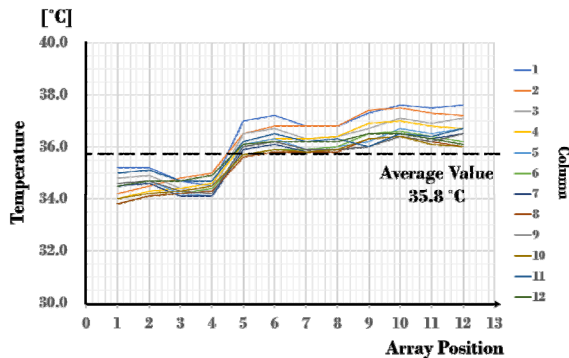


Fig. 8. Normal distribution of separated flow path



(a) Temperature distribution under 4.7 LPM

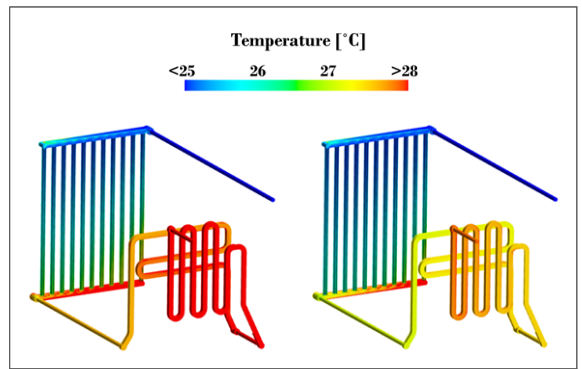


(b) Temperature distribution under 5.9 LPM

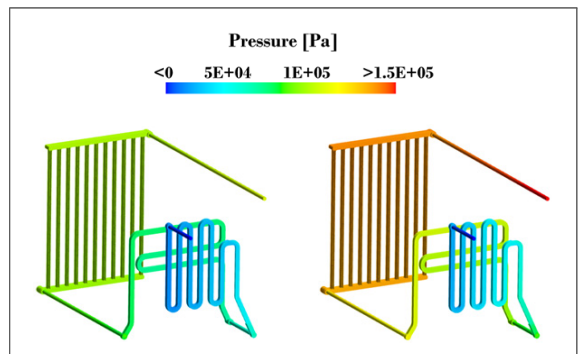
Fig. 9. Temperatures for modules in a set of TRA

의 차이가 유의미하지 않다고 사료되는 값이며, 유량이 오차범위 내에서 고르게 분포함을 간주할 수 있다.

두 번째로 개별 TRA세트의 열 성능을 분석했다. TRA세트를 냉각하기 위한 냉각수는 주배관에서 각 행으로 분기된 배관을 통하여 공급되고, 그곳에서 다시 한번 분기되어 각 TRA를 관통하여 흐른다. 관통하여 열을 흡수한 냉각수는 회수배관으로 흐르게 되어 순환이 되는 구조이다. 이때 TRA 구성품 모듈 내에 HPA 소자를 중심으로 발열체를 모사하였고 온도 분포를 확인하였다. Fig. 9와 같이 최소량인 4.7 LPM과 최대량인 5.9 LPM 일 때 발열 온도 평균 약 1.3 %의 차이를 보여 해당 범위에서 발열체 냉각에는 영향을 미치지 않음을 확인하였다. 이 결과를 종합하여 한 세트의 TRA 냉각유로에 대한 열해석을 수행했고, 첫 번째 단계에서 획득한 채널당 최대/최소값을 적용하였다.



Temperature distribution
(a) 4.7 LPM (b) 5.9 LPM



Pressure distribution
(c) 4.7 LPM (d) 5.9 LPM

Fig. 10. Temperature & pressure characteristics

그 결과 유량이 4.7 LPM일 때 개별 TRA 냉각배관의 최고 출구 온도는 34.0 °C이며 5.9 LPM일 때에는 각 28.0 °C를 보였다. 이는 Fig. 10-a과 Fig. 10-b에서 확인 가능하다. 유량이 많을수록 냉각 효과가 더 좋은 결과를 보였는데 이는 유량이 많을 때 냉각수가 단위 시간당 흡수하는 열의 양이 많기 때문이다.

이어서 Fig. 10-c, d와 같이 공급유량이 증가할 때 입, 출구 압력 차가 커지는 양상을 보인다. 같은 단면 형상의 유로에서 마찰계수가 동일하다는 가정하에 Darcy Equation에 따라 유속이 빠를수록 압력손실이 증가 하기 때문이다. 하지만 두 유량 조건 4.7 LPM과 5.9 LPM 사이의 범위에서 개별 TRA에서의 압력손실량은 단계1의 전체 모델 해석에서 계산되었던 전체 압력손실의 약 0.3배, 0.4배 수준이며, 안테나 내부의 전체 TRA조립체에 적용되고 비례 특성은 변하지 않기 때문에 개별 TRA에 인가되는 유량 변화에 따라 전체적인 열성능에 압력손실은 유효한 영향을 주지 않는다. 따라서 개별 TRA에 4.7 LPM과 5.9 LPM 범위의 유량이 가해졌을 때 압력손실에 의한 효과보다 온도에 미칠 미세한 영향을 고려할 필요가 있다.

4. 결론

지상용 대면적 다기능 레이다가 고온 조건에서 운용될 때 열부하로 인한 제품 성능 저하를 최소화해야 한다. 핵심 구성품인 TRA를 냉각하는 냉각관 및 유로의 효과를 예측하여 효율적인 장비 설계 및 운용을 함에 목적이 있다.

우선 냉각수가 주배관을 통해 공급/회수될 때 안테나장치 내부 발열 및 주변의 극한 환경 조건에서 압력손실 및 유동 변화 값을 계산했다. 특정 목표 유량을 가했을 때 압력손실은 각 TRA 냉각유로의 공급부와 회수부 끝단 값을 비교하였고 그 결과 안테나 성능에 영향이 미미할 것으로 예측되었다. 또한 분기 공급 배관에서 나온 냉각수가 관을 통해 흐르는 유량 정도를 분석한 결과 전체적으로 고른 분배가 됨을 확인할 수 있었다. 이로써 유동 안테나장치를 냉각하는 전체 유로 및 인가조건에 대한 설계적 타당성을 확보하였다.

다음 과정으로 개별 TRA 열성능 분석을 수행했다. TRA는 RF 송수신장치를 포함한 여러개의 모듈로 구성되어 있으며, 각 모듈은 HPA와 같은 고발열체가 장

착되어있다. 두 가지 다른 유량을 적용하여 각 조건에서 최대/최소 유량을 도출한 결과 유량이 많을 때 냉각수가 더 많은 열을 흡수하므로 열성능 개선에 유리하지만 운용 측면에서 치명적이지 않을 것으로 사료된다. 설계된 분기 유로 사이즈와 인가 유량은 고온 환경 조건에서 안테나 운용에 방해되지 않는 수준이다.

이 결과를 통해 대면적 레이다의 고온 환경 운용이 안정적인 것을 기대할 수 있다. 또한 환경적, 구성적 복잡성을 단순화하고 단계적 해석을 도입하면서 해석 및 분석적 연구의 효율성을 높였고, 나아가 시험적 검증을 통해 예측 과정을 검증한 것이 유의미하다.

향후 종합적인 결과를 활용하여 배치 운용시 기능적 위험성을 미리 제거할 수 있어야 하며, 완성된 제품을 성능 시험하여 극한 고온 배치 환경에서 발생할 수 있는 온도 변수를 반영할 필요가 있다.

References

- [1] GwangYong Jeong, "Long Range Multifunction Radar Technology Trends and Development Directions for Engagement," The Proceedings of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 25, No. 2, pp. 21-29, 2014.
- [2] Changhoon Jung, Wonhee Lee, Sungwook Kang and Kiwan Kim, "Analysis of Cooling Performance of AESA(Active Electronically Scanned Array) Radar Antenna System," The Proceedings of the KSME Fall Conference, pp. 1,673-1677, 2011.
- [3] Jiyong Kim, Gimin Park, Honggu Kwon, Dong-Jun Sin, Hyesun Han, BeomJin Jeon, Jong-Hak Lee and Woochul Kim, "Numerical Analysis of Air cooling for Transmit/Receive Modules of Active Electronically Scanned Array Radar," Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, Vol. 46, No. 11, pp. 593-601, 2022.
- [4] Seung-Chul Lee, Won-Yong Jeong, Chang-In Park, Min-Jae Kwon, "A study on the effect following PAO leakage in High Power Transmission system, Multi Functional Radar," Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 22, No. 8, pp. 67-73, 2021.
- [5] Dong-Myung Park, "Study on the Optimization of Cooling System in an Active Radar," KSAS 2016

- Fall Conference, pp. 62-63, 2016.
- [6] Seo-Ri Gang, Jeong-Yong Park, Gwang-Yong Jeong, "Introducing the Korean first 3-dimensional AESA Radar - "CHEON-GUNG" Multi-Function Radar," The Proceeding of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 28, No. 2, pp. 20-22, 2017.
- [7] W. P. Jones, B. E. Launder, "The Prediction of Laminarization with a Two-Equation Model of Turbulence," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 15, pp. 301-314, 1972.
- [8] J. E. Bardina, P. G. Huang, T. J. Coakely, "Turbulence Modeling Validation, Testing, and Development," Armes Research Center of NASA, 1997.
- [9] A. V. Kuznetsov, "Numerical modeling of turbulent flow in a composite porous/fluid duct utilizing a two-layer k- ϵ model to account for interface roughness," International Journal of Thermal Sciences, Vol. 43, Issue 11, pp. 1047-1056, 2004.
- [10] Mina Koo, "Computational Analysis of Gas-Liquid Flow and Conjugate Heat Transfer around a Flush Type Air Data Probe," 2022.
- [11] Jong Soo Kim, "Numerical Study on the Heat Transfer in an Electric Motor with Oil-Water Cooling to Achieve an Enhanced Cooling Performance," 2019.
- [12] Hogeon Kim, "Conjugate Heat Transfer Workshop of Simcenter STAR-CCM+," SIEMENS, 2023.