

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 46(8), 687-693(2018)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2018.46.8.687

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

능동형 안테나 시스템의 방열설계에 관한 연구

정용인*, 권민상**, 류준석***, 박동명***

A Study on the Thermal Design of the Active Antenna System

Yong-In Joung*, Min-Sang Kwon**, Jun-Suk Ryu*** and Dong-Myung Park***

Hanwha Systems*, Agency of Defense Development**

ABSTRACT

In this paper, we studied on the thermal design of the active antenna system for stable performance considering thermal reliability. The active antenna has high performance and heat flux elements in T/R modules. Thermal heating of elements in T/R modules has to be dissipated effectively and the antenna has to be operated over the range of suggested temperature by the thermal design. T/R modules of high heat flux in the active antenna can be dissipated effectively by liquid cooling. In this study, we studied on the thermal design including the liquid cooling system to optimize the thermal performance of the active antenna. And the thermal design was verified by numerical analysis.

초 록

본 연구는 능동형 안테나 시스템의 안정적인 임무수행을 위하여 열적 신뢰성을 고려한 방열설계에 관한 연구이다. 능동형 안테나는 송수신부에 고성능의 고발열 소자들이 존재한다. 안테나의 성능 유지를 위해서는 방열설계를 통해 고발열 소자들에서 발생하는 열을 효과적으로 제거하고, 적절한 온도범위에서 동작할 수 있도록 하여야 한다. 능동형 안테나의 송수신부는 고발열부로 액체냉각을 이용한 방열이 효과적이다. 본 연구에서는 능동형 안테나의 열적 성능을 만족하기 위하여 액체냉각 시스템을 포함한 방열설계를 수행하였으며, 이를 수치해석을 통해 분석, 검증하였다.

Key Words : Active Antenna System(능동형 안테나 시스템), Liquid Cooling System(액체냉각 시스템), Thermal Design(방열설계), Cold Plate(냉각판), Flow Rate Distribution(유량분배), Pressure Drop(압력손실)

1. 서 론

군사체계에 있어 안테나는 전장감시에서 표적 타격까지의 임무를 수행하는 육상, 해상, 항공 전력의 핵심 무기체계이다. 최근 무기체계용 안테나는 탐지거리의 향상, 정밀한 탐지 및 타격 등

의 고성능의 사양이 요구된다. 또한 반도체 기술의 발전과 함께 안테나 시스템도 고성능, 소형화되고 있다. 이러한 배경과 함께 최근의 안테나 기술은 기존의 수동 위상 배열 안테나(passive electrically scanned array Antenna)에서 능동형 위상 배열 안테나(active electrically scanned

† Received : October 23, 2017 Revised : June 25, 2018 Accepted : June 30, 2018

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

array Antenna)로 진화하고 있다. 능동형 위상배열 안테나는 반도체 기술을 이용하여 송수신모듈을 제작함으로써 수동 위상 배열 안테나에 비해 소형화할 수 있게 되었다.

안테나의 고성능, 소형화에 따라 단위 면적당 발열량은 더욱 증가하여 최근 이를 효과적으로 냉각하는 방열 기술에 대한 연구가 이루어지고 있다[1]. 능동형 안테나의 경우 고발열부의 효과적인 방열을 위해 액체냉각 방식이 주로 적용되고 있다[2-4]. 능동형 안테나는 다수의 송수신모듈이 바둑판처럼 배열되어 그 기능을 수행한다. 액체냉각 시스템은 고발열부인 각 송신 모듈에 적절한 온도의 냉각유체를 분배하고 이를 통해 안테나의 열적 성능을 고려한 방열을 수행한다[5]. 능동형 안테나의 원활한 임무수행을 위한 온도 요구 성능은 크게 세 가지로 구분된다. 첫째, 능동형 안테나의 주요소자 온도는 요구 온도 범위를 유지하여야 한다. 둘째, 주요소자의 최고온도와 최저온도의 차이는 요구 온도 차를 유지하여야 한다. 셋째, 바둑판처럼 배열된 각 송수신모듈의 주요소자 온도분포는 요구되는 온도분포를 나타내어야 한다. 능동형 안테나의 방열 시스템은 이러한 요구사항을 고려하여 설계되어야 한다.

Figure 1은 냉각판(Cold Plate)에 냉각유체를 순환하여 방열하는 능동형 안테나의 액체냉각 방열설계 순서도를 나타낸 그림이다.

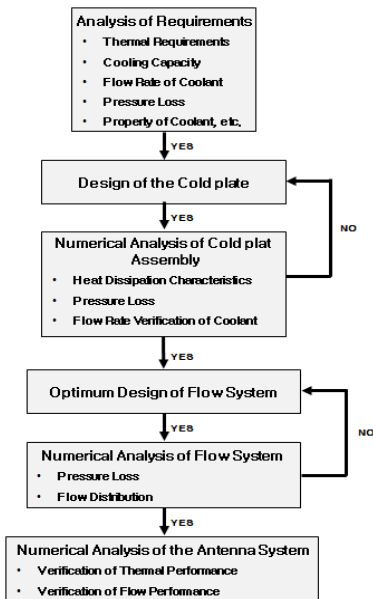


Fig. 1. Thermal Design Process of the Active Antenna System

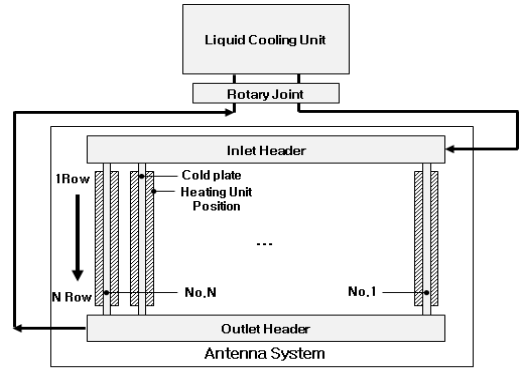


Fig. 2. Schematic of the Liquid Cooling System

액체냉각 방열설계의 경우 냉각유체의 온도, 유량 등의 물리적 특성에 따라 소자의 온도가 민감하게 반응하므로 개발하는 능동형 안테나의 정확한 열적 요구성능을 분석하여야 한다. 분석된 열적 요구성능을 바탕으로 액체냉각 방열 시스템의 주요 구성품인 냉각판을 포함한 냉각유체 유로 시스템을 설계하여야 한다. 또한 열유체 수치 해석을 통하여 시스템의 방열 특성을 분석하고 방열설계를 수행한다.

본 연구에서는 Fig. 1의 설계 과정을 통해 능동형 안테나의 방열설계를 수행하였다. 또한, 수치 해석을 통해 방열성능을 분석, 검증하였다.

II. 본 론

2.1 능동형 안테나의 방열 시스템

Figure 2는 능동형 안테나의 방열 시스템에 대한 기본 설계 개념도이다. 냉각장치(Liquid Cooling Unit)로부터 냉각된 냉각유체 EGW(EGW, Ethylene Glycol and Water)는 유로 시스템을 통해 안테나 시스템으로 유입되고 고발열 구성품이 장착되어 있는 각 냉각판으로 적절히 분기되어 열을 회수하게 된다. 열을 회수한 냉각유체는 유로 시스템을 통해 냉각장치로 다시 회수되어 냉각된다. 능동형 안테나의 방열 시스템은 이와 같은 과정을 반복함으로써 방열 기능을 수행하게 된다.

2.2 설계 목표

능동형 안테나 시스템의 성능을 보장하기 위한 열적 요구사항을 Table 1에 나타내었다. 능동형 안테나의 방열 시스템은 요구사항을 만족할 수 있도록 설계되어야 한다.

Table 1. Thermal Requirements of The Antenna System

	Requirements	Remarks
Max. Temp.	$< T^{\circ}\text{C}$	Max. Temp. of Chips
ΔT	$< \Delta T^{\circ}\text{C}$	Max. Temp. - Min. Temp
Temperature distribution Shape	Negative Parabola	

2.3 냉각판 형상 설계

냉각판과 발열체로 구성된 냉각판 조립체의 열적 특성은 3차원 상용 전산 유체 해석 코드인 FLOW-3D v11을 사용하여 해석을 수행하였다.

Figure 3은 발열원인 소자를 포함한 냉각판 조립체의 구성을 나타낸 그림이다. 주요 발열소자의 열은 알루미늄으로 구성된 모듈 하우징 및 냉각판을 통한 전도로 방열된다. 냉각판에 전도된 열은 냉각판 내부를 흐르는 냉각유체에 의해 회수된다. 각 전도 경로에 대한 열저항은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_{sys} = \theta_{a-b} + \theta_{b-c} + \theta_{c-d} \dots \quad (1)$$

$$\theta_{TIM} = \frac{L}{k_{TIM}A} \ll \theta_g = \frac{L}{h_g A} \quad (2)$$

전도 경로의 전체 열저항 θ_{sys} 은 동일한 물질로 구성된 전도 경로 구간의 각각의 열저항 합으로 정의할 수 있다. θ_{TIM} 은 Thermal Grease와 같은 열전달 물질(Thermal Interface Material) 구간의 열저항으로 열전도율 k_{TIM} , 접촉면적 A , 두께 L 로 정의된다. 냉각판과 모듈 하우징 사이의 접촉 열저항 θ_g 는 열전달계수 h_g 와 접촉면적, 두께로 정의된다. Thermal Grease 적용 부위의 열저항은 정밀한 면 가공 및 열전달 물질 적용으로 냉각판의 접촉 열저항에 비해 작은 열저항을

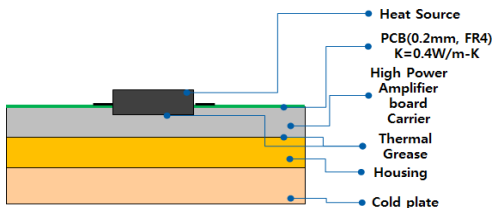
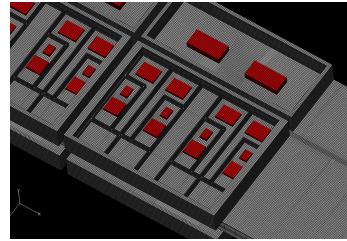
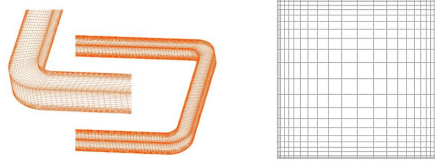


Fig. 3. Schematic of Heating Unit



(a) Heating Sources and Cold plate



(b) Flow Passage of a Cold plate

Fig. 4. The Mesh Distribution for Thermal Analysis of a Cold Plate Assembly

가질 것으로 추측할 수 있다. 따라서 정확한 열해석을 위해서 냉각판의 접촉 열저항을 도출하여야 한다. 접촉 열저항은 표면의 거칠기, 접촉 압력에 의해 결정되기 때문에 수치적으로 예측하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 실험으로 도출한 열저항 값을 삽입하여 열해석을 수행하였다.

Figure 4는 냉각판 조립체 전산 유체 해석 모델의 격자를 나타낸 그림이다. Fig. 5는 해석에 필요한 적절한 격자수를 확인하기 위해 격자수에 따른 최고온도 변화를 나타낸 결과이다. 약 700만 개 이상의 격자수에서 수렴된 결과를 확인할 수 있었다. 검증된 수준의 격자를 냉각판 조립체 및 능동형 안테나 시스템 열해석에 적용하였다. 본 해석에는 약 800만개의 Hexagonal 정렬격자를 사용하였다. Fig. 6은 경계조건을 나타낸 그림이다. 전산 유체 해석은 정상 해석을 수행하였고, 난류모델은 $k-\epsilon$ 모델을 사용하여 계산하였다. $k-\epsilon$ 난류모델은 상업적인 열전달 해석분야에서

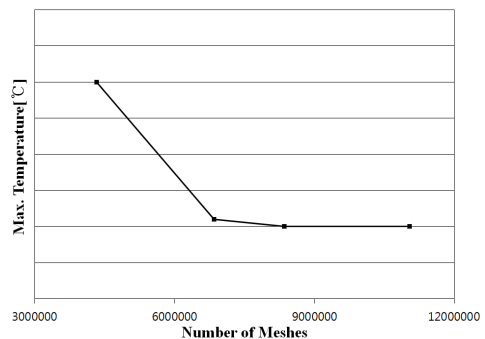


Fig. 5. Mesh convergence test

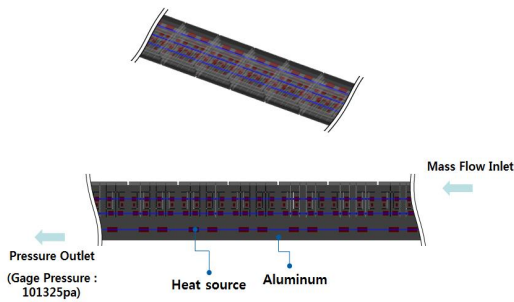


Fig. 6. Computational Domain and Boundary Conditions

비교적 정확한 해석결과와 빠른 계승 속도로 광범위하게 사용되고 있다. 본 연구에서는 넓은 3차원 해석 도메인에서 비교적 정확한 해석 결과 및 다양한 케이스 해석, 우수한 수렴성에 적합한 난류모델을 선정하여 해석을 수행하였다.

냉각판의 형상은 설계 요구조건 및 제작성 등을 고려하여 기본 설계를 수행하였으며 해석을 통하여 유로 형상을 확정하였다. Table 2는 해석에 사용된 유로 형상을 나타낸 표이다. 유로 형상 외 나머지 경계조건은 동일하게 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 2열, 3열 분기유로, S형 단일유로 형상을 검토하였으며, 또한 설계 조건에 따른 냉각유체 종류 및 유로 이동에 대한 영향을 검토하였다.

Table 2. Pressure Loss Ratio of Liquid Cooling System

		Pressure Loss Ratio(%)
Case1	2Row	
Case2	3Row	
Case3	S	
Case4	2Row, +15mm	
Case5	2Row, -15mm	

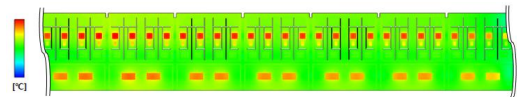


Fig. 7. Surface Temperature Contour of a Cold Plate Assembly

Figure 7은 하우징 및 발열소자의 온도 분포를 나타낸 그림이다. Figs. 8, 9, 10은 냉각판의 형상에 따른 주요 소자의 최고온도, 최고온도와 최저온도의 차, 냉각판 유로의 압력손실을 나타낸 그림이다. 방열성능은 S형 유로가 가장 우수하였다. 하지만 단일 유로로 형성된 S형 유로의 압력손실이 가장 크다. 냉각유체는 비열이 높은 EGW가 PAO(Poly Alpha Olefin)보다 우수한 방열 성능을 나타내었으며, 15mm 이내 유로의 이동에 대한 방열성능의 차이는 크지 않았다. 해석된 결과를 바탕으로 Case 3의 유로 형상을 선정하였다.

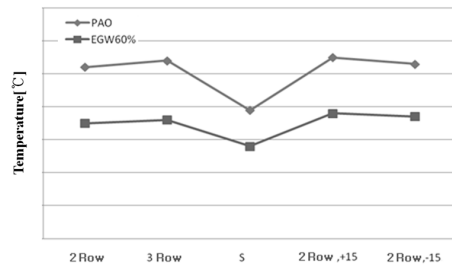


Fig. 8. Max. Temperature of Heat Sources

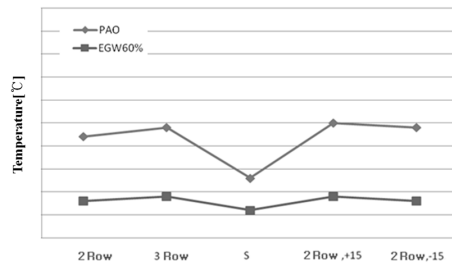


Fig. 9. Temperature Difference of Heat Sources ($T_{max} - T_{min}$)

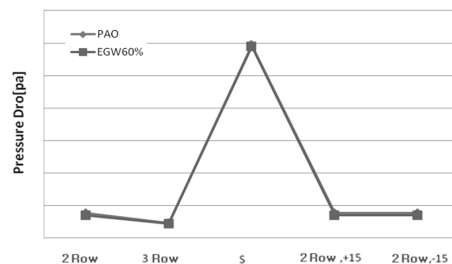


Fig. 10. Pressure Loss of Cold Plate

2.4 유로 시스템 최적화 설계

능동형 안테나 소자의 온도 및 온도분포는 안테나의 성능에 직접적인 영향을 주기 때문에, 각 냉각판으로 유량분배가 중요하다. 유량 분배해석을 위한 각 냉각판의 유동저항은 3차원 전산유체역학으로 해석하고 유로 시스템 해석에는 1차원 해석을 적용하였다. 1차원 해석은 상용 전산 유체 해석 코드인 FLOW MASTER v8을 사용하여 해석을 수행하였다. Fig. 11은 액체냉각 시스템의 유동해석을 위한 1차원 해석 모델이다. 1차원 해석 모델의 냉각판 유동저항은 3차원 해석 결과를 적용하여 해석을 수행하였다.

각 냉각판에 유입되는 냉각유체의 양은 냉각판의 입구와 출구의 압력에 의해 결정된다. 이러한 특성을 고려하여 유량을 균일하게 분배하는 방법은 헤더의 단면적을 조절하는 방법과 오리피스 사용으로 각 분기 배관의 단면적을 조절하는 방법이 있다. 본 연구에서는 설계조건 및 정비용을 고려하여 헤더의 단면적을 조절하는 방법을 선택하였으며, 최적화된 헤더의 크기를 설계에 반영하였다.

헤더의 형상을 결정하기 위한 목적함수는 (3)과 같다. 설계 인자는 식 (4), (5), (6), (7)과 같으며, 유입/회수 헤더 각각의 중심부를 기준으로 설계 범위 내에서 크기를 변경하도록 하였다.

Minimize

$$Object = \Phi = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2}{N}} \quad (3)$$

Subject to

$$0.8D \leq x_{i,let} \leq 1.6D \quad (4)$$

$$0.8D \leq y_{i,let} \leq 1.6D \quad (5)$$

$$0.8D \leq x_{i,outlet} \leq 1.6D \quad (6)$$

$$0.8D \leq y_{i,outlet} \leq 1.6D \quad (7)$$

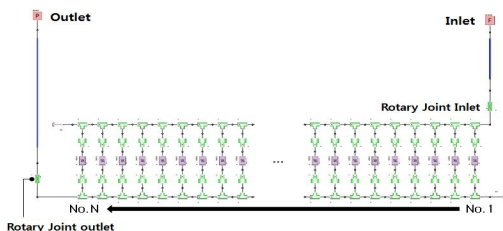


Fig. 11. Liquid Cooling System 1-D Model

Table 3. The Geometric Size of Simulation Cases

	Header Diameter		Header Shape
	Basic Design	Inlet Header	D
Outlet Header		D	
Case1	Inlet Header	1.6D	
	Outlet Header	D	
Case2	Inlet Header	1.6D	
	Outlet Header	D	
Case3	Inlet Header	1.6D	
	Outlet Header	0.8D	

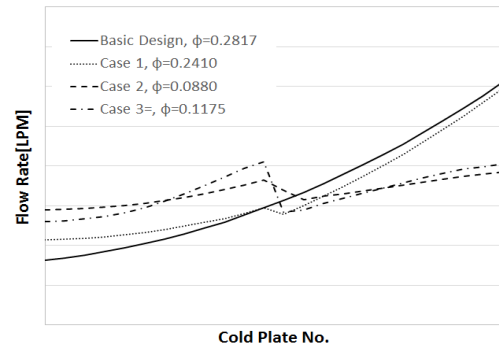


Fig. 12. Flow Rate of Cold plates

식 (3)에서 Φ 는 유량분배의 정도, Q_i 는 각 냉각판으로 분기되는 냉각수의 유량, \bar{Q} 는 총 유량에서 총 냉각판의 수 N 을 나눈 평균 유량을 나타낸다.

Table 3은 헤더의 최적화 과정에서 대표적인 해석 케이스를 나타낸 표이다. Fig. 12는 대표적인 해석 케이스에 대한 유량분포를 나타낸 그림이다. 유로 시스템의 최적화 전 냉각판의 유량은 냉각판의 순서에 따라 선형적으로 증가하였다. 이는 소자의 선형적인 온도분포를 의미하므로 안테나의 빔 방사각의 큰 오차를 유발할 수 있다. 따라서 헤더의 형상 변경으로 유량분배 최적화 및 유량의 선형적 증가 최소화가 필요하다. 본 해석 결과를 통해 헤더의 형상을 Case 2로 선정하였다.

2.5 능동형 안테나 시스템의 열 해석

Figures 13, 14는 능동형 안테나 시스템의 열 해석을 위한 전산 유체 해석 모델의 격자 및 경계조건을 나타낸 그림이다. 유로 시스템 최적화를 통해 도출된 유량 조건을 각 냉각판의 유입 유량으로 입력하여 시스템의 열적 성능을 확인하였다. 해석에 사용된 계산 격자는 Hexagonal 정렬격자를 사용하였다. 계산에 사용된 격자의 수는 약 5350만개이다.

Figure 15는 유로 시스템의 최적화 전 예비설계 단계에서 각 냉각판에 부착된 모듈의 주요 소자 온도를 나타낸 그림이다. 냉각판의 순서에 따라 주요 소자의 온도가 선형적으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 각 냉각판으로 분배되는 냉각유체의 유량이 선형적으로 감소하기 때문이다. 이러한 온도분포는 능동형 안테나의 빔 방사 각도에 큰 오차를 발생시킬 수 있다. Fig. 16은 유로 시스템의 최적화 설계 후 온도를 나타낸 그림이다. 각 냉각판으로 분배되는 냉각유체의 유량을 조정하여 온도의 선형적인 감소를 최소화하였다. 이는 빔 방사 각도의 오차를 최소화할 수 있는 결과이다.

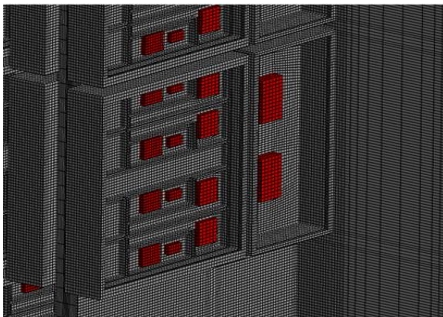


Fig. 13. The Mesh Distribution for Thermal Analysis of Antenna System

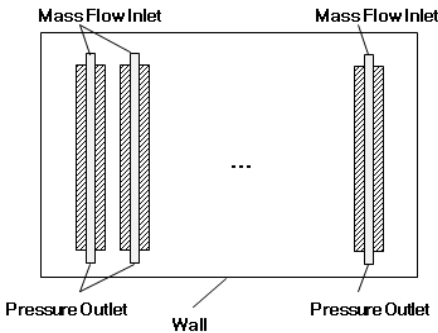


Fig. 14. Computational Domain and Boundary Conditions

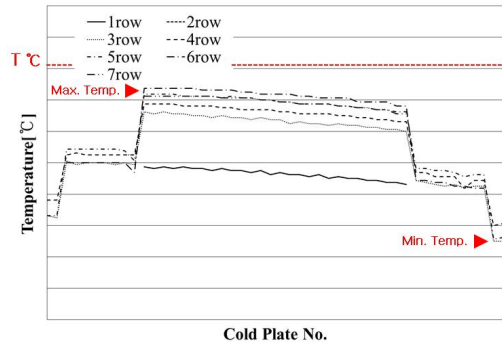


Fig. 15. Temperature of Major sources in the Preliminary Design

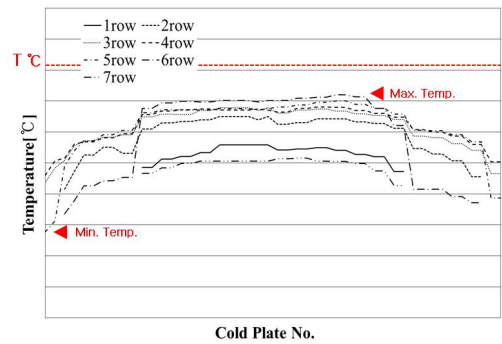


Fig. 16. Temperature of Major sources in the Optimization Design

Table 4. Thermal Performance of The Antenna System

	Require-ments	Initial Design	Final Design
Max. Temp.	< T °C	T-6.2 °C	T-9.8 °C
ΔT	< ΔT °C	ΔT-5.0 °C	ΔT-4.4 °C
Temperature distribution Shape	Negative Parabola	Linear Growth	Negative Parabola

또한, 각 소자의 온도는 능동형 안테나의 열적 요구조건을 만족함을 확인하였고, 최종설계를 통해 개선된 결과를 확인할 수 있었다. 능동형 안테나 시스템의 방열설계 결과를 Table 4에 나타내었다.

III. 결 론

본 연구에서는 능동형 안테나의 안정적인 임무 수행을 위하여 열적 신뢰성을 고려한 방열설계 및 해석을 수행하였다. 능동형 안테나의 열적 요

구조건을 분석하고 이를 설계에 반영하여 방열 시스템을 설계하였으며, 수치해석을 통해 열적 설계의 적합성 및 시스템의 열적 특성을 확인할 수 있었다. 또한, 능동형 안테나의 액체냉각 시스템에 대한 방열설계 방법론을 개념화 할 수 있었다. 본 연구를 통해 획득한 데이터는 능동형 안테나의 방열설계 및 열적 성능 예측/분석, 주요 구성품 선정을 위한 기초 자료로 이용될 것이다.

References

- 1) Park, D. M., Chae, J. H., Kim, Y. N., and Ahn, T. Y., "Performance Prediction and Systematic Review on the Liquid Cooling System(I)," *Proceeding of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Spring Conference*, April 2016, pp.1121~1124.
- 2) Rajendran, P., Ravindra, M. U., and Prasad, C., "Studies on effect of spreading resistance in design of variable heat flux with identical heatsink," *International Journal of Electronic Engineering Research*, Vol. 2, No. 3, 2010, pp.399~408.
- 3) Thermal Guidelines for Liquid Cooled Data Processing Environments, ASHRAE TC9.9 White Paper, AHRAE 2011.
- 4) Maddipati, U. R., Rajendran, P., and Laxminarayana, P., "Thermal design and analysis of cold plate with various proportions of ethyl glycol water solutions," *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, Vol. 2, No. 6, 2013, pp.22~25.
- 5) Choi, S. H., Shin S. H., and Cho, Y. I., "The effect of area ratio on the flow distribution in liquid cooling module manifolds for electronic packaging," *International Communications in Heat and Mass Transfer* 20, 1993, pp.221~234.