논문접수 2022.03.19 | ISSN 1738-6144 | Journal of The Korea Association of Defense Industry Studies Vol. 29, No. 1(2022)
논문확정 2022.04.11 | http://journal.kadis.or.kr/ | 한국방위산업학회지 제29권 제1호 | http://doi.org/10.52798/KADIS.2022.29.1.6

함 탑재 캐비닛 냉각시스템 최적 설계 방안에 관한 연구

A study on the optimal design of a cooling system for cabinet mounted on naval vessel

성준영*
Joonyoung Sung*

ABSTRACT

This paper describes the design process for the design of the cabinet's water-air cooling system required to perform the functions and performance of the naval weapon system. Thermal load management by systematic cooling system design is required for the cabinet to perform major functions without failure/degradation. In this study, the temperature standard was proposed to the weapon system cabinet considering the environment and its configuration. The heat dissipation performance of the heat exchanger, a key component of the cooling system, was evaluated in advance through theoretical modeling. The modeling calculations and actual measurement values of inlet/outlet temperature were 17.0/22.8 and 18.6/25.3 celsius degrees, respectively, and the prediction error was within 10%. In this study, the optimal design process of the cooling system for heat management in the cabinet was presented, and the excellence of the cooling system design was confirmed through the data analysis of the design result.

초 록

본 논문은 함정 무기체계에 요구되는 기능 및 성능을 수행하기 위해 필요한 캐비닛의 수공냉식 냉각시스템 설계 방안에 대한 절차와 고려해야 할 사항을 기술하였다. 함 탑재 캐비닛은 주요기능을 고장/성능저하 없이 수행하기 위하여 열적 부하 관리가 선행적으로 요구되며, 발열 관리를 수행하기 위하여 체계화된 냉각시스템 설계가 필요하다. 본 연구에서는 무기체계 캐비닛의 환경과 구성을 고려하여 온도 기준을 제안하였다. 캐비닛에 제시되는 기준을 충족하기 위하여 냉각시스템 설계 절차를 체계공학 관점에서 수립하였다. 상세설계 진입 전, 냉각시스템의 핵심 부품인 열교환기의 방열 성능을 모델링을 통해 사전 평가하였으며, 유입/유출구에 대해 모델링과 실제 측정값이 각각 17.0/22.8도 및 18.6/25.3도로서 10% 오차내의 예측을 수행하였다. 본 연구에서는 캐비닛에서 발생하는 발열관리를 위한 냉각시스템의 최적 설계 방안을 제시하였고, 설계 결과물의 데이터 분석을 통해 냉각시스템 설계의 우수성을 확인하였다.

Key Words : Weapons System(무기체계), Cabinet(캐비닛), Cooling System(냉각시스템), Optimal Design(최적설계), Thermal Load Management(열부하 관리)

* 성준영, 국방과학연구소 해양기술연구원 2부 (E-mail: jy_sung@add.re.kr)

Ⅰ. 서 론

함정 무기체계의 캐비닛은 함정 탑재 센서/무장들을 통합 통제하고 표적관리, 위협평가, 무장할당, 교전통제, 함포 사격지원, 대함유도탄방어유도탄 교전지원 등의 기능을 수행한다. 캐비닛이 주요 기능을 수행함에 앞서, 함 운용 환경조건이 만족되도록 설계되어야 하며, MIL-STD/SPEC/HDBK에서 제시하는 환경조건에서 성능저하/고장 없이 작동함을 확인하여야 한다. 함정 무기체계 캐비닛은 진동/충격/소음의 기준을 충족시키기 위해 밀폐형으로 설계되며, 고온 조건에서 탑재장치의 발열로 인한 문제가 발생하지 않도록 열적 부하를 관리할 수 있는 수공냉식 냉각시스템을 사용한다[1].

전장상황 및 기술 고도화에 따라 캐비닛이 수행하는 역할이 중요해지고 있으며, 이에 따라 탑재되는 장치들의 고성능화가 요구된다. 특히 핵심 부품인 CPU의 경우, 고밀도 집적회로로 구성되어 있기에 단위면적 당 증가된 발열량을 통제해야만 주요 성능을 발휘할 수 있다[2]. 실리콘 기반의 반도체의 경우, 70도 이하에서 작동을 권장하고 있으며, 평균 작동 온도가 2도 이상 증가할 경우, 반도체 제품의 신뢰성이 10% 이내로 감소된다는 연구결과가 있다[3]. 따라서 고성능 시스템을 사용하여 작동하는 무기체계는 냉각시스템의 설계 중요성이 부각되고 있다.

무기체계 캐비닛의 냉각 방식은 공랭식과 수냉식, 그리고 수공냉식이 있으며, 선행연구에서 수공냉식의 냉각 효율의 장점을 확인하였고[4], 이에 따라 수공냉식 기반의 냉각시스템을 설계하였다. 수공냉식 냉각시스템은 개발품 및 상용품에서 발생하는 열에너지를 팬에서 발생한 강제 대류를 통해 열전달을 하여, 가열된 공기를 열교환기를 통해 냉각수로 전달하는 방식이다.

함정 무기체계 냉각시스템은 캐비닛 내부에 장착된 장치에서 발생하는 발열량을 효율적으로 방열할 수 있게끔 열적 강건성을 확보하여 최적설계를 목표로 하여야한다. 최적설계가 아닌 과도 설계를 수행하게 되면, 냉각시스템의 부피증가 혹은 에너지 소모량 및 비용 증가로 인해 함정의 한정된 공간과 자원에 영향을 줄 수 있으므로 주의하여야 한다[1]. 또한 경감설계를 수행하게 되면, 캐비닛의 발열을 제어하지 못함으로써 기능/성능저하로 유도된다. 본 연구에서는 체계공학 절차에 의거하여 상세설계 수행 전에 함정 무기체계 캐비닛 냉각시스템에 대하여 설계 방안 및 모델링 방법을 기술하였다. 모델링을 통해 계산한 결과와 캐비닛으로부터 측정한 온도결과를 비교하여 모델링의 적절성을 확인하였다. 또한 함 탑재 장비의 고온 환경시험 결과를 분석하여 설계 적합성을 입증하였다.

Ⅱ. 본 론

2.1 냉각시스템 설계 방안 및 절차

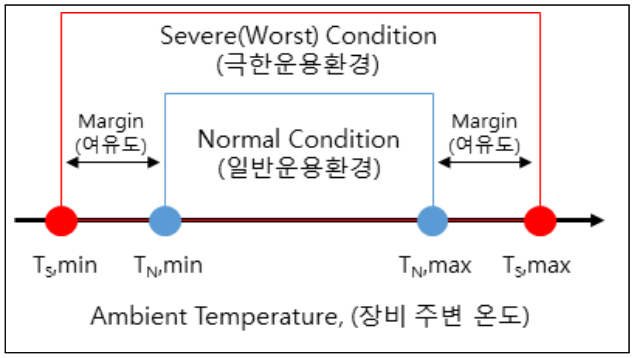
1) 수공냉식 냉각시스템 설계 시 고려해야 할 사항

함정 무기체계 캐비닛 냉각시스템은 군사규격[5]에서 제시하는 환경조건에서도 열적 부하로 인한 캐비닛 구성장치의 손상, 성능 저하 및 기능 장애 없이 운용될 수 있도록 설계되어야 한다. 또한 설계 요구사항을 만족시키는 것과 동시에 지나친 과도설계(overspec design) 및 경감설계(derating design)를 피해야한다. 캐비닛 수공냉식 냉각시스템의 최적설계(optimal design)를 수행하기 위한 기준을 네 개의 설계인자로 구분하였다.

(1) 캐비닛 외부환경 대기온도 정의

함정 무기체계 캐비닛은 견고한 설계를 통해 어떠한 환경에서도 함정의 작전수행을 이상 없이 수행할 수 있어야 한다. 특히 고온 지역에서 작전을 수행하는 상황에서 고온 환경에 지속적으로 노출된다 할지라도 캐비닛은 정상 동작이 보장되어야 한다. 캐비닛의 열적 강건 설계를 위하여 온도에 대한 환경조건을 두 가지로 정의하였으며, 아래의 〈그림 1〉을 통해 캐비닛 환경 조건(주변 온도)에 대한 범주 개념을 도식화하였다.

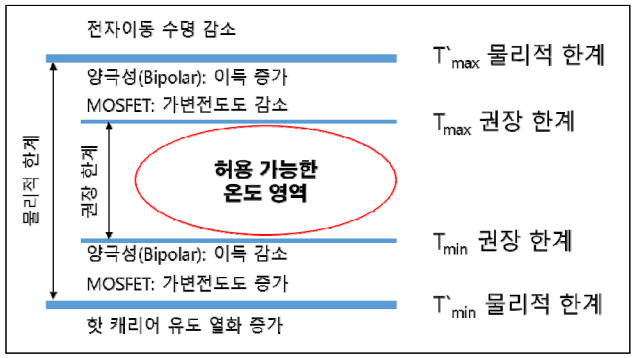
- 일반운용환경 (Normal Condition):
  평상시 운용자가 쾌적하다고 느끼는 환경 조건, 18℃~25℃
- 극한운용환경 (Severe Condition):
  공조시스템 불능으로 인한 극한 환경 조건, 0℃~43℃



〈그림 1〉 캐비닛 외부 환경(온도) 설정 개념

(2) 연산 전자소자 온도 한계 설정

함정 무기체계 캐비닛은 전장 상황 정보를 통합/분배하는 기능을 수행함으로써 각 역할을 담당하는 전자소자들이 차지하는 비중은 높아졌다. 이러한 전자소자들은 고밀도 집적회로로 구성되어 있으며, 전자소자들의 열(온도) 문제로 인한 고장을 미연에 방지하기 위하여 전자소자의 물성치를 기반으로 보편적인 기준을 설정해야 하며, 필요 시 특별 기준을 세워야 한다. 연산을 수행하는 전자소자의 집적회로는 능동소자와 수동소자가 복합적으로 구성되어 있다. 수동소자(저항, 커패시터, 인덕터)보다 능동소자(반도체)의 물리적 허용 한계가 낮으므로[6], 능동소자의 특성을 확인한다면 반도체로 구성된 연산 전자소자의 한계 기준을 도출할 수 있다. 능동소자 재료 물성치에 기반한 온도 한계 개념은 〈그림 2〉에서 확인할 수 있다.

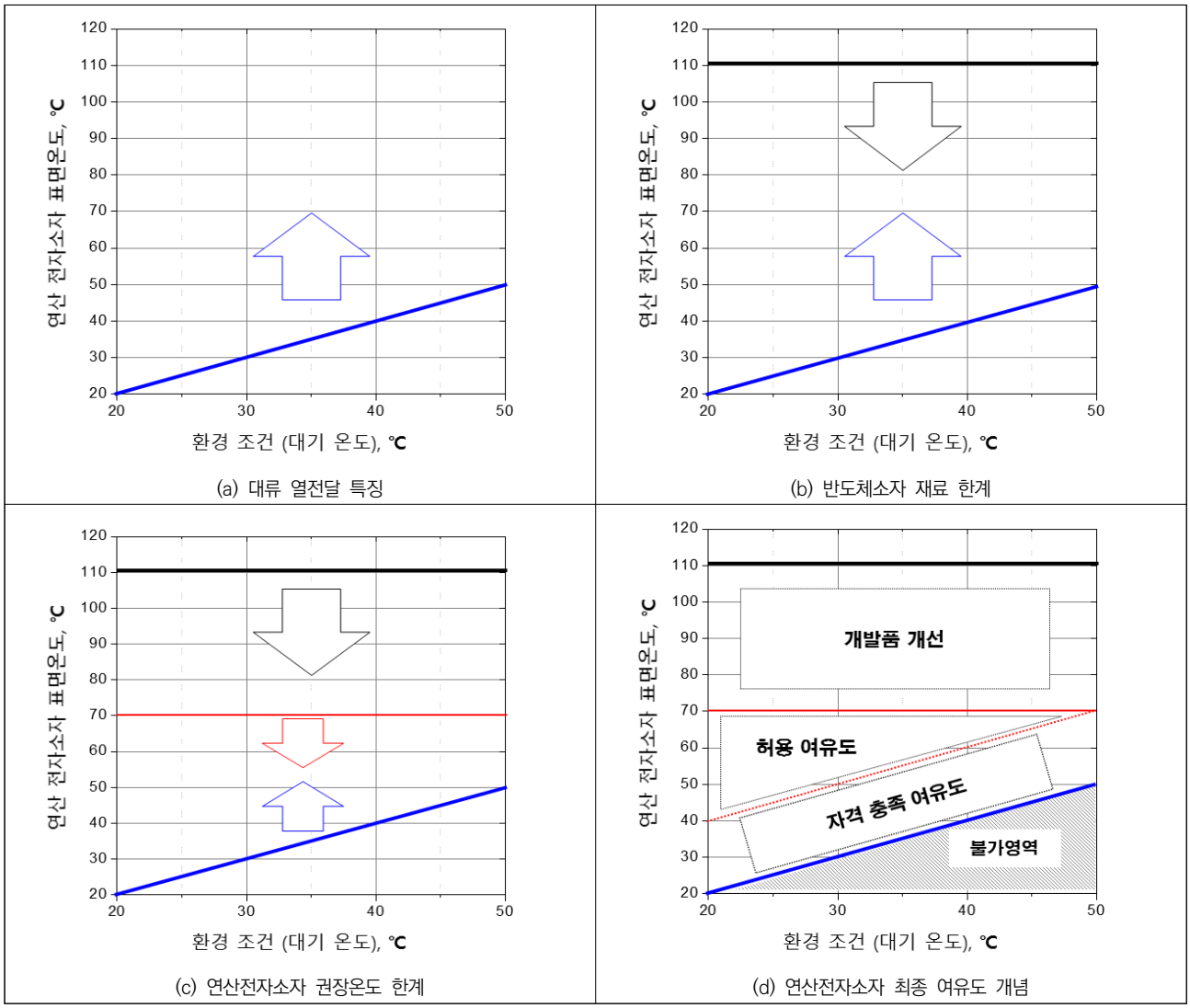


〈그림 2〉 전자소자의 온도 한계 개념도

물리적 최대 상한 온도는 능동소자의 주 성분인 실리콘의 접합 온도를 기준으로 하였으며, 110℃ 이하로 설정하였다. 능동소자가 갈륨비소 구성된 경우 접합점에서의 허용 온도는 실리콘보다 높으나, 보수적으로 기준 설정하였다. 참고자료에서 제시한 열적 여유도를 확보하기 위한 가이드라인을 인용한 범위를 기준으로 연산 전자소자의 권장 온도 범위는 0℃~70℃ 로 설정하였다[7]. 향후 개발품의 열적 안정성을 평가하기 위하여 연산 전자소자들의 온도가 권장 온도 범위 내에 포함되는지 여부를 확인하여 설계를 진행해야 한다.

(3) 탑재장치 온도 여유도 개념 설정

무기체계 캐비닛에 탑재되는 장치들은 개발품과 상용품으로 구성되어 있다. 개발품과 상용품에 대해 온도 여유도 설정 시 고려해야 할 사항은 다르다. 상용품은 제조사에서 제품사양서에 명시된 환경조건에 대해 품질을 보증하기 때문에 캐비닛 내부 환경에 맞는 제품을 설정한다. 개발품은 극한운용환경 조건에서 주요 전산 전자소자의 온도가 70℃ 이내임을 확인한 후에 사용한다. 이에 대해 하위 목을 통해 상세히 설명하였다.



〈그림 3〉 개발품 연산전자소자 온도 여유도 개념 설정도

A. 개발품의 온도 여유도 설정

함정 무기체계 캐비닛에 장착되는 개발품의 냉각 적합성은 열적 여유도를 고려하여 안전성을 확보하여야 한다. 안정성을 정량적으로 평가하기 위하여 함정허용온도 조건에서 개발품의 주 기능을 수행하는 연산 전자소자(CPU, GPU 등)의 온도를 기준으로 열적 여유도를 확인해야 한다. 열적 여유도를 확인하는 방안은 선행연구[8]를 참고하여 설정하였다. 연산 전자소자의 열적 여유도는 여러 범위의 교집합으로 이루어진다. 연산 전자소자는 주변 공기의 대류 열전달을 통해 연산 전자소자의 발열을 냉각함으로써 발열체로부터 열을 전달받은 유체(주변 공기)의 온도는 상승하며, 연산 전자소자의 온도도 주변 대기온도보다 낮을 수 없다(〈그림 3〉 (a)). 또한 전자소자의 물리적 온도 한계 범위 이내로 들어와야 한다(〈그림 3〉 (b)). 그리고 전자소자의 권장 온도 한계(70℃)를 초과하지 않아야 한다(〈그림 3〉 (c)). 최종 여유도 개념에서는 자격 충족 여유도와 허용 여유도로 나누었다(〈그림 3〉 (d)). 자격 충족 여유도는 대기온도와 전자소자의 온도차이가 20℃ 이내인 경우이다. 허용 여유도란 조립체 레벨 및 전자소자의 온도가 70℃ 이내인 경우 고장률이 낮다는 자료[9]를 기반으로 자격 충족 여유도를 만족시키지 못하는 경우를 산정하여 설정한 개념이다. 자격 충족 여유도를 충족시키지 못하는 경우 허용 여유도를 두어, 대기온도와 전

자소자의 온도차이가 20℃ 초과되지만 권장 온도 한계에 들어올 때 허용할 수 있는 범주를 설정하였다. 함정 무기체계 캐비닛에 탑재되는 개발품 내 연산전자소자의 경우에는 이러한 여유도 조건에 부합되어야 장착이 가능하다.

B. 상용품의 온도 여유도 설정

함정 무기체계 캐비닛에 탑재되는 상용품의 경우, 개발품과는 달리 연산전자소자의 온도 여유도 조건 충족에 중점을 두지 않는다. 대신 캐비닛에서 수공냉식 냉각시스템이 상용품의 제품스펙에 명시된 온도 범위 내의 환경을 제공하는지 여부를 확인하는 지를 중점적으로 확인한다. 따라서 함정 무기체계 캐비닛에 탑재되는 상용품은 극한운용환경 온도 범위 내에서 정상 동작이 보장되는 제품으로 선정한다.

(4) 캐비닛 내부온도 상한치 설정

함정 무기체계 캐비닛은 내부 온도 상한치에 대한 기준이 필요하다. 우선적으로 기준이 될 사항은 캐비닛 내부 온도는 극한운용조건 고온 환경(43℃)을 초과하지 않아야 한다는 점이다. 또한 온도로 인한 캐비닛 구성장치의 MTBF를 고려하여야 한다. Mil-HDBK-217F에 의하면 장비 주변온도(Room temperature)가 10℃ 씩 오를 때마다 그 공간 내 전자소자들의 MTBF가 50% 감소함을 확인하였다[10].

캐비닛의 내부 온도 상한치는 탑재장치 발열량과 MTBF, 그리고 극한운용조건 고온 환경 시 캐비닛 외벽의 외기온도와의 열평형을 통한 캐비닛으로의 열전달을 감안하여 설정하여야 한다. 이러한 측면에서 수공냉식 냉각시스템은 극한운용환경 조건에서 캐비닛 내부 온도를 35℃ 이내로 설정하는 것을 목표로 하였다. 그러나 캐비닛 내부 공간이 복잡한 관계로 여유도를 두어 상한선을 35℃+2℃까지 허용하였다. 만약 캐비닛 내부 온도가 37℃ 이상인 경우, 수공냉식 냉각시스템 목표 달성을 위해 재검토가 필요하다. 재검토가 필요한 경우, 내부 발열량을 줄이는 방안 또는 열교환기 효율이 높은 것으로 변경하는 방안을 검토한다.

2) 수공냉식 냉각시스템 설계 절차

함정 무기체계 캐비닛의 수공냉식 냉각시스템을 설계하기 위해 고려해야 할 사항은 전 장에서 정리하였으며, 이를 기반으로 설계 절차를 5단계로 나누어 기술하였다.

- 1단계: 개발품의 발열량 검토
  캐비닛에 장착하는 개발품목의 경우, 온도에 따라 기능이상/성능저하가 나타나는 주요 소자는 CPU, GPU와 같이 연산 전자소자이다. 연산전자소자는 소비전력에 의해 발열이 나타나며, 이에 대해 제조사에서 열 설계 전력(TDP, Thermal Design Power)을 제공한다. 하지만 이는 전자소자들을 최대치로 활용하는 것을 산정한 개념으로써 함정 무기체계 운용 개념과 상이하다. 따라서 냉각시스템 최적 설계를 위해 전자소자 기반의 개발품의 경우, 각 소자들의 최대소비전력 70%로 산정한다.

- 2단계: 상용표준품(COTS) 환경조건 검토
  캐비닛에 장착하는 상용표준품은 제조사에서 제공하는 제품사양서를 검토하여 캐비닛에서 제공 가능한 온도환경에 적합 여부를 검토한다. 캐비닛에서 요구하는 기능을 가진 상용표준품의 제품사양서에서 캐비닛 제공 환경조건을 수용할 수 있다면, 구매를 진행한다.

- 3단계: 캐비닛 구성장치의 발열량 산정
  캐비닛 탑재장치는 개발품 및 상용표준품으로 구성되어 있다. 캐비닛 구성장치의 발열량은 개발품 및 상용표준품의 각각 최대소비전력 70%의 합으로 산정한다.

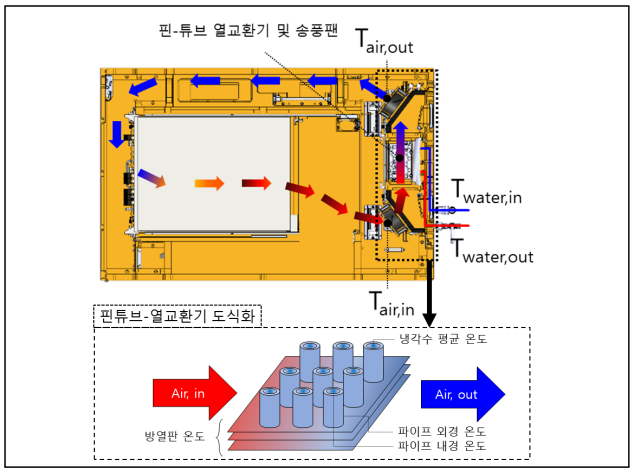
- 4단계: 수공냉식 냉각시스템 설계
  캐비닛에서 발생하는 발열량으로부터 열평형을 확보할 수 있는 열교환기 선정을 위해 제한된 부피 내에 가열된 공기와 접촉 면적이 가장 넓은 핀-튜브형 열교환기를 선정한다[11]. 핀-튜브형 열교환기의 냉각수 공급 유량 범위에 따라 열교환기 성능을 확인한다. 냉각수 공급 유량의 범위에 따라 캐비닛에 인가되는 공급 압력 및 압력 손실을 산출하여 함정에서 제공 가능한지 확인한다. 캐비닛 냉각시스템에서 요구하는 냉각수 공급 유량이 함정 제공 불가능한 경우에는 캐비닛의 열평형을 확보할 수 있는 유량 범위에서 조정해야 한다.

- 5단계: 수공냉식 냉각 설계 조정
  함정 무기체계 캐비닛 수공냉식 냉각 설계를 위한 세부적인 사항의 조정이 필요한 경우에는 체계개발 절차에 따라 하드웨어 설계기술서를 기반으로 연구개발 주관기관과 협의를 통해 수정할 수 있다.

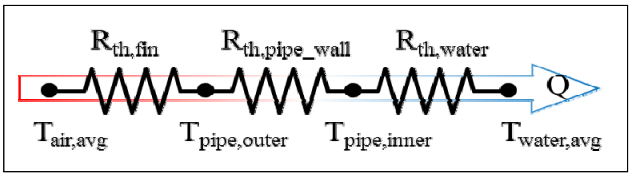
2.2 냉각시스템 열교환기 이론적 모델링 방법

함정 무기체계 캐비닛 냉각시스템은 캐비닛 탑재장치의 정상적인 동작을 위해 37℃ 이내의 온도 환경을 제공해야 한다. 그러나 체계개발 일정 상 캐비닛의 구체적인 설계가 확정되기 전에 냉각시스템에 대한 기본설계가 결정된다. 즉, 캐비닛 형상 및 캐비닛에 탑재되는 장치의 형상이 확정되기 전에 냉각시스템에 대한 기본설계를 완성해야 하기에 이론적인 분석을 통해 적절성을 판단해야 한다. 하지만 캐비닛에서 발생하는 모든 상황에 대해 냉각시스템 이론적 모델에 의한 분석은 한계가 있으므로 외부와의 단열조건이라는 가정 하에 캐비닛 탑재장치의 발열에 대한 냉각 성능을 판단하는 모델을 연구하였다.

함정 무기체계 캐비닛의 냉각시스템의 주요 구성품인 핀-튜브형 열교환기에서 이루어지는 주요한 열전달은 세 가지로 구성된다. 핀(방열판)에서 발생하는 공기에 의한 강제 대류 열전달, 튜브 표면에서 내부 냉각수로의 전도 열전달, 그리고 냉각수의 대류열전달이다. 이러한 세 가지로 구성된 열전달은 열저항 모델로 산출할 수 있다. 열저항 모델은 직렬형태로 단순화할 수 있으며, 각각의 열저항을 모두 더함으로써 전체 열저항을 계산할 수 있다. 핀-튜브형 열교환기의 열저항 모델 구성은 〈그림 4〉와 같이 도식화 할 수 있고, 이를 바탕으로 열저항 모델은 〈그림 5〉와 같이 구성할 수 있다. 전체 열저항을 산출한다면, 캐비닛 발열량 및 냉각수 온도를 기반으로 열교환기에서 유입/유출되는 공기의 평균 온도를 예측할 수 있다.



〈그림 4〉 핀-튜브 열교환기 열저항 모델



〈그림 5〉 핀-튜브 열교환기 열저항 모델

열저항 모델에서 R_{th}은 열저항, T는 온도, 아래 첨자는 위치정보를 나타내었다. 열전달 방식에 따라 결정되는 열저항 계수는 다음 절들을 통해 수식으로 나타내었다.

1) 방열판에서 공기에 의한 강제 대류 열전달

캐비닛 구성장치로부터 가열된 공기는 송풍팬에서 발생시킨 강제 대류를 통해 열교환기의 방열판에서 열전달이 발생한다. 핀-튜브형 열교환기를 모델링하기 위해서는 대류 열전달계수와 열교환기 효율 값이 필요하다. 대류 열전달계수를 산출하기 위하여 수력학적 직경을 정의하였으며, 이를 기반으로 무차원 관계식을 기반으로 열전달계수를 계산하였다. 핀-튜브형 열교환기에 적합한 효율 공식은 자료[12]를 참고하여 도출하였다.

- 방열판에서의 공기 흐름을 분석하기 위한 수력학적 직경 d_{ae},

$$d_{ae} = 4\frac{V \cdot \Phi}{A_{tot}}$$

- 방열판과 방열판 사이 공간에서의 빈공간 비율 Φ,

$$\Phi = 1 - \frac{s_R}{t_R} - \frac{\pi d_A^2 (t_R - s_R)}{4 t_q t_l t_R}$$

- 공기와 접촉하는 방열판 및 파이프 외경의 전체 면적 A_{tot},

$$A_{tot} = 2(t_q t_l - d_A^2 \frac{\pi}{4}) + d_A \pi (t_R - s_R)$$

- 방열판과 방열판 사이의 부피 V,

$$V = t_q t_l (t_R - s_R)$$

t_q 는 방열판에 꽂힌 튜브 중심점과 튜브 중심점 사이의 횡단길이, t_l은 튜브 중심점과 튜브 중심점 사이의 종단길이,

그리고 t_R은 방열판과 방열판 사이의 간격이며, s_R은 방열판의 두께이다.

- 공기의 대류열전달을 구하기 위한 무차원 관계식,

$$Nu_{d_{ae}} = 0.24 \cdot Re_{d_{ae}}^{0.625} Pr^{1/3} \left(\frac{d_{ae}}{t_l} \right)^{1/3}$$

- 방열판을 지나는 공기의 대류 열전달 계수 h_{fin},

$$h_{fin} = \frac{Nu_{d_{ae}} \cdot k_f}{d_{ae}}$$

- 방열판에서 발생하는 열전달의 효율을 구하기 위해 필요한 계수 m,

$$m = \sqrt{\frac{2 \cdot h_{fin}}{k_{al} \cdot s_R}}$$

상기 식에서 k_{al}은 알루미늄 방열판 재료(알루미늄)의 전도열전달계수이다.

- 방열판에서 발생하는 열전달의 효율을 구하기 위해 필요한 계수 ϕ,

$$\phi = 1 + 0.35 \cdot \ln(1 + t_R / 6.35e - 3)$$

- 단일 방열판의 열전달 효율 ε_{fin},

$$\varepsilon_{fin} = \frac{\tanh(\phi \cdot D_{o,pipe} / 2m)}{\phi \cdot D_{o,pipe} / 2m}$$

$D_{o,pipe}$는 방열판을 관통하여 지나는 파이프의 외경이다.

- 전체 방열판의 열전달 효율 $\varepsilon_{overall}$,

$$\varepsilon_{overall} = 1 - \frac{2 \cdot N \cdot A_{fin}}{A_{tot} \cdot (1 - \varepsilon_{fin})}$$

N은 방열판의 개수이다. 상기 식들을 정리하여 마지막으로 방열판의 열저항 계수는 다음과 같다.

$$R_{th,fin} = \frac{1}{\varepsilon_{overall} \cdot h_{fin} \cdot A_{tot}}$$

이로써 방열판에서 발생하는 통합 열저항 계수를 산출할 수 있다.

2) 파이프 겉면에서 내부 냉각수로의 전도 열전달

가열된 공기는 강제대류를 통해 방열판으로 전달되고, 방열판의 열은 배관을 통해 흐르는 냉각수로 열전달이 이루어진다. 배관 외벽에서 내벽으로 열전도가 발생하며 이에 대한 열저항은 아래 식을 통해 간단히 나타낼 수 있다.

$$R_{th,pipe_wall} = \ln\left(\frac{D_{o,pipe}}{D_{i,pipe}} \right) / (2\pi L) \cdot k_{cu}$$

상기 식에서 $D_{o,pipe}$ / $D_{i,pipe}$는 파이프 외/내경을 뜻하고, L은 파이프의 길이이며, k_{cu}는 파이프 재질(구리)의 전도열전달계수이다.

3) 냉각수의 대류 열전달

냉각수의 대류 열전달은 층류인지 난류인지에 따라 열전달 형태가 상이하다. 이를 구분하는 무차원수는 Reynolds number 이고, 일반적으로 관내유동에서 $Re\#$ 〉 2100 의 경우에 난류로 분류한다. 그렇지만 캐비닛 냉각시스템에 냉각수를 공급하는 배관튜브는 직선 배관뿐만 아니라 곡선 배관도 포함되어있고, T-union을 통해 분기와 합류가 발생하기에 $Re\#$ 〉 1250 이상인 경우에 난류 식을 사용하였다 [13]. 그리고 그 외의 범위는 층류 식을 사용하였다. 또한 층류 식을 사용할 때에 균일한 열유속이 유입되는 것을 가정하여 그에 상응하는 식을 사용했다. 아래 식들의 아래첨자 w는 냉각수(water)를 뜻한다.

- $Re\#$ 〉 1250 인 경우,

$$Nu_w = \frac{f}{8} \frac{(Re_w - 1000) Pr_w}{(1 + 12.7\sqrt{f/8}) \cdot (Pr_w^{2/3} - 1)}$$

- $Re\#$ ≤ 1250 인 경우,

$$Nu_w = 4.36$$

- 냉각수의 대류 열전달 계수

$$h_w = \frac{Nu_w \cdot k_{f,w}}{D_{i,pipe}}$$

• 냉각수의 대류 열저항

$$R_{th,w} = \frac{1}{h_w \cdot A_{i,pipe}}$$

4) 열교환기 공기 유입/유출구 온도 추정

위의 세 가지 열전달 형태로부터 확인한 열저항 정보를 바탕으로 전체 열저항은 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$R_{th,total} = R_{th,fin} + R_{th,pipe_wall} + R_{th,w}$$

이러한 값을 바탕으로 에너지 보존법칙에 의해 캐비닛에서 발생하는 발열을 바탕으로 다음과 같이 에너지 보존에 관련된 식을 세 가지를 산출할 수 있다.

• 냉각수에서 발생하는 에너지 보존,

$$Q = \dot{m}_w c_{p,w} \Delta T_w = \dot{m}_w c_{p,w} (T_{w,out} - T_{w,in})$$

• 공기에서 발생하는 에너지 보존,

$$Q = \dot{m}_{air} c_{p,air} \Delta T_{air} = \dot{m}_{air} c_{p,air} (T_{air,in} - T_{air,out})$$

• 공기에서부터 냉각수까지 전달되는 에너지 보존,

$$Q = R_{th,total}(T_{air,avg} - T_{w,avg})$$
$$= R_{th,total}\left(\frac{T_{air,in} + T_{air,out}}{2} - \frac{T_{w,in} + T_{w,out}}{2}\right)$$

세 가지의 에너지 보존 방정식을 냉각수 입/출구 온도 및 열교환기에 유입/유출되는 공기의 온도로 표현하였다. 이 중 냉각수 입구 온도는 설계 시 요구사항에 따라 설정하는 값이기 때문에 세 개의 방정식은 세 개의 미지수로 구성되며, 냉각수 출구 온도 및 열교환기 공기 유입/유출구의 온도를 공학적으로 추정할 수 있다.

• 냉각수 평균 온도,

$$T_{w,avg} = \frac{T_{w,in} + T_{w,out}}{2}$$

• 공기 평균 온도,

$$T_{air,avg} = \frac{T_{air,in} + T_{air,out}}{2}$$

• 냉각수 출구 온도,

$$T_{w,out} = \frac{Q}{\dot{m}_w c_{p,w}} + T_{w,in}$$

• 열교환기조립체로 유입되는 공기의 온도,

$$T_{air,in} = \frac{Q}{R_{total}} + T_{w,avg} + \frac{Q}{2 \cdot \dot{m}_{air} \cdot c_{p,air}}$$

• 열교환기조립체에서 유출되는 공기의 온도,

$$T_{air,out} = \frac{Q}{R_{total}} + T_{w,avg} - \frac{Q}{2 \cdot \dot{m}_{air} \cdot c_{p,air}}$$

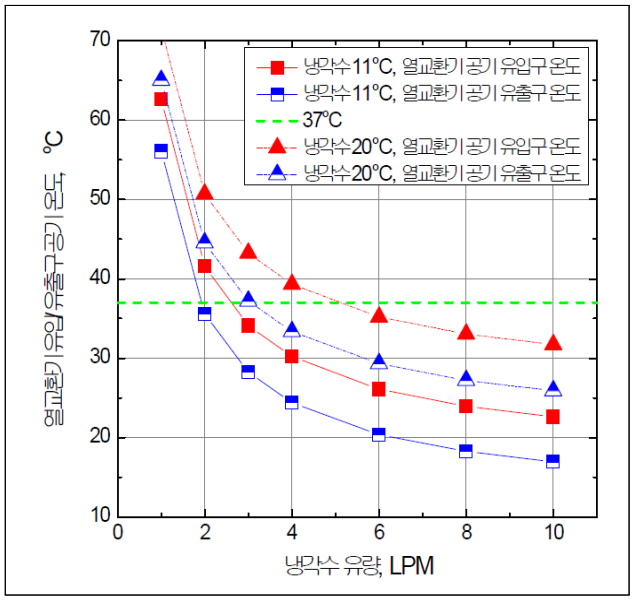
이로써 본 연구에서는 캐비닛 냉각시스템 상세 설계 전, 핀-튜브 열교환기에 대한 정보를 기반으로 캐비닛 발열량에 따른 방열 온도를 간략하게 예측할 수 있는 모델링을 제안하였다.

2.3. 냉각시스템 설계 결과

1) 모델링 결과

함정 무기체계 캐비닛에 탑재되는 장치들은 담당 기능과 성능에 따라 소비전력이 제각각 상이하다. 본 연구는 2,200W 소비전력의 캐비닛을 선정하여 냉각시스템 모델링 적합성 검토를 위한 비교군으로 참고하였다. 2.1절 2) 항에 기술한 냉각시스템 설계 절차에 따라 캐비닛 구성품의 소비전력을 기반으로 발열량을 계산하였다.

열교환기 모델링을 기반으로 냉각수 공급 유량 및 온도를 통제변수로 설정하여 열교환기로 유입/유출되는 공기의 온도를 계산하였다. 캐비닛 외부 온도 환경에 대한 고려가 없는 한정된 조건에서 단순화한 이론적 모델링이므로 정확한 온도 예측에는 한계가 있지만, 캐비닛 형상 확정 전에 냉각시스템 설계의 타당성을 확인하는 절차로 수행하였다. 〈그림 6〉를 통해 캐비닛 내부온도가 37도 이하를 유지하기 위해서는 냉각수 20도 이하, 6 LPM 이상의 조건이 형성되어야 냉각시스템 설계 목표를 달성할 수 있음을 확인하였다.



〈그림 6〉 냉각수 온도 및 유량에 따른 캐비닛 내부온도 예측

2) 냉각시스템 설계 검증

본 논문에서 소개된 함정 무기체계 캐비닛 수공냉식 냉각시스템 설계 방안에 따라 모델링을 통해 냉각시스템 설계의 적절성을 확인한 후에 극한운용환경 및 일반운용환경에서 정상 동작하는지 검증을 수행하였다. 본 논문의 실험 자료는 사업부호 211776-922013301 에 의거 보호되고 있으며, 해당 자료의 열람이 필요할 경우 문서번호 ADDR-515-201087 (2020년 06월) 을 통해 확인이 가능하다.

(1) 일반운용환경 운용 확인

일반운용환경의 최대 온도인 25도 조건에서 무기체계 캐비닛을 정상 동작시킴으로써 내부에서 발생되는 발열이 냉각시스템을 통해 방열되는지 확인하였다. 냉각수의 온도는 11도로 설정하였고, 유량은 10 LPM으로 설정하여 시험을 수행하였다. 무기체계 캐비닛에 탑재되어있는 열교환기 조립체는 핀-튜브형 열교환기와 송풍팬으로 구성되어 있다. 송풍팬은 공기를 강제대류 시킴으로써 열교환기를 관통하는 흐름을 만들어 열교환기 방열판에서 열전달이 발생하는 역할을 수행하였다. 시험을 위해 온도 센서는 열교환기 공기 유입/유출구 측에 설치하여 측정하였다. 모델링과 실측값에 대한 오차는 최대 10%이었으며, 〈표 1〉을 통해 정리하였다.

〈표 1〉 냉각시스템 모델링 결과 비교

		모델링	실측값	오차
열교환기 공기온도, ℃	유입구	22.77	25.30	10.0%
	유출구	17.02	18.60	8.49%

이론적 모델링의 타당성을 검증하기 위하여 오차 값에 대한 허용치를 선행 연구를 통해 확인하였다. 모델링 결과의 신뢰성을 평가하기 위하여 선행연구자료[14]를 참고하였고, 이에 대한 내용은 〈표 2〉를 통해 정리하였다. 〈표 1〉에서 상세설계를 완성한 캐비닛 내부 실측값과 이론적 모델링을 통해 추정한 온도의 차이가 유효함을 확인하였다.

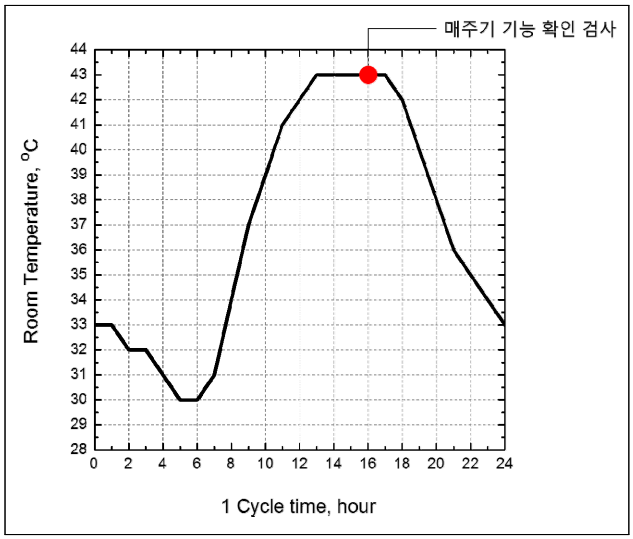
실측값과 모델링 값에서 오차가 발생하는 이유는 크게 두 가지로 추측하였다. 첫 번째는 외부 환경조건(온도)에 의한 영향성이다. 모델링으로부터 확인한 열교환기 공기 유입/유출구 온도보다 캐비닛 외부 환경 온도가 높으면 캐비닛 벽면으로부터 열에너지 유입이 발생한다. 이러한 점을 열저항 모델링에 반영하지 못한 것이 오차 발생 사유로 확인하고 있다. 두 번째는 캐비닛 내부에 케이블 하네싱 등으로 인한 구조 복잡성으로 인해 원활한 공기유동 경로 제공 제한이 원인으로 간주하였다. 따라서 공기 흐름이 열전달에 영향을 주었기에 이론적 모델링 결과와 차이가 있는 것으로 분석하였다.

〈표 2〉 모델링 및 실측값 오차 신뢰성 분석

	모델링과 실제 측정값 오차 범위			
	10% 이내	10~20%	20~50%	50% 이상
신뢰성	유효 (Good)	허용가능 (Acceptable)	빈약 (Poor)	적용불가 (not Applicable)

(2) 극한운용환경 운용 확인

극한운용환경에 맞게끔 고온 환경시험을 규격[5]에 의거하여 수행하였다. 고온운용 환경시험은 챔버 내 환경조건이 최고온도 (43℃) 도달 시에도 장비 운용에 영향을 미치는지 확인하는 시험이다. 24시간을 1주기로 하여 3주기를 시험하였다. 고온운용 시험 1주기에 해당하는 온도는 〈그림 7〉 에서 확인할 수 있다. 1주기 당, 최고 온도 시점에서 기능 확인 시험을 수행하여 장비의 기능이상/성능저하 없이 정상적으로 동작함을 확인하였다.



〈그림 7〉 고온운용 시험주기

무기체계 캐비닛 고온운용시험을 수행함에 있어, 캐비닛에 공급하는 냉각수 칠러의 용량 한계로 인해 12℃ 냉각수 및 7.5 LPM 을 공급하였다. 환경시험 환경 및 캐비닛에 대한 사진은 〈그림 8〉에 나타내었다. 환경시험에서 캐비닛 내부 온도는 캐비닛 설계 시 설치되는 전면부 중앙 온도센서를 통해 데이터를 측정하였고, 이 온도를 캐비닛 내부 평균 온도로 간주하였다. 온도센서를 통해 데이터 측정결과, 내부 평균 온도는 35.7℃로써 냉각시스템의 설계 상한치를 초과하지 않음을 환경시험을 통해 검증하였다.

〈그림 8〉 고온 운용 시험, 챔버 내 장비

Ⅲ. 결 론

본 논문은 함정 무기체계 캐비닛 설계 시 열적 부하를 관리하기 위한 수공냉식 냉각시스템 최적 설계를 위한 설계 절차 및 방법을 기술하였다. 장비의 현대화가 진행됨에 따라 고집적/고성능 전자소자들의 냉각이 중요한 설계 인자가 됨으로써 설계 시 충족해야 하는 조건들을 공학적 관점에서 기술하였다. CPU/GPU 등 고성능 연산전자소자들의 상한 온도를 설정하여 개발품의 설계 기준치를 제시하였다. 또한 전자소자들의 주변 온도에 의한 MTBF 영향성을 고려하여, 수공냉식 냉각시스템을 사용하는 캐비닛 내부의 상한 온도를 37도로 설정하였다. 이러한 조건들을 충족시킬 수 있는 냉각시스템을 설계하기 위하여 수공냉식 냉각의 핵심 역할을 수행하는 핀-튜브 열교환기에 대해 열저항 모델링을 제안하였다. 그리하여 캐비닛 내부 탑재장치로부터 발생되는 발열에 대해 냉각을 원활하게 수행할 수 있는지에 대해 초기 기본설계 단계에서 판별할 수 있게 하였다.

최종 설계된 실 제품을 기준으로 일반운용환경과 극한운용환경에서 시험하였다. 그 결과, 일반운용환경 및 극한운용환경 조건에서 캐비닛 내부온도가 37도를 초과하지 않았으며, 이는 설계기준을 만족하는 것을 확인하였다. 또한 일반운용환경의 시험조건에서 냉각시스템의 열교환기 공기 유입/유출구 온도와 열교환기 열저항 모델링을 통해 획득한 값을 비교한 결과 오차가 10%이내로 됨을 확인하였다. 이러한 오차 범위는 신뢰할 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서 제안한 함 탑재 장비의 냉각시스템 설계 절차는 냉각시스템 최적설계를 수행할 수 있는 방안을 제시하였다. 또한 열교환기 모델링은 체계 개발 일정 중 기본설계 단계에서 냉각시스템 성능의 신뢰성을 선행적으로 확보할 수 있는데 의의가 있다. 추후 연구를 통해 냉각시스템을 통한 제습능력 및 외기온도에 의한 영향성을 보완한다면 후속 무기체계 캐비닛 수공냉식 냉각시스템 최적설계 수행 방안에 기반이 될 것으로 기대한다.

참고문헌

1) J. Song, J. Lee, I. Park, "Enhancement of cooling performance of naval combat management system using heat pipe", Applied Thermal Engineering, Vol.188, 2021, 116657.
2) S. Hamilton, "Intel research expands Moore's law", *IEEE Computer Society*, Vol.36, No.1, 2003, pp.31-40.
3) M. Vogel, "Low Profile Heat Sink Cooling Technologies for Next Generation CPU Thermal Designs", *Electronics Cooling*, Vol.11, No.1, 2005, pp.20-26.
4) S.I. Haider, L. Burton, Y. Joshi, "A proper orthogonal decomposition based system level thermal modeling methodology for shipboard power electronics cabinets", *Heat Transfer Eng.* Vol.29, 2008, pp.198-215.
5) U.S. Department of Defense, "MIL-STD-810H, Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests", 2019.
6) A. H. George, "The reliability, testing and evaluation of hybrid microcircuits", *Electrocomponent Science and Technology*, Vol.4, 1977, pp.213-217.
7) R. Mishra, M. Keimasi, D. Das, "The Temperature Ratings of electronic parts", *Electronics Cooling*, Vol.10, No.1, 2004, pp.20-29.
8) G. Siebes, C. Kingery, C. Farguson, M. White, "Review and Assessment of JPL's thermal Margins", *42nd International conference on Environmental Systems*, 2012. 07. 16.
9) NASA Jet propulsion Laboratory, "Design, Verification/Validation and Operation Principles for Flight Systems", Rev.4: DMIE-43913, 2001.
10) U.S. Department of Defense, "MIL-HDBK-217F, Reliability Prediction of Electronic Equipment", 1995.
11) B. Porumb, P. Unguresan, L.F. Tutunaru, A. Serban, M. Balan, "A Review of Indirect Evaporative Cooling Technology", *Energy Procedia*, Vol.85, 2016, pp.461-471.
12) F.Frass, R.Hofmann, K.Ponweiser, "Principles of Finned-Tube Heat Exchanger Design for Enhanced Heat Transfer - 2nd Edition", WSEAS Press, 2015.
13) B. Eckhardt, M. Schneider, B. Hof, J. Westerweel, "Turbulence Transition in Pipe Flow", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol.39, 2007 pp.447-468.
14) Z. Zhang, W. Zhang, Z. Zhai, Q. Chen, "Evaluation of Various Turbulence Models in Predicting Airflow and Turbulence in Enclosed Environments by CFD: Part 2-Comparison with Experimental Data from Literature", *HVAC&R Research*, Vol.13, No.6, 2007, pp.871-886.