

열상장비 냉각기의 MTTF 개선연구

정윤식
국방기술품질원 유도감시팀

A Study of MTTF improvement of Thermal Device cryogenic-cooler

Yunsik Jung

ISR & PGM team, Defense Agency for Technology and Quality

요약 본 논문에서는 군용 냉각형 열상장비의 중요한 부품인 냉각기의 MTTF를 개선하기 위한 방법을 제시한다. 일반적인 전자장비는 전자소자의 특성으로 인해 온도, 습도 등 환경요인에 의해 고장발생 가능성이 높다. 그러나 일부 군용과 같이 특수목적용의 장비(열상장비 등)들은 다양한 환경요인들에 노출되어 운용하기 때문에 환경요인을 극복할 수 있도록 설계한다. 다양한 군용 장비 중 지속적으로 사용가능 해야 하는 장비 중 가장 널리 사용되는 장비로 열상장비를 꼽을 수 있다. 특히 화질을 우선시하는 군용의 특성상 냉각형 열상장비를 많이 사용한다. 이러한 군용 냉각형 열상장비는 항상 운용 가능해야 하기 때문에 MTTF는 장비의 중요한 파라미터다. 군용 냉각형 열상장비의 MTTF에 가장 중요한 영향을 미치는 부분은 냉각기 부분이다. 냉각기의 MTTF는 장비 내부 열과 연관이 있으며 열을 저하시켜 MTTF를 증가시킬 수 있다. 이를 위해 기존 장비의 내부열에 대한 시뮬레이션을 수행하였고 이로부터 개선점을 확인할 수 있었으며 내부 구조를 개선하는 방법을 제안하였다. 제안한 개선방법의 효과는 시뮬레이션 및 MTTF계산을 통해 확인한다.

Abstract In this paper, we propose a mean time to failure (MTTF) to improve the solution for a cryogenic cooler, which is an important part of a cooled thermal device. Common electronic devices have a high possibility of failure due to various environmental factors, such as temperature and humidity. But some special devices (such as thermal devices) are designed to overcome environmental factors. The most affected part of a cooled thermal device's MTTF is the cryogenic cooler. The MTTF of a cryogenic cooler is affected by the device's internal heat. Therefore, if the device's internal heat is reduced, the cryogenic cooler's MTTF increases. From the present device's internal heat simulation, we analyze the improvement method of the device. The proposed improvement method's effectiveness is verified by simulation and MTTF calculation.

Keywords : cryogenic-cooler, cooled thermal device, MTTF, thermal device, temperature

1. 서론

1.1 서론

열상장비는 적외선영역의 신호를 영상화 하는 장비로 최초 2차 대전 당시부터 군사목적용으로 개발되어 사용되었으나 현재는 기술 보편화에 따라 산업용, 방재용등 민간분야에서도 널리 사용되고 있다. 일반적인 카메라는 가시광선영역의 신호를 수집하여 영상화 하는 장비이나

열상장비의 경우 적외선영역에 반응하는 광 검출 소자를 사용한 적외선영역만 시각화 하는 장비이므로 생성되는 영상은 일반적인 카메라와는 다르게 열이 방출되고 있는지에 따라 명암이 구분되도록 영상이 구성되는 특징이 있다.

열상장비는 다양한 분류를 적용하여 나눌 수 있지만 검출기를 구성하는 방식을 기준으로 냉각식과 비냉각식으로 나눌 수 있다. 냉각식 열상장비는 냉각기와 검출기를 결합한 것으로 검출기가 일정온도 이하에서 동작하는

*Corresponding Author : Yunsik Jung(Defense Agency for Technology and Quality)

Tel: +82-10-4221-9083 email: highmank@dtaq.re.kr

Received April 16, 2018

Revised (1st April 30, 2018, 2nd May 10, 2018)

Accepted July 6, 2018

Published July 31, 2018

방식을 뜻하며 SnPb, PtSi, InAs, InGaAs, HgCdTe 등의 소자를 사용하여 검출기를 구성한다. 비냉각식은 냉각기 없이 검출기 단일 구성만으로 동작하는 방식이며 PScT, BST 등의 소자를 사용하여 검출기를 구성한다. 두 방식 중 냉각형 검출기는 가장 오래 전부터 개발되어 온 형태로 후에 개발된 비냉각식 검출기 대비 화질, SNR 등이 우수하나, 가격이 비싸고 크기가 크며 냉각하기까지 일정 시간이 필요하다는 단점이 있어 현재 산업용이나 민간 용으로는 비냉각식 검출기가 주를 이루고 있으며 상대적으로 보다 고품질의 영상을 필요로 하는 군용으로는 냉각식 검출기가 주를 이루고 있는 실정이다.

일반적인 전자기기들은 소자들의 특성상 많은 열을 방출하기 때문에 내부소자에서 발생하는 열을 방출하기 위한 환기구가 있으며 공기순환을 돕는 쿨링팬이 사용되는 경우가 많다. 이러한 전자기기의 전형적인 형태로 가정에 많이 보급된 PC를 꼽을 수 있다. 그러나 군용으로 사용되는 장비들 중 외기환경에 노출되는 일부 특수한 제품들은 가혹한 환경에서도 고장나지 않고 동작하여야 하는 이유로 MIL standard[1-2]에 의한 환경시험요건 충족을 필요성이 있기 때문에 내부에서 발생하는 열을 방출할 수 있는 환풍구나 팬과 같은 기계적장치가 없으며 내부의 열은 케이스의 전도에 의해 방출되도록 설계된다. 그러나 이러한 설계는 냉각형 검출기와 결합된 냉각기에는 악영향을 미치며[3 - 6] 더운 날 사용하는 에어컨이 덜 더운 날 사용하는 에어컨 보다 더 많은 전력을 소비하여 수명이 단축되는 이유와 같다. 특히 이러한 문제는 약 173K의 초저온으로 검출기의 온도를 유지해야 하는 냉각기에는 보다 치명적인 문제가 될 수 있다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 기존의 외부케이스에 의한 현재상황의 구조 및 열 해석을 바탕으로 장비 내부열의 방출을 가속화 할 수 있는 방열구조를 추가하여 장비 내부열을 보다 효율적으로 방출할 수 있도록 개선하였으며 이에 대한 효과를 시뮬레이션을 통해 분석하고 이에 따른 MTTF 개선여부를 분석하였다.

2. 대상 장비 방열구조 분석

2.1 대상 장비

군용 장비는 대부분 환경적 도전에 직면하며 일반적인 전자장비 사용에 적합한 환경 대비 상대적으로 덥거

나 추운 등 사용이 어려운 환경에 처해 있는 경우가 많다. 때문에 군용장비로써 유용하게 사용되는 장비 중 하나인 열상장비 또한 극한의 환경에서도 생존할 수 있게 장비의 환경 신뢰성 충족이 필요하기 때문에 환경 영향을 극복하기 위해 MIL standard[1, 2]에 따라 설계하는 경우가 많다. 특히 각 장비의 운용 환경 및 전자장비의 특성상 취약한 온도의 고저, 먼지, 습기 등 다양한 위험요소를 극복할 수 있는 설계가 반드시 필수적이다.

다양한 환경 영향중 강우나 습기 등 습도에 의한 전자장비의 영향은 치명적이며 이를 극복하기 위해 군용 열상장비는 내외부가 명확히 분리되는 폐쇄적인 구조로 설계된다. 때문에 반도체 소자 등 많은 발열소자가 있음에도 불구하고 PC와 같이 내 외부 공기 순환을 위한 홀을 추가하지 않고 단순히 장비의 케이스에 의해 전도열이 방출되는 구조로 설계되며 MIL standard에 따른 환경시험에서는 이를 확인하기 위해 강우, 습도, 염수분무 시험 등 밀봉여부에 대한 등 다양한 시험을 진행하여 장비 내, 외부가 차단되는지 확인한다.

본 논문의 개선 대상 장비 또한 군용 열상장비로 앞 절과 같은 환경요인을 극복해야 하기 때문에 외부의 공기 유입이 완전히 차단되는 밀폐 구조로 설계되나 전자장비의 특성상 발생 할 수밖에 없는 내부 열원들을 방출 및 견고함을 동시에 만족하기 위해 외부 케이스는 알루미늄으로 제작되어 장비 내부에서 발생한 열들이 대류현상에 의해 알루미늄 케이스를 통해 방출하도록 설계되어 있다.



Fig. 1. target equipment shape

분석대상 장비는 설계시 검토된 MTTF에 상대적으로 대비 고장이 자주 빨리 발생하는 것으로 실제 장비 운용간 확인되었으며 이는 다양한 원인에 의해 발생할 수 있다고 판단되나 외부에 노출되어 사용되는 장비의 특성상

열에 조점을 맞췄으며 여러 원인 중 하나인 내부 열을 방출하는 방열구조에 대한 분석을 통해 보다 MTTF를 개선할 수 있는 방안을 확인하고자 한다.

2.2 방열구조 분석 방법

현재 장비 설계상 방열구조의 문제점을 확인하고 개선방향을 분석하기 위해 대상 장비의 방열구조를 분석하였다. 방열구조의 분석은 주로 열분석용으로 널리 사용되는 툴인 하나인 ANSYS ICEPAK를 사용하여 분석[7, 8]하였으며 보다 정확한 분석을 위하여 대상 장비의 구성품들을 최대한 세분화 하여 14,253,712개의 엘리먼트와 14,628,428개의 노드로 대상 장비를 모델링 하였다.

모델링의 결과에 실제 장비와 근접한 결과를 산출하기 위해 각 부품들의 재질을 분석하였으며 대부분 알루미늄 재질로 구성됨을 파악하였고 각 부품의 두께나 전도율을 계산하여 아래 그림 2와 같이 모델링에 각 부품별 열전도 계수를 적용하였다.

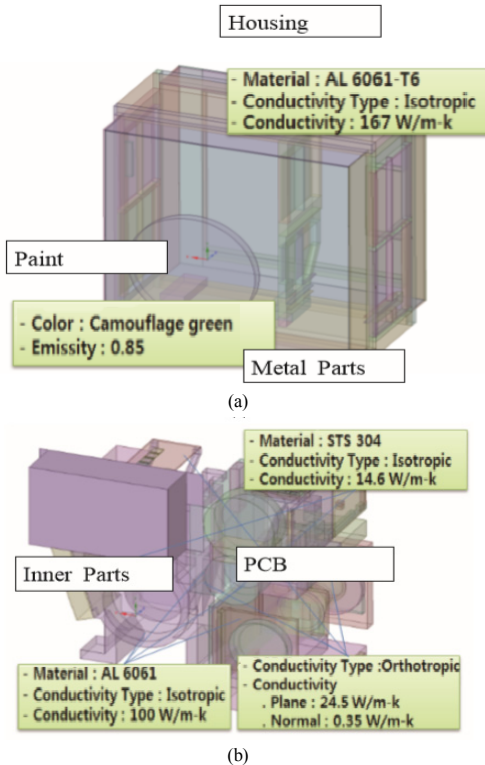


Fig. 2. target model for analysis
(a)outside model (b)inside model

모델링에서 외부 케이스의 경우에는 재질은 알루미늄으로 구성되나 환경특성상 태양광 주로 받으므로 이를 가정하여 태양복사에너지의 열전달에 영향을 미치는 요소인 케이스의 페인트 색상에 따른 방사율(Emissivity)로 0.85를 적용하였다.

모델링 파일에 실제 장비에 보다 근접한 모델링을 수행하기 위해 각 부품에 대한 발열여부 확인 및 발열 정도를 측정하였으며 이에 따라 파악한 17가지 발열부품에 대해 실제 온도측정 데이터를 바탕으로 계산한 발열량을 적용하였다.

대상 장비는 주로 외부환경에 그대로 노출된 상태로 사용하기 때문에 방열에 최악의 조건인 여름철 외부환경에 노출됨을 가정하여 시뮬레이션 환경을 설정하였으며 대기온도를 관련 자료를 참고하여 43℃로 설정하고 장비가 노출된 태양직사광선은 직사광 839.043w/m² 및 반사광 118.926w/m²을 바탕으로 957.969w/m²를 적용하여 태양광의 직접적인 노출 정도를 설정하였다.

2.3 대상장비 방열구조 분석 결과

시뮬레이션 환경의 열분석 결과는 다양한 방법으로 표현 및 분석이 가능하나 장비 내부의 전반적인 열분포를 확인 할 수 있도록 장비의 중심으로부터 세로로 가른 형태로 열 분포 경향을 확인하였다. 시뮬레이션 결과는 아래 Fig. 3, Fig. 4와 같다.

열분석 시뮬레이션 결과 특정 부위에 고온이 발생함을 확인 하였고 이를 확인한 결과 검출기를 냉각시키기 위한 냉각기의 워엔드(Warm end) 부분이 78.2267℃로 가장 온도가 높은 부위임을 확인 하였다. 이러한 현상의 이유는 냉각기 내부의 헬륨가스가 응축, 분사되며 냉각기 내부에서는 마찰열이 발생하게 되는데 여기서 발생한 열들이 모이는 부분이 워엔드 이기 때문이다.

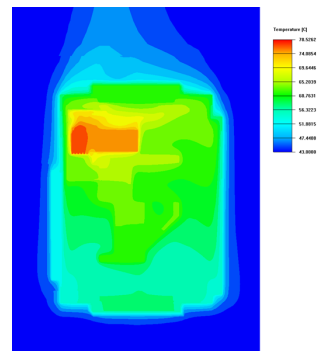


Fig. 3. target equipment simulation result

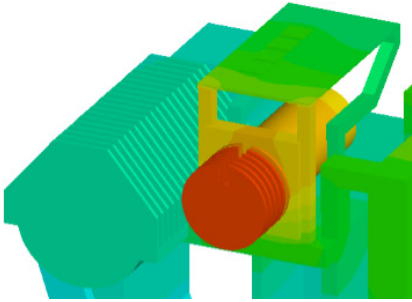


Fig. 4. temperature analysis of cryogenic cooler(warm end part)

확인된 내부 열에 대해 MTTF의 연관성을 확인하였으며 그에 따른 MTTF의 변화 예측치를 계산하였다. 기존의 설계 상 장비 내부의 온도가 49°C의 경우 MTTF가 16000이라고 가정하였을 때 원제작사의 성능 기준서를 참고하여 해당 장비에 사용되는 냉각기의 특성상 on/off 횟수에 따른 MTTF의 변화가 큰 것으로 확인하였으며 이는 유사한 연구결과에서도 확인 가능한 사항이다.

MTTF의 예측을 위해서는 일반적으로 연속동작 실험에 의한 샘플들을 바탕으로 분석 및 예측을 하는 것이 일반적이다. 그러나 본 논문에서는 해당제품의 샘플들에 대한 시험이 아닌 온도변화에 따른 MTTF변화량을 확인하는 것으로 냉각기의 샘플이 없어 기본적인 분석은 불가능 하며 on/off횟수와 MTTF의 변화량에 연관성이 있다는 부분에 착안하여 on/off시 발생하는 전력량에 따른 MTTF의 상관관계를 계산하는 watt-hour 방식[6]으로 계산 하였다.

위 방법에 따른 MTTF계산 결과 장비 설계 및 현 운용상태의 MTTF는 16000시간 이어야 하나 온도증가로 인한 시간당 소모 전력이 증가하므로 이에 따라 계산한 MTTF는 15748.74시간으로 약 251시간 감소되는 것으로 분석되었다.

3. 방열구조 개선 및 효과분석

3.1 방열구조 개선방법

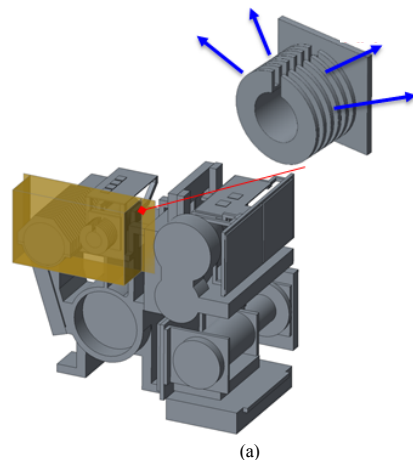
분석한 시뮬레이션결과에 따라 장비 내부 냉각이 워옼드 부위의 온도로 인해 목표로 하는 MTTF대비 MTTF가 저하되는 문제가 있으며 운용온도대비 높은 온도로 인해 고장 가능성이 있음을 확인하였다. 따라서 소

비전력의 감소를 통해 MTTF를 증가시키고 장비의 고장 가능성을 낮추기 위해 워옼드 부위의 온도를 감소시키는 방향으로 장비 내부의 방열구조를 개선하였다.

기존 장비 내부의 온도분포 및 설계적인 분석 결과 워옼드 부위의 온도는 장비 내에서 가장 높은 것으로 확인되나 이를 방출하기 위한 방열하는 구조는 장비 내부의 공기에 의해 방출하는 대류에 의한 방법 밖에는 없기 때문에 워옼드 부위의 온도를 쉽게 방출하지 못하는 관계로 효과적인 방열구조로 이루어 졌다 판단하기 어렵다. 물론 이러한 특징은 군용장비의 특성에 따른 것이며 이러한 군용 장비의 특성을 해치지 않으면서도 워옼드 부위의 열을 방출하는 방법을 검토하였다.

이에 따른 개선 방법으로 워옼드 부위의 온도를 낮추기 위해 기존의 대류에 의한 열 방출 방식에서 전도에 의한 열 방출 방식으로 개선하였다. 일반적으로 대류에 의한 열 방출 보다 전도에 의한 열 방출 효율이 높으며 장비의 특성상 외부 케이스와의 전도성 물질에 의해 열을 방출 할 수 있다면 워옼드 부위의 온도가 보다 낮아질 것으로 기대하였다.

장비의 설계적인 부분에서 냉각기 워옼드 부위의 전면에 EMI차폐금속판이 존재하며 그 앞은 바로 외부 케이스로 구성되어 있고 이들 사이는 10mm의 간격이 있다. 제안하는 열 방출 방식은 이들 사이를 구조적으로 견고한 전도체인 알루미늄 블록으로 연결하여 개선하는 것으로 개선 전 후의 구조는 아래 Fig. 5와 같다.



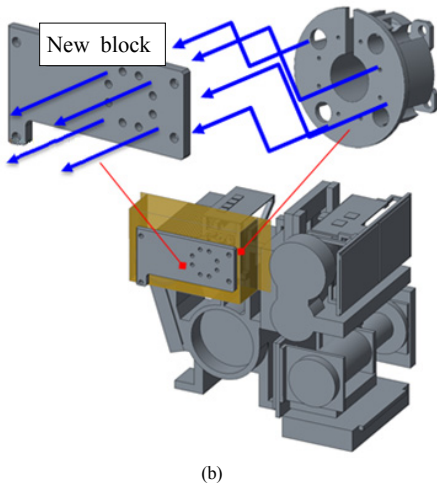


Fig. 5. improvement result
(a) Before improvement (b) After improvement

신규블럭이 추가됨으로 장비의 총 중량이 약 400g정도 증가하게 되나 외부 케이스와의 접촉면적을 늘어나 보다 효과적인 장비외부부의 전도가 일어날 수 있도록 추가적인 전도성 블럭에 대한 설계를 수행하였으며 이를 통해 기존의 대류에 의한 열 방출에 비해 전도에 의한 열 방출을 수행하게 됨으로 보다 효과적인 열 방출 성능을 보일 것으로 판단된다.

3.2 개선장비 방열구조 분석 방법

제안한 방열구조 개선에 대한 개선전 대비 효과도를 분석하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션은 개선 전 시뮬레이션 수행의 장비 내부 발열량과 열전도 계수 등을 동일하게 설정하여 개선으로 인한 효과의 비교가 가능하게 하였으며 외기온도 및 태양복사량도 동일하게 43℃ 및 957.969w/m²를 적용하였다.

3.3 개선장비 방열구조 분석 결과

개선한 장비에 대한 방열구조의 시뮬레이션 분석결과를 확인하기 위해 앞서 개선 전 분석한 방법과 동일하게 장비를 세로로 자른 형태의 열 분포를 확인하여 경향을 확인 하였다. 시뮬레이션 결과는 아래 Fig. 6과 같다.

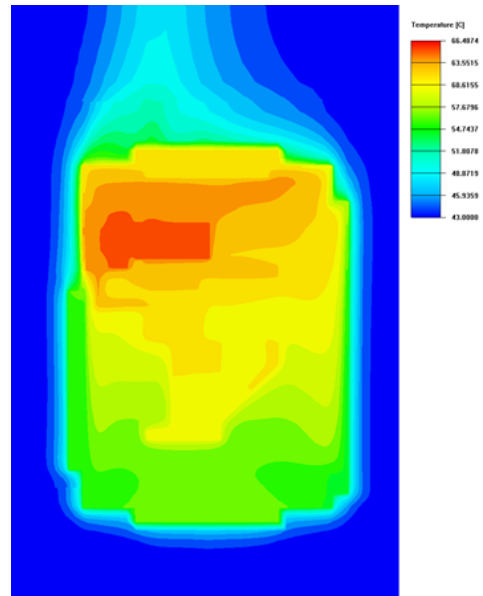


Fig. 6. improved target equipment simulation result

개선 전 장비와 동일하게 냉각기 워엔드 부위의 발열량이 여전히 다른 부위보다 큰 것을 확인할 수 있으나 워엔드 부위에만 뭉쳐있던 열이 전도에 의해 발산함에 따라 전체적으로 분산되어 있음을 확인할 수 있다. 또한 이로 인해 워엔드 부위의 최고 온도가 66.4874℃로 개선 전 대비 약 12℃정도 감소하는 효과를 확인하였다. 또한 이로 부터 개선된 MTTF의 예측치는 개선 전 대비 약 103시간 증가한 15851.02시간이다. 아래 표는 개선 전후를 비교한 결과표이다.

Table 1. Result : before and after improvement

Spec.	power consume	Max Temperature	Estimated MTTF
Before improvement	353.33w	78.2267℃	15748.74hr
After improvement	349.38w	66.4874℃	15851.02hr

4. 결론

본 논문에서는 열상장비의 외부 환경 노출에 따른 내부 온도에 대한 분석을 수행하고 온도에 따른 MTTF의 영향에 대하여 확인하였다. 따라서 기존 장비의 내부 온

도 악영향을 개선하기 위한 방법으로 내부 열을 방출 시킬 수 있도록 구조를 개선하였으며 개선 전후의 비교를 통해 내부 온도 감소 효과 및 MTTF 증가 가능성을 확인하였다. 이를 위해 현재 사용중인 장비에 대한 구조 및 열분석을 수행 하였으며 이에 따른 개선 방법을 도출하여 실제데이터 기반의 시뮬레이션을 수행함으로써 제안하는 개선방열구조는 기존에 비해 약12도 정도의 온도 감소 효과와 103시간 정도 MTTF의 증가 효과가 있는 것으로 분석하였다.

정 윤 식(Yunsik Jung)

[정회원]



- 2007년 2월 : 한양대학교 전자전기 제어계측공학과 (석사)
- 2013년 2월 : 한양대학교 대학원 전자전기제어계측공학과 (박사)
- 2012년 12월 ~ 현재 : 국방기술품질원 선임연구원

<관심분야>

영상처리, 영상표적탐지, 전자광학기구 설계구조

References

- [1] MIL-STD-810G : Environmental Engineering Consideration and Laboratory Test, Development Test Command(DTC), 15 April, 2014.
- [2] MIL-STD-461G : Requirement for The Control of Electromagnetic Interference Characteristic of Subsystem and Equipment., Development Test Command(DTC), 11 December, 2015.
- [3] A Veprik, S. Riabzev, N Avishay, D Oster, A Tuitto. "Linear cryogenic coolers for HOT infrared detectors", *Proc. SPIE 8353, Infrared Technology and Applications XXXVII, 83531V*, May, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1117/12.921217>
- [4] D.T. Kuo, A.S. Loc, T.D. Lody and S.W.K. Yuan. "Cryocooler Life Estimation and its correlation with experimental data", *Advances in Cryogenic engineering conference 45*, NY, pp. 267-273, 1999.
- [5] B. Boshe, A. Fills, N. Pundak, Z. B. Halm, G. C. Eyal, "Ricor's K508N highly reliable integral rotary cryogenic cooler", *Proc. of SPIE 2010*.
DOI: <https://doi.org/10.1117/12.884218>
- [6] Miskimins, Scott, Estimating SADA II Coolers Life, private communication.
- [7] ANSYS ICEPAK 12.0 User's Guide, Fluent Inc., 2009.
- [8] ANSYS ICEPAK 12.0 Theory Guide, Fluent Inc., 2009