

항공기용 탐조등 적외선 투과 유리의 열응력 파손 현상 개선 연구

서영진*, 정상규
국방기술품질원

The Study on Improvement of Thermal Stress Breakage in Infrared Transmissive Glass for Aircraft Searchlight

Young-Jin Seo*, Sang-Gyu Jeong
Defence Agency for Technology and Quality

요 약 항공기용 탐조등은 야간 임무 수행 시 탐색 또는 구조 임무에 사용되며, 은폐 상태를 유지하며 작전을 수행할 수 있도록 적외선 광을 제공한다. A기종 회전의 항공기 운용 중에, 적외선 생성을 위한 적외선 투과 필터 유리가 파손되는 현상이 다수 발생하였으며, 이로 인해 은폐능력이 상실되고 정비 소요가 발생하는 등의 문제점이 제기되었다. 본 논문에서는 해당 결함이 발생하는 탐조등의 운용 조건을 시험하고, 그에 따른 결함 원인을 도출한 과정을 기술하였다. 그리고 도출된 원인을 개선하기 위한 여러 가지 방안과 개선 필터 시제품 제작 과정을 정리하였다. 또한 개선된 필터가 장착된 탐조등에 대해 성능 시험, 내구성 시험, 항공기 장착시험을 통해 탐조등의 규격에서 제시하는 성능 요구를 만족하는지 검증한 결과를 기술하였다. 시험 및 검증 결과 필터의 파손 현상이 개선되었으며, A 기종 항공기에 개선 필터를 적용한 결과 파손 현상이 더 이상 발생하지 않는 것을 확인하였다.

Abstract Aircraft searchlights are used in search or rescue missions when performing night missions, and provide infrared light to keep operations in concealment. During aircraft operation, the infrared ray transmission filter glass for generating infrared rays can break, resulting in problems such as loss of concealment ability and maintenance. In this paper, we describe the procedure for testing the operating conditions of the searchlight when the defect occurs and finding the cause of the defect. We also summarize various methods to improve the cause and process of making the improved filter prototype. In addition, we also describe the results of verifying the performance requirements of the searchlight. As a result of the test and verification, the damage of the filter was improved and the improved filter was applied to the aircraft.

Keywords : Aircraft, Fracture Mirror, Glass Filter, Searchlight, Thermal Stress Breakage

1. 서 론

항공기용 탐조등은 작전 수행 중 야간 또는 시야확보가 불가능한 경우 탐색 또는 구조 임무를 수행하기 위해 사용된다[1]. A 기종 항공기에 장착된 탐조등의 형상은 Fig. 1과 같으며 항공기 전방 하부에 1기가 장착되어 운용된다. 원 형태의 광원부에 램프가 장착되어 있고, 램프의 빛은 오목거울 형태의 반사 갖에 반사되어 전방으로

빛을 조사한다.

탐조등은 가시광선 모드와 적외선 모드를 선택할 수 있으며, 적외선을 방출하기 위해 중앙 1개의 램프 전면에는 적외선 투과 필터 유리가 장착된다. 적외선 모드 선택 시 적외선 투과 필터는 램프에서 방출되는 가시광선을 차단하고 780nm 이상의 적외선 파장대만 투과시켜 적외선 빛을 생성한다.

*Corresponding Author : Young-Jin Seo(Defence Agency for Technology and Quality)

Tel: +82-10-5123-4867 email: mulle0514@dtaq.re.kr

Received August 6, 2018

Revised September 5, 2018

Accepted November 2, 2018

Published November 30, 2018



Fig. 1. Aircraft Searchlight

야전에서 운용 중인 A 기종 항공기에서 탐조등 적외선 투과 필터 유리의 파손 현상이 다수 발생하였으며, 이로 인해 은폐능력이 상실되고 정비 소요가 발생하는 등의 문제점이 제기되었다. 본 연구에서는 해당 결함에 대한 원인 식별 및 그에 따른 개선 방안을 도출하였다. 개선된 필터를 적용한 탐조등이 단품 시험 및 항공기 장착 시험을 통해 요구되는 성능을 만족하면서 파손 현상이 개선되는지를 검증하였다.

2. 본 론

2.1 결함 현상 개요

A 기종 항공기 운용 부대에서 탐조등 작동점검 중에 Fig. 2와 같이 탐조등의 적외선 방출부에서 실금 형상의 가시광선 빛이 나오는 것을 발견하였다. 탐조등의 전면 유리를 제거하고 내부 확인 결과 적외선 투과 필터 유리에서 파손이 발생하였고, 파손된 틈 사이로 램프의 빛이 새어나오는 것을 확인하였다. 최초로 파손 현상을 인지한 이후 운용 중인 항공기 전체를 대상으로 일시검사를 수행한 결과 동일 결함이 항공기의 운용 조건 및 환경에 관계없이 다수의 항공기에서 동일 결함이 발생되었음을 확인하였다. (결함 발생률 : 63%)

탐조등 적외선 투과필터 파손 발생 시 영향성을 살펴보면, 필터 파손에 따른 가시광선 방출로 야간 임무수행 시 은폐 능력을 상실할 수 있다. 또한 필터 교체가 필요함에 따라 정비 소요가 추가로 발생하게 된다. 따라서 파손 현상의 근본 원인을 분석하고 개선이 필요하였다.



Fig. 2. The Crack of IR Transmission Filter

2.2 결함 원인 분석

2.2.1 유리 특성 분석

탐조등에 사용되는 적외선 투과필터 유리는 중국 B사에서 제작한 필터 유리를 사용하였다. 이 유리의 특성은 데이터 시트 기준으로 전이온도가 534°C, 열팽창계수는 11.1×10^{-6} 이다[1]. 유리 전이점은 유리의 특성이 급격하게 변화하는 온도를 나타내며, 온도가 1°C 상승할 때 물질이 팽창하는 비율을 열팽창 계수로 정의한다. 유리 특성을 세라믹 소재 시험분석 분야의 국제공인 시험기관(KOLAS)에 의뢰하여 검증해 본 결과, 전이점은 556°C, 열팽창 계수는 11.02×10^{-6} 으로 데이터시트에 제시된 값을 만족하는 것을 확인하였다.

2.2.2 결함 재현 시험

결함 원인을 분석하기 위해 탐조등의 일반적인 운용 상태에서 결함 재현 시험을 수행하였다. 12개의 필터 유리 시료에 대해 탐조등 적외선 모드 동작 중에 파손 현상이 발생하는지 확인하였다. 시험 결과 12개 시료 중 9개에 대해 파손이 발생하였으며, 파손된 시료는 시험 시작 4분 이내에 파손이 발생하였다.

시험 결과 탐조등 램프를 일정 시간 이상 켜 놓은 조건에서 결함이 발생하였음을 확인하였다. 탐조등의 적외선 모드에서는 Fig. 3과 같이 램프의 빛이 반사 갖에 반

사되어 유리의 중앙부로 많은 빛이 방출된다. 램프에서 나오는 780nm 이하 파장의 가시광선은 필터 유리가 흡수하여 열에너지로 변환되기 때문에, 중앙부로 많은 빛이 방출된다는 것은 중앙부의 온도가 가장자리부보다 더 크다는 것을 의미한다.

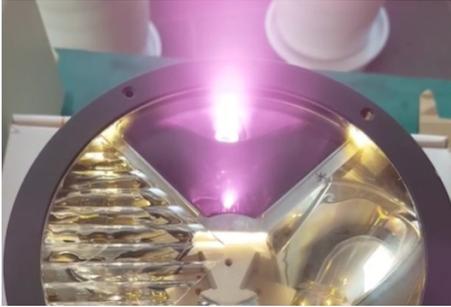


Fig. 3. IR Light Emission of Searchlight

탐조등 작동 중에 적외선 필터의 위치 별 실제 온도 차이를 확인하기 위해 측정 시험을 수행하였다. 측정 시험은 Datum-Y XL-100 기기로 측정하였으며, 해당 기기는 1768°C까지 측정 가능하며 정확도는 측정값의 ±0.05%이다. 탐조등을 30분 작동하여 온도가 포화되었을 때 그 결과 Table 1의 결과를 도출하였다.

Table 1. Searchlight Temperature during Operation

Measurement Location	Temperature
Center of Filter	512.0°C
Edge of Filter	387.1°C

2.2.3 열응력 현상 분석

Table 1의 온도 측정 결과에서 탐조등 운용 시에 유리 중앙부의 온도가 가장 높고 가장자리로 갈수록 온도가 떨어지는 불균일한 온도 분포를 보이게 된다. 이와 같은 불균일한 온도 분포에서 유리의 고온 부위(중앙)는 크게 열팽창을 하게 되고, 저온 부위(가장자리)는 비교적 작게 팽창하면서 고온 부분의 열팽창을 구속하게 되어 가장자리 부분에 인장응력이 발생하게 된다. 이 인장응력이 유리 가장자리의 강도를 초과하면 유리에 파손이 발생할 수 있는데 이를 열응력에 의한 파손 현상이라 한다[3].

열응력에 의해 유리가 파손되는 경우 Fig. 4에 나타낸 것과 같이 주로 유리의 가장자리에서 시작되며, 가장자

리 면과 유리 표면에 직각으로 파손이 시작된다. 그리고 열응력의 크기가 작은 경우는 시작점에서 하나의 균열 선으로 확산되며, 크기가 큰 경우는 하나의 균열선이 여러 개로 분기되어 확산된다[4].

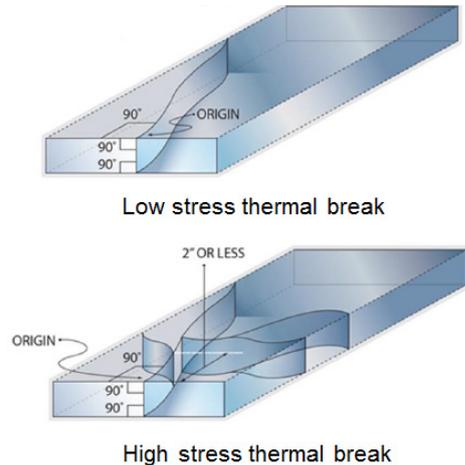


Fig. 4. Example of Thermal Stress Breakage

일반적으로 유리 균열의 시작점에서는 Fracture mirror 형상이 나타난다. Fracture mirror는 유리 균열 시작점의 단면에서 상대적으로 부드러운 표면의 영역을 의미한다. 일반적으로 균열 선 중에서 하나만 존재하며 원 또는 반원 형태를 나타낸다[5].

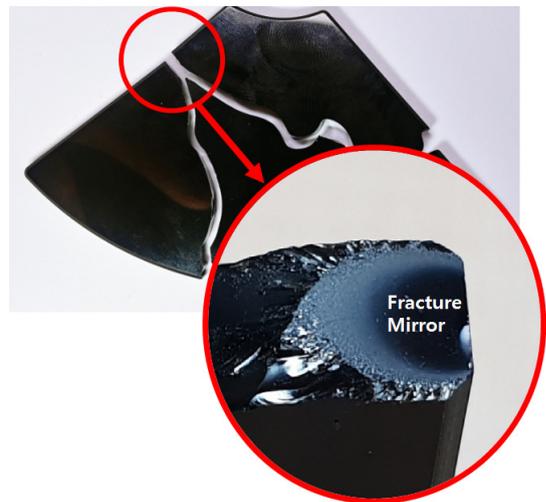


Fig. 5. Fracture Mirror in IR Filter

파손된 필터 유리의 단면을 살펴보면 Fig. 5와 같이 Fracture mirror가 형성되었음을 확인할 수 있다. Fracture mirror의 위치는 유리의 가장자리부로, 파손이 가장자리에서부터 시작되었음을 알 수 있다.

파손이 발생한 필터 유리의 형태는 Fig. 6과 같다. 균열 형태를 살펴보면 가장자리의 유리 파손 시작부위는 가장자리 면과 유리 표면에 직각이며, 여러 갈래로 분기되어 균열이 진행되는 것을 확인할 수 있다. 이는 강한 크기의 열응력에 의한 유리의 파손 특징을 드러낸다.



Fig. 6. The Shape of IR Filter Breakage

이처럼 열응력에 의한 파손은 유리의 가장자리에서부터 시작되기 때문에 가장자리 부분의 가공 상태가 중요한 요소이다. 가장자리에 미세 균열이 있다면 그 부위의 파손 임계 강도가 줄어들게 되며, 열응력이 낮아진 임계 강도에 도달하면 미세 균열을 시작점으로 파손이 일어나게 된다. 그러므로 유리 제조 과정에서 가장자리 부분의 결함이 최소화되도록 해야 한다[6].

그러나 Fig. 7과 같이 생산 투입 대기 중이던 탐조등 필터 유리를 무작위로 채취하여 표면을 현미경으로 확대해 본 결과 유리의 가장자리부에 작은 미세 균열이 다수 존재하는 것을 알 수 있었다. 미세 균열은 필터 유리 원 제작사의 유리 절단 공정에서 품질관리가 미흡하여 발생하였으며, 추가적인 표면 가공 공정이 없었기 때문에 미세 균열을 가진 유리가 그대로 탐조등에 적용되어왔음을 확인하였다.

따라서 탐조등 필터 유리 파손의 원인은 가장자리부의 미세 균열로 인해 낮아진 파손 임계 강도보다, 중앙부와 가장자리부의 온도 차이에 의한 열응력이 커지게 되어 파손이 발생한 것으로 결론 내렸다.

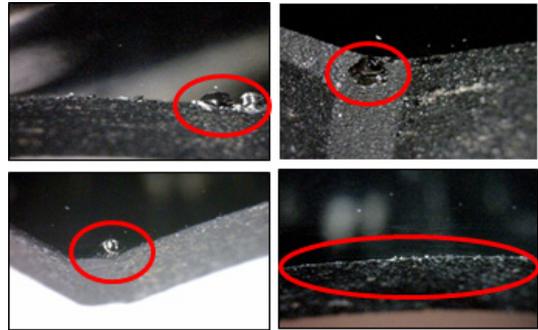


Fig. 7. Microcrack in the IR Filter

2.3 결함 개선 방안

지금까지 확인된 원인을 바탕으로 개선 방안을 수립하였다. 첫 번째는 필터 유리에 가해지는 열응력 영향성을 줄이는 방법이며, 두 번째는 필터 유리의 표면 품질을 개선하는 방법이다.

먼저 열응력 계산식을 통해 열응력 영향성을 분석하였다. 열응력은 식(1)을 통해 산출한다.

$$\text{열응력}(\sigma) = E\alpha\Delta T \quad (1)$$

여기서, E : 탄성계수

α : 열팽창 계수

ΔT : 온도 변화량

위 식에서 열응력은 재료의 열팽창 계수와 온도 변화량에 비례함을 알 수 있다. 따라서 온도 변화량을 낮추기 위해서는 탐조등 램프의 전력 소모를 낮추는 방안이 있다. 하지만 탐조등의 규격에서 정하는 광도를 만족하기 위해서는 전력 소모를 낮추는 것이 불가능하였다. 이에 따라 온도 변화량을 낮추는 것은 개선 방안에서 제외하였다.

따라서 열팽창 계수가 낮은 재료의 필터로 교체하는 것으로 개선을 수행하였다. 개선 필터는 적외선 투과 특성을 고려하여 두 종의 신규 필터를 검토하였다. 기존 필터와 신규 필터의 특성은 Table 2와 같다.

Table 2. Comparison of Filter Characteristic

Filter	A(Present)	B(New)	C(New)
Transition Temperature	536°C	552°C	1,150°C
Coefficient of Expansion	11.1×10 ⁻⁶	10.5×10 ⁻⁶	1.6×10 ⁻⁶

두 재료를 이용해 필터를 제작하여 시험해 본 결과 B 필터의 경우 Fig. 8과 같이 점등 후 59초 뒤에 열응력에 의한 파손 현상이 재발되어 부적합하다고 판단하였다. 반면 C 필터의 경우는 30분 이상의 점등 시험에도 파손이 발생하지 않아 개선 필터로 적합하다는 결론 내렸다.



Fig. 8. The Test Result of Alternative Filter

두 번째 개선 방안으로는 표면 품질 개선이 있다. 앞서 제시한 바와 같이 표면의 미세 균열은 열응력에 의한 파손의 시작점이 될 수 있기 때문에 표면의 미세 균열을 제거하는 것이 매우 중요하다.

따라서 대체 필터로 적합하다고 판단한 C 필터의 가공공정을 개선하였다. 먼저 필터를 부채꼴 형태로 제작하는 과정은 워터젯으로 절단을 수행하고, CNC(Computerized Numerical Control, 컴퓨터 수치제어)를 통해 정밀 가공을 수행하였다. 그 결과 필터 표면의 품질이 Fig. 9와 같이 향상되었다.

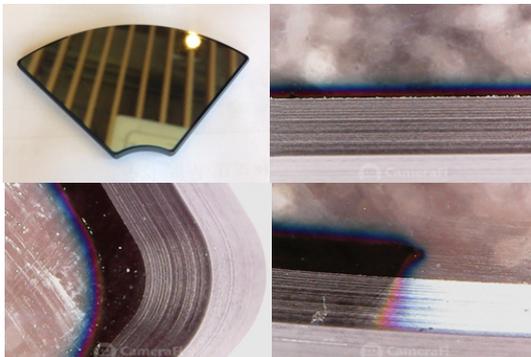


Fig. 9. The Result of Filter Surface Improvement

2.4 개선의 검증

탐조등 필터 개선 제품 적용에 따라 탐조등의 기존 성능은 만족하면서 파손 현상이 개선되는지 검증하였다. 탐조등의 내구성 및 성능 조건은 탐조등 국방규격에서 정의하고 있으며, 그 중 적외선 기능 관련 성능은 ARP4392 규격의 탐조등 요구조건인 광도, 적외선 방사 강도를 만족하여야 한다고 요구하고 있다[7,8].

개선품의 성능을 검증하기 위해 먼저 탐조등 내구성 시험을 수행하였다. 내구성 시험은 정상 운용 조건에서 1Cycle당 적외선 모드 30분 점등, 30분 소등으로 총 100Cycle을 수행하였으며, 총 3000분의 점등 시간 동안 투과 필터가 양호한지 시험하였다. 시험 결과 필터 유리에서 파손 현상이 발생하지 않았으며, 기존의 결함 현상이 개선되었음을 확인하였다.

내구성 시험이 완료된 이후, 탐조등 적외선 관련 규격인 광도와 적외선 방사 강도를 만족하는지 측정하였다. 해당 시험은 광학 분야의 국제공인 시험기관(KOLAS)에 의뢰하여 수행하였으며, 시험 결과 Table 3과 같이 성능조건을 모두 만족하는 것을 확인하였다.

Table 3. The Result of Test Related to IR

	Requirement	Measurement	Result
Luminous Intensity	Below 0.0 Candela	0.57 Candela	Pass
NVIS Radiation Intensity	Above 0.0 W/sr	10.3 W/sr	Pass

구성품 단위 검증이 완료된 탐조등을 항공기에 장착하여 적외선 모드에서 밝기에 대한 검증을 수행하였다. 시험은 시험비행 조종사가 수행하였으며, 신규 필터가 적용된 탐조등의 적외선 모드를 암실에서 운용해보고 기존의 탐조등과 비교하여 차이가 있는지를 확인하였다. 조종사 평가 결과 기존 탐조등과 비교 시 동등 이상의 밝기 및 성능이 확인되며 운용 상 제한사항이 없음을 확인하였다.

개선품은 운용 중인 A 기종 항공기를 대상으로 적용되었으며, 동일한 파손 현상이 더 이상 발생하지 않았다. 따라서 기존 필터의 결함 발생률이 63%이었던 것 과 비교하여 결함 발생률이 낮아지고, 품질이 크게 향상되었다.

3. 결론

본 연구에서는 회전익 항공기용 탐조등의 운용 중 발생된 적외선 투과필터 유리 파손 현상을 개선하기 위한 원인 분석, 도출된 원인에 따른 개선안 수립 및 시제품 제작, 시험평가가 수행 결과를 기술하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

1. 탐조등 적외선 모드에서는 적외선 필터 유리의 가장자리부와 중앙부가 100°C 이상의 온도차가 발생하였고, 불균일한 온도차는 필터 유리의 열팽창 크기 차이를 유발하여 열응력이 발생하였다.
2. 유리 균열의 시작점에서는 일반적으로 Fracture mirror 형상이 나타나며, 파손된 필터 유리의 단면에서는 Fracture mirror가 유리의 가장자리부에 형성되어, 파손이 유리의 가장자리에서부터 시작되었음을 알 수 있었다.
3. 유리 절단 공정에서 품질관리 미흡으로 발생한 유리 가장자리부의 미세 균열은 유리의 파손 임계 강도를 낮추기 때문에 열응력에 의한 파손을 촉진시킬 수 있다. 본 연구에서도 필터 유리의 표면에서 다수의 미세 균열이 발견되어 열응력에 의한 파손을 유발하였음을 확인하였다.
4. 필터 유리 파손 현상의 개선 방안으로 열응력 영향을 줄이기 위해 열팽창계수가 낮은 유리를 대체하는 방법이 제시되었다. 또한 유리 가공공정 개선을 통해 유리 가장자리 표면에 미세 균열이 없도록 하였다. 그 결과 전체의 63%에서 발생했던 필터 유리 파손이 더 이상 발생하지 않았다. 이는 열팽창계수가 작고 표면 품질이 양호한 유리는 열응력에 의한 파손을 개선할 수 있음을 의미한다.

References

- [1] K. J. Kim, S. H. Lee, W. Y. Choi, K. K. Min, "Research on the aging helicopter lifespan and operation management", pp. 47, Security Management Institute, 2017.
- [2] Baode optical, Characteristic of HWB780, http://www.ygofg.com/products/Cut_off/Infrared_glass/42.htm, Baode optical, July, 2018.
- [3] J. G. Shin, W. J. Hwang, W. K. Choi, "A Study on the Thermal Breakage Phenomenon of Glazing", The Society of Air-conditioning and Refrigerator Engineering of Korea, Vol11, No.1 pp. 1180-1184, 2011.

- [4] Vitro Architectural Glass, "Glass Breakage - Failure Mode and Stress Estimation", Vitro Architectural Glass, pp. 4-5, 2016.
- [5] D. Quinn, "Fractography of Ceramics and Glasses", pp. 5-3 - 5-30, U.S.Department of Commerce, 2016.
- [6] S. S. Lee, K. S. Park, K. W. Bae, "Causes of Glass Breakage", Korean Society of Steel Construction, Vol.2, No.5 pp. 58-63, 2010.
- [7] SAE International, "ARP4392(Lighting, Aircraft Exterior, Night Vision Imaging System(NVIS) Compatible)", pp. 6, 2016.
- [8] KDS 6220-4007, "LIGHT, LANDING, AIRCRAFT/LIGHT, SEARCH", Defense Acquisition Program Administration, 2013.

서 영 진(Young Jin Seo)

[정회원]



- 2018년 2월 : 경상대학교 정보과학과 (공학석사)
- 2014년 8월 ~ 현재 : 국방기술품절원 연구원

<관심분야>

항공전자, 국방 소프트웨어

정 상 규(Sang Gyu Jeong)

[정회원]



- 2013년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 공학석사
- 2013년 3월 ~ 현재 : 국방기술품절원 연구원

<관심분야>

임베디드 시스템, 센서 네트워크