

야간투시경용 영상증폭관(KIT-7)의 가속수명시험에 관한 연구

김성민*, 박정원*, 함중걸*, 김광연**

*한국산업기술시험원, **(주)오이티

A STUDY ON THE ACCELERATED LIFE TESTS OF IMAGE INTENSIFIER ASSEMBLY(KIT-7)

Sung-Min Kim*, Jung-Won Park*, Jung-Keol Ham*, Kwang-Youn Kim**

*Korea Testing Laboratory, **Opto Electronics Technologies

Abstract

The accelerated life tests(ALTs) and degradation characteristics of image intensifier assembly(KIT-7) under low illuminance and high temperature were investigated. The accelerated life tests were carried out at 5×10^5 fc - 40 °C, 10×10^5 fc - 40 °C, 5×10^5 fc - 50 °C, 10×10^5 fc - 50 °C and relationship related to illuminance and temperature was used as an accelerated life test model. An ALTA program[6] was used to calculate an acceleration factor and the test of life distribution fit, and estimate three parameters of an life test model. To sum up, MTTF 10,000 h at 5×10^5 fc - 40 °C of image intensifier assembly was certificated.

Keyword : Accelerated life tests(ALTs), Acceleration factor, image intensifier assembly, MTBF, MTTF, FMEA, FTA

1. 서론

영상증폭관은 야간투시경 원가의 최대 80%까지 차지하는 핵심부품이며 일부 선진국(미국, 일본, 프랑스, 러시아)만 생산이 가능한 품목으로서 방위력 증강을 위해 국산화가 요구되고 있다. 영상증폭관의 평균고장시간을 10,000 h, 일일 평균 6 h 사용으로 가정할 경우 최

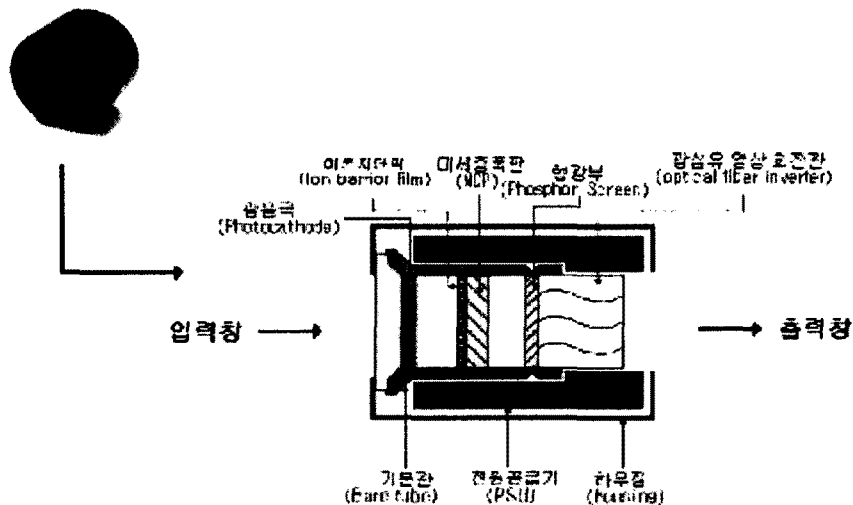
소 5 년에 한번 씩은 영상증폭관을 교체해야 될 것으로 보인다. 현재 보유중인 야간투시경을 약 2 만대로 추정시 연간 정비 기본수요는 4,000 대이며 국방중기계획으로 확정된 신규 물량이 연 3,000 대 수준으로 매년 새로 보급될 것이며 추후 야시장비가 개인 휴대장비 및 전방야간 관측장비 등에도 광범위하게 쓰일 것으로 본다면, 장기적으로는 연간 40,000 대 수준으로 소요 물량이 확대될 것으로 예상된다. 그러므로 연간 최소 200 억원에서 5 년 이후에는 최대 1,000 억원 수준의 수입대체 효과가 발생할 것으로 예상되고 신뢰성 기술 및 신뢰성 향상을 통하여 경쟁력이 확보될 경우, 수출은 기업의 역량에 따라 국내수요를 훨씬 상회할 것이다. 영상증폭관은 추후 군수분야 뿐만 아니라 민수분야로 관련제품의 수요가 꾸준히 확대될 것으로 기대되는 부품으로서, 고진공기술 관련 산업분야와 광학부품 및 소재 관련산업으로의 파급효과가 기대되는 제품이다. 이에 본 연구를 통하여 가속수명시험을 실시하여 영상증폭관의 정상조건에서의 평균수명을 예측하고, 열화 특성에 의한 고장메커니즘을 분석하여 수입대체 및 영상증폭관의 신뢰성 향상에 기여하였다.

2. 야간투시경용 영상증폭관(KIT-7)의 이론적 배경 및 고장분석

2.1 야간투시경용 영상증폭관(KIT-7) 개요

영상증폭관은 어두운 야간의 미약한 가시광선(10^5 lx 수준)을 수만 배로 증폭시켜 육안식별을 가능케 하는 부품으로 야간투시경을 비롯한 각종 야시장비의 핵심 부품이다.

<그림 1>과 같이 야간투시경 내에 조립되는 영상증폭관은 직경 \varnothing 43.0 mm × 높이 31.2 mm 인 원통형으로서 광학부품으로 구성된 내부의 영상증폭부인 기본관(Bare Tube)과 전자회로가 플라스틱에 몰딩된 외부의 전원공급기(PSU)로 크게 구성되어 있다.



<그림 1> 영상증폭관 및 구조도

<표 1> 야간투시경용 영상증폭관 KIT-7 제원

품 명	제 원	적용 장비
영상증폭관 KIT-7	- $\Phi 43$ mm \times H31 mm, 85g - 영상직경 : 18mm	야간투시경 PVS-7 주야간 관측장비 PVS-98K

2.2 고장모드 영향 분석(FMEA) 및 결함나무분석(FTA)

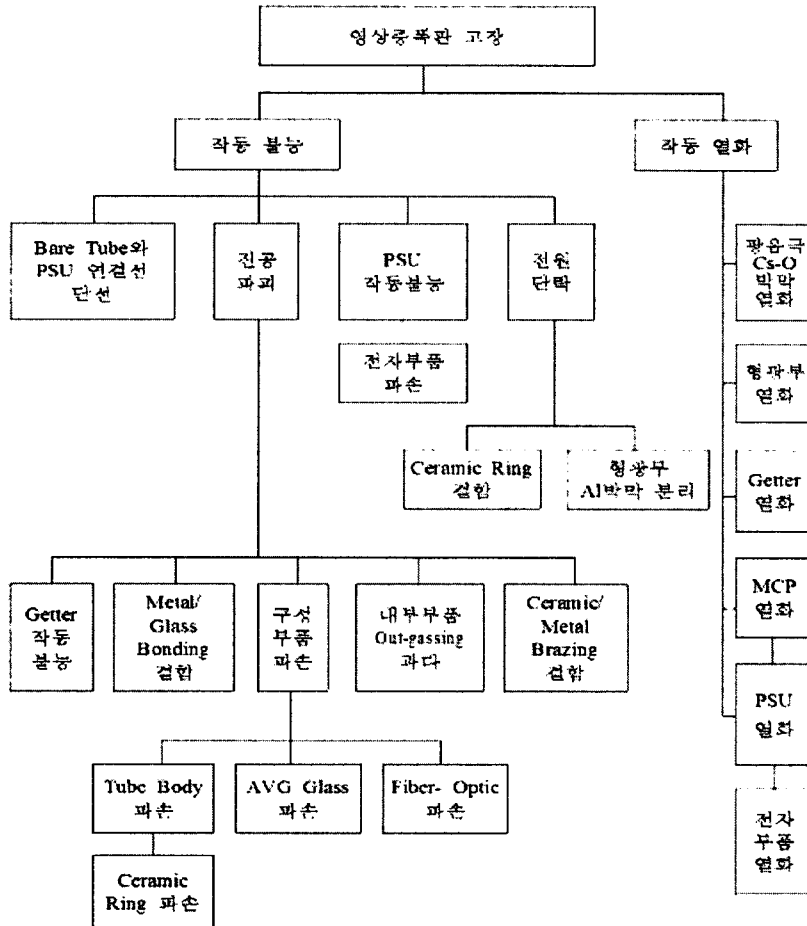
영상증폭관의 고장은 다음과 같은 3가지 경우로 정의한다[4].

- 작동전원이 인가되어도 영상이 나오지 않는 경우
- 영상의 중심 분해능이 18 lp/mm 미만으로 퇴화되는 경우
- 영상의 직경이 17.5 mm 미만으로 축소되는 경우

<표 2> 고장모드 영향 분석(FMEA)

구성 부품		고장 유형	영상증폭관에 미치는 영향
기본관 (Bare Tube)	광음극	AVG Glass	Crack/파손 - Bare Tube의 진공 파괴/작동불능 - 화질 불량
		GaAs Epi-Wafer	Cs-O 박막 열화 - 감도/이득 감소 - 화질 불량
	Tube Body	Metal Ring	Crack/파손 - Bare Tube의 진공 파괴/작동불능
		Ceramic Ring	Crack/파손 - Bare Tube의 진공 파괴/작동불능 - 절연 불량
		Ceramic Metal Brazing	Brazing결합 - Bare Tube의 진공 파괴/작동불능 - 절연 불량
		MCP	Crack/파손 - 화질 불량 - 수명 단축 - 감도/이득 감소 이온막 손상 - 수명 단축
	형광부	형광 박막	분리 - 화질 불량 - 감도/이득 감소
			접착제 Out-gassing - Bare Tube의 진공 파괴/작동불능 - 수명 단축
		Al 박막	분리 - 화질 불량 - 감도/이득 감소
		Fiber Optic	Crack/파손 - Bare Tube의 진공 파괴/작동불능
	Metal/Glass Bonding		Crack/파손 - Bare Tube의 진공 파괴/작동불능
	전원 공급기 (PSU)	전자부품	파손 - 작동 불능 - 오작동
			열화 - 작동성능 저하 - 작동수명 단축
		물딩	열화 - 오작동
기본관(Bare Tube) + 전원공급기(PSU) 연결선		단선 - 작동불능	
		연결 불량 - 오작동	

<표 3> 결함나무분석(FTA)



3. 가속수명시험 및 결과 분석

3.1 가속모델 및 가속수명시험방법 설정

영상증폭관의 가속 스트레스는 "MIL-I-49453(1989)" 규격과 필드의 고장메커니즘 그리고 가속 스트레스를 고려하여 광조명도 및 온도로 판단하였고, 이로부터 가속함수는 다음과 같은 광조명도·온도의 관계식을 적용하여 모델링하였다.

$$\tau = A \cdot I^{-\beta} \cdot \exp[E/kT]$$

여기서, τ : 대표수명, T : 절대온도 (K), I : 광조명도 (fc), E : 활성화에너지 (eV),

k : 볼츠만상수 (8.617×10^{-5} eV/K), A : 상수, β : 상수

광조명도 · 온도에 의한 4가지 가속수명시험 조건은 표 4와 같고, 이러한 4가지 조건을 이용하여 가속 모델식에서 미지수를 구하여 가속계수를 산출하고 정상 사용 조건에서의 평균 수명을 제시하였다. 정상 상태는 광조명도 1×10^5 fc, 온도 40 °C에서 사용하는 경우이다.

<표 4> 가속수명시험 조건 및 판정 기준

시험 항목	시험 조건	판정 기준	시료 수	시험 시간	허용 고장 수
광조 온 동 작 시 험	조건 1(12 min) 시험 시간 : 12 min 광조명도 : (광조명도 : 11 min ON, 1 min OFF) 5×10^{-5} fc : 5 min 52 s 진동 : 2 min ON, 10 min OFF) 5×10^{-4} fc : 5 s 온도 : 40 °C 5×10^{-5} fc : 5 min 진동 : 2.2 g, 50 Hz 5 fc : 3 s 동작조건 : 3.0 Vdc.	성능 시험인 중심 분해능 시험을 실시하여 수명 시험 후의 중심 분해능이 18 lp/mm 이상이어야 함.	5	2,000 h	0
	조건 2(6 min) 시험 시간 : 6 min 광조명도 : (광조명도 : 5 min 30 s ON, 30 s OFF) 10×10^{-5} fc : 22 s 진동 : 1 min ON, 5 min OFF) 5×10^{-4} fc : 5 s 온도 : 40 °C 10×10^{-5} fc : 5 min 진동 : 2.2 g, 50 Hz 5 fc : 3 s 동작조건 : 3.0 Vdc.	성능 시험인 중심 분해능 시험을 실시하여 수명 시험 후의 중심 분해능이 18 lp/mm 이상이어야 함.	3	2,000 h	0
	조건 3(12 min) 시험 시간 : 12 min 광조명도 : (광조명도 : 11 min ON, 1 min OFF) 5×10^{-5} fc : 5 min 52 s 진동 : 2 min ON, 10 min OFF) 5×10^{-4} fc : 5 s 온도 : 50 °C 5×10^{-5} fc : 5 min 진동 : 2.2 g, 50 Hz 5 fc : 3 s 동작조건 : 3.0 Vdc.	성능 시험인 중심 분해능 시험을 실시하여 수명 시험 후의 중심 분해능이 18 lp/mm 이상이어야 함.	3	2,000 h	0
	조건 4(6 min) 시험 시간 : 6 min 광조명도 : (광조명도 : 5 min 30 s ON, 30 s OFF) 10×10^{-5} fc : 22 s 진동 : 1 min ON, 5 min OFF) 5×10^{-4} fc : 5 s 온도 : 50 °C 10×10^{-5} fc : 5 min 진동 : 2.2 g, 50 Hz 5 fc : 3 s 동작조건 : 3.0 Vdc.	성능 시험인 중심 분해능 시험을 실시하여 수명 시험 후의 중심 분해능이 18 lp/mm 이상이어야 함.	3	2,000 h	0

3.2 가속수명시험 데이터

가속수명시험 조건 1, 2, 3 및 4에서 각각 2,000 h 동안 시험을 실시하였고, 특성 측정은 0 h(초기), 250 h, 500 h, 1,000h, 1,500 h, 2,000 h(시험 종료시점)에서 중심 분해능 시험을 실

시하였고, 야간투시경용 영상증폭관의 정격 입력으로 3 Vd.c.의 직류 전압을 인가하였다. 표 5, 6, 7, 8에는 각각의 네 조건에 대한 가속수명시험 데이터를 나타내었다.

<표 5> 조건 1 시간별 중심 분해능(lp/mm)

시험시간 시료번호	0 h (초기)	250 h	500 h	1,000 h	1,500 h	2,000 h (시험종료)	비 고
1	40	38	36	32	28	24	광조명도 : 5×10^5 fc 온도 : 40 °C
2	40	37	35	30	26	22	
3	36	34	32	29	25	21	
4	36	34	33	30	26	22	
5	36	34	32	28	24	20	

<표 6> 조건 2 시간별 중심 분해능(lp/mm)

시험시간 시료번호	0 h (초기)	250 h	500 h	1,000 h	1,500 h	2,000 h (시험종료)	비 고
6	36	32	28	21	14	-	광조명도 : 10×10^5 fc 온도 : 40 °C
7	36	32	28	21	14	-	
8	40	36	32	25	17	-	

<표 7> 조건 3 시간별 중심 분해능(lp/mm)

시험시간 시료번호	0 h (초기)	250 h	500 h	1,000 h	1,500 h	2,000 h (시험종료)	비 고
9	36	32	28	20	11	-	광조명도 : 5×10^5 fc 온도 : 50 °C
10	36	32	28	21	13	-	
11	36	32	28	20	12	-	

<표 8> 조건 4 시간별 중심 분해능(lp/mm)

시험시간 시료번호	0 h (초기)	250 h	500 h	1,000 h	1,500 h	2,000 h (시험종료)	비 고
12	36	31	24	11	-	-	광조명도 : 10×10^5 fc 온도 : 50 °C
13	36	31	24	12	-	-	
14	36	30	23	10	-	-	

3.3 가속수명시험 데이터 분석

시험 조건 1, 2, 3 및 4에서 각각 2 000 h, 2 000 h, 1 500 h 및 1 000 h 동안 시험한 데이터로부터 가속 모델을 설정 및 분석하였고, 가속 계수를 산출하기 위해 다음과 같이 데이터를 분석하였다.

가속수명시험 모델은 광조명도 및 온도의 관계식을 이용하였고, 가정한 수명 분포의 적합성을 검정하기 위해 ReliaSoft사의 ALTA[6]를 이용하였다.

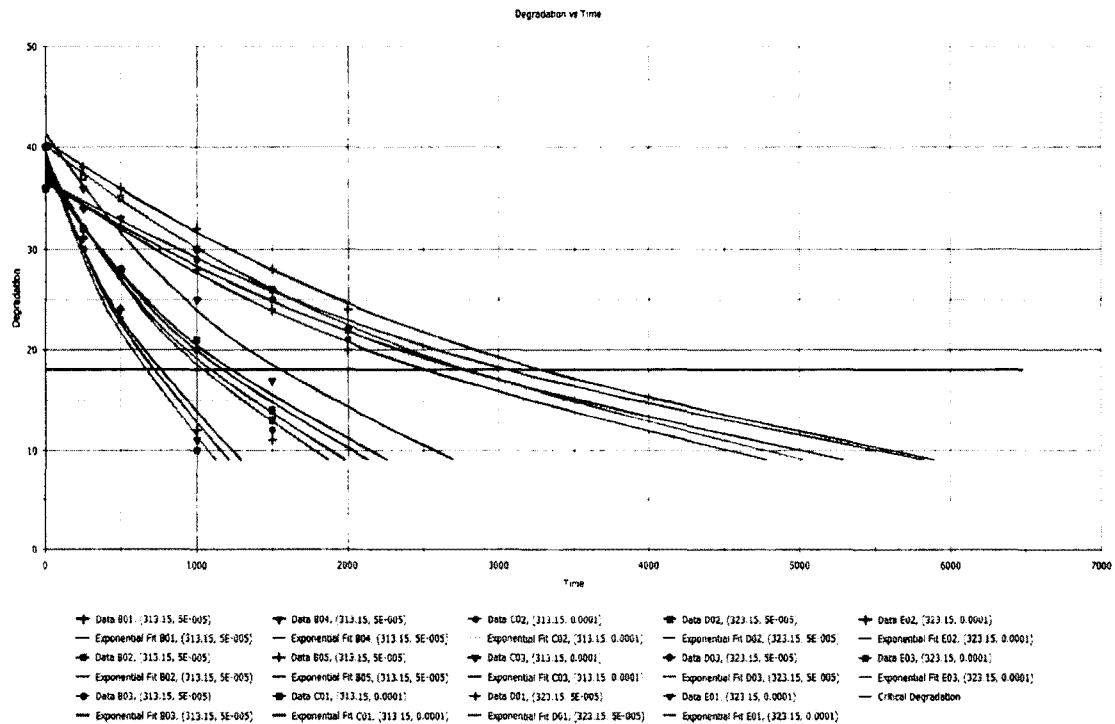
확률지 타점 결과 수명 분포로 와이블 분포를 수명 분포로 채택하였다. 또 분포 함수에 따른 함수식과 모수 추정값은 다음과 같다.

영상증폭관의 가속함수의 3가지 모수를 다음과 추정하였다.

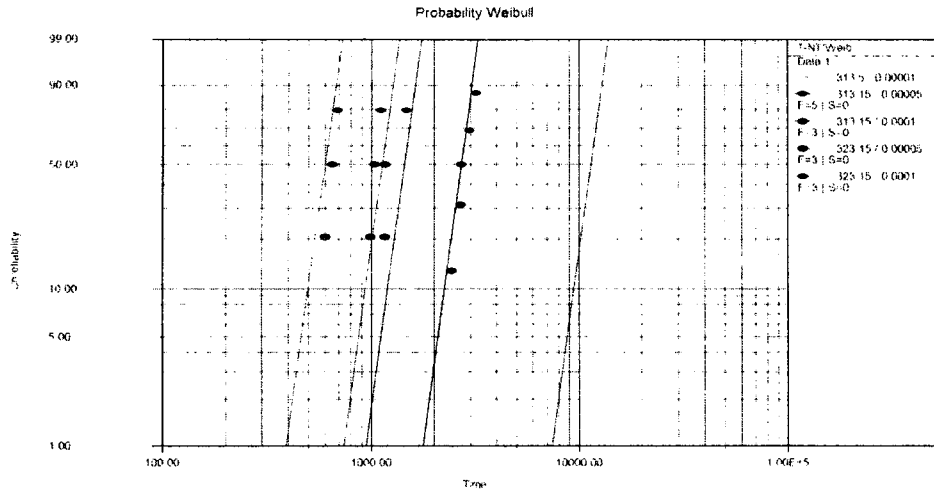
$$\tau = A \cdot I^{-\beta} \cdot \exp[E/kT]$$

여기서, τ : 대표수명 (h), T : 절대온도 (K), I : 광조명도 (fc), $E = 0.7644$ eV,

$$k = 8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}, A = 1.6790 \times 10^{-13}, \beta = 0.9120$$



<그림 2> 총 14 개 시료의 시간에 따른 열화 특성 그래프



<그림 3> 와이블 분포 확률지 타점 결과

<표 9> 와이블 분포 함수 및 모수 추정

Life-Stress Relation: Temperature: Non-Normal	
$L(L', V') = \frac{C}{L'^B \cdot e^{-\frac{C}{V'}}}$	
B =	8870.0297
C =	1.6790E-13
n =	0.9120
Ea =	0.7644
Life Distribution: Weibull	
$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$ where $\eta = L(V')$	
$\beta =$	9.9596851103612
$\eta =$	Function of Life-Stress Relation
Life-Stress Level: Simulated	
	313.5
	0.00001

4가지 시험 조건에서 각각 2,000 h 동안 시험한 데이터로부터 수명-스트레스 관계를 그림 4, 5와 같이 분석하였다.

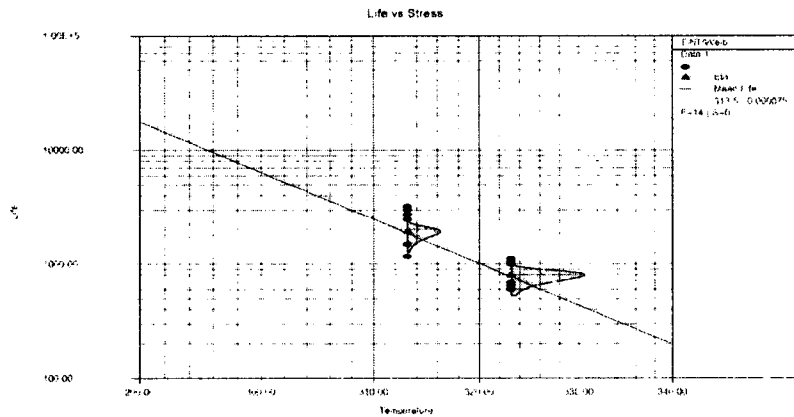


그림 4 온도 변화에 따른 수명-스트레스 관계

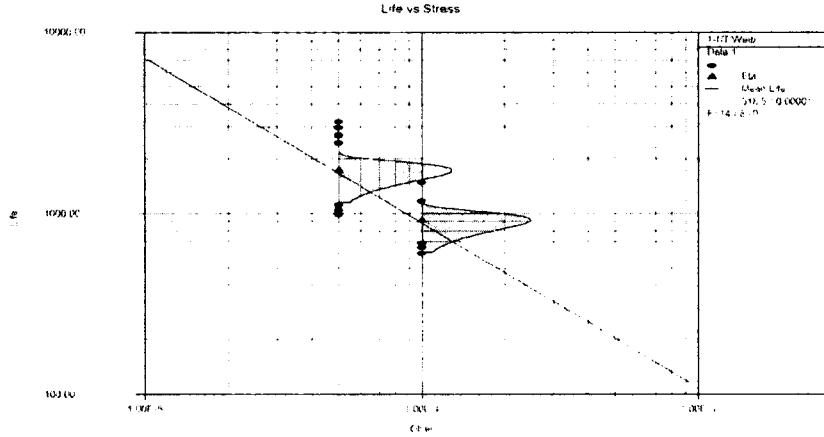


그림 5 광조명도 변화에 따른 수명-스트레스 관계

3.4 가속계수 및 평균수명 예측

가속 모델을 이용하여 가속계수(AF)를 산출하면 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$AF = \frac{\tau_u}{\tau_a} = \exp\left[\frac{E}{k}\left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_a}\right)\right] \cdot \left(\frac{I_u}{I_a}\right)^{-\beta}$$

여기서, τ_u : 정상 사용 조건에서의 평균수명(h), τ_a : 가속 수명(h), T_u : 정상 사용 온도(K), T_a : 가속 온도(K), I_u : 정상 상태에서의 광조명도(fc), I_a : 가속 상태에서의 광조명도(fc), E : 활성화에너지(eV), k : 볼츠만상수 (8.617×10^{-5} eV/K), β : 상수

위의 수식과 가속 모델에서 산출한 3개의 미지수를 이용하여 표 10과 같이 4개의 가속수명시험 조건에서의 가속계수를 산출하였으며, 정상 사용 조건인 광조명도 : 1×10^5 fc, 온도 : 40 °C에서의 평균수명을 예측하였다.

<표 10> 가속수명시험 조건에서의 가속계수

조 건	시험 조건	가속계수(AF)
정상 사용 조건	1×10^5 fc, 40 °C	1
1	5×10^5 fc, 40 °C	4.3
2	10×10^5 fc, 40 °C	8.2
3	5×10^5 fc, 50 °C	10.4
4	10×10^5 fc, 50 °C	19.6

그리고, 야간투시경용 영상증폭관의 정상 사용 조건에서의 평균수명(MTTF)은 11,249 h으로 예측하였다.

4. 결론

본 연구에서는 동일한 고장메커니즘을 갖는 시험 조건을 가속 스트레스별로 분류하여 가속 모델을 설정하고, 이에 맞는 가속수명시험법을 개발하여 가속계수를 산출하였다.

영상증폭관의 가속스트레스는 광조명도 및 온도이므로 가속함수는 두가지 관계식을 이용하여 가속 모델을 적용하였다. 또한 서로 다른 4가지의 가속수명시험 조건을 설정하여 3개의 미지수를 구하고, 각 조건별로 가속계수를 산출하였으며, 정상 사용 조건에서의 평균수명(MTTF)이 11,249 h으로 예측하였다.

수명분포의 적합성 검정 및 모수 추정을 위하여 확률지 및 통계 프로그램[6]을 이용하였고, 수명 분포를 와이블 분포로 가정하여 가속성을 검정하였으며 수명-스트레스 관계를 분석하였다.

참고 문헌

- [1] 권종광(2006), 야간투시경 기술개발 동향, 한국항공우주학회지, 34권, 9호, pp. 113-120.
- [2] 이인식, 박정원(1998), 전자 Device의 신뢰성 시험에 관한 연구, 산업기술시험평가연구소 (산업자원부).
- [3] MIL-HDBK-781A(1996), Military Standards and Specification, HANDBOOK FOR RELIABILITY TEST METHODS, PLANS, AND ENVIRONMENTS FOR ENGINEERING, DEVELOPMENT QUALIFICATION, AND PRODUCTION.
- [4] MIL-I-49453(1989), Military Standards and Specification, IMAGE INTENSIFIER ASSEMBLY, 18 MM MICROCHANNEL WAFER MX-10130() / UV.
- [5] MIL-STD-810F(2000), Military Standards and Specification, ENVIRONMENTAL ENGINEERING CONSIDERATIONS AND LABORATORY TESTS.
- [6] Reliasoft(2001), Accelerated Life Testing Reference.
- [7] Takahisa, K. et al.(1994), Long-term Reliability of Amorphous Silicon Solar Cells, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 34, pp. 485-492.
- [8] William Q. Meeker, Luis A. Escobar(1998), Accelerated Degradation Tests: Modeling and Analysis, Technometrics, Vol. 40, No. 2.
- [9] William Q. Meeker, Luis A. Escobar(1998), Statistical Methods for Reliability Data, WILEY INTERSCIENCE.