

텅스텐 백열전구의 필라멘트 단선에 대한 가속수명시험

이 재국, 김 진우, 신 재철, 김 명수*

대우일렉트로닉스 품질신뢰성연구소, *수원대학교 산업정보공학과

An Accelerated Life Test for Burnout of Tungsten Filament of Incandescent Lamp

Jae-Kook Lee, Jin-Woo Kim, Jae-Chul Shin, Myung-Soo Kim*

Quality and Reliability Laboratory, Daewoo Electronics Corp.

412-2, Cheongcheon 2-Dong, Pupyong-Ku, Incheon, KOREA

*Department of Industrial Information Engineering, The University of Suwon
P.O.Box 77, San 2-2, Wau-ri, Bongdam-up, Hwasung-shi, Kyunggi-do, Korea

ABSTRACT

This paper presents an accelerated life test for burnout of tungsten filament of incandescent lamp. From failure analyses of field samples, it is shown that their root causes are local heating or hot spots in the filament caused by tungsten evaporation and wire sag. Finite element analysis is performed to evaluate the effect of vibration and impact for burnout, but any points of stress concentration or structural weakness are not found in the sample. To estimate the burnout life of lamp, an accelerated life test is planned by using quality function deployment and fractional factorial design, where voltage, vibration, and temperature are selected as accelerating variables. We assumed that Weibull lifetime distribution and a generalized linear model of life-stress relationship hold through goodness of fit test and test for common shape parameter of the distribution. Using accelerated life testing software, we estimated the common shape parameter of Weibull distribution, life-stress relationship, and accelerating factor.

KEYWORDS: failure mechanism, lifetime estimation, accelerated life test (ALT), burnout, sag, incandescent lamp, tungsten filament, quality function deployment (QFD)

1. 서론

신뢰성 엔지니어는 제품이 언제, 왜 고장 나는지, 또는 신뢰성을 어떻게 개선할 것인지에 대한 해결책을 찾으려고 노력하고 있다. 이러한 목표를 효율적으로 달성하기 위해서는 재료 및 공정분석을 위한 기술적 평가, 잠재 고장부위와 고장메커니즘 규명, 가속수명시험, 전산해석(유한요소해석 등), 그리고 고장분석(failure analysis) 등의 활동이 종합적이고 유기적으로 수행되어야 한다.[9]

신뢰성은 아이템이 규정된 조건에서 주어진 기간동안 요구기능을 수행할 수 있는 가능성으로 정의한다.[2] 신뢰성은 설계단계에서 결정되는 품질특성 중 하나로, 설계 및 제조단계에서 신뢰성을 개선·보증하기 위한 시험을 실시하고 있다. 한편, 기술발전 속도가 빨라짐에 따라 제품 수명주기(life cycle)와 개발기간이 짧아지고 있고, 따라서 새로운 재료, 부품 및 기술에 대한 시험평가를 위한 충분한 시간이 부족하여 신뢰성이 문제가 되고 있다. 또한, 높은 신뢰성을 갖는 제품의 시험은 오랜 기간과 많은 비용이 소요되므로 신뢰성을 빨리 확인할 수 있는 가속수명시험(Accelerated Life Testing)에 대한 필요성과 요구가 계속 증가하고 있다. 가속수명시험은 제품의 고장을 가속할 수 있는 온도, 전압, 진동 등의 스트레스를 사용 조건보다 높게 설정한 시험

으로, 수명분포(와이블, 지수, 대수정규분포 등)와 수명-스트레스 관계(아레니우스, 역거듭제곱, 아이링 등)를 이용하여 가속조건에서 관측된 수명 데이터를 분석하고, 이로부터 사용조건에서의 수명을 추정한다.

본 논문은 냉장고와 같은 가전제품에 사용되는 백열전구의 가속수명시험에 관한 것이다. 백열전구는 진공 또는 가스가 주입된 전구 속의 텅스텐 필라멘트에 전류가 흐르면서 빛을 발생시킨다. 이때 전기에너지의 95%를 열, 나머지 5%를 빛으로 변환하기 때문에 수명이 짧고 전력 소비가 높다. 즉, 열이 상승할수록 광효율과 색온도가 증가하지만 필라멘트가 빨리 증발하여 점점 가늘어지면서 단선되어 결국 수명을 다하게 된다. 한편, 필라멘트 재료로 사용되는 텅스텐은 전구 사용온도에서 증기압이 낮아 수명을 오래 유지할 수 있고 발광효율이 비교적 높으며, 크리프 강도가 높고 가공성이 좋아서 필라멘트 재료로 적절한 이점이 있다.

백열전구의 수명을 정상 사용조건에서, 시험을 통하여 평가하려면 장기간의 시간이 필요하다. 따라서 단기간에 수명을 평가할 수 있는 가속수명시험이 수행된다. 기존의 백열전구 가속수명시험에 대한 연구[4, 7, 8, 15]는 전압만을 가속인자로 설정하고 있으며, 실제 전구의 사용·환경조건을 제대로 반영하지 못하는 문제점이 있다. 본 연구에서는 필드에서 고장 난 백열전구의 고장분석을 통하여 확인된 주 고장 메커니즘인 필라멘트 용융단선(burnout) 현상에 영향을 미칠 수 있는 실 사용조건인 전압, 진동, 온도 등의 인자를 동시에 고려하여 가속수명시험을 설계하고, 시험을 통하여 측정된 고장 데이터를 분석하여 백열전구의 수명을 예측할 수 있는 새로운 수명-스트레스 관계식을 제시하고자 한다. 2절에서는 백열전구의 고장 메커니즘과 필드 고장분석 및 필라멘트 결함 유무를 확인하기 위한 유한요소분석 결과를 제시한다. 3절에서는 가속수명시험 설계와 데이터 분석 결과를 제시한다.

2. 백열전구의 고장 메커니즘과 고장분석

2.1 백열전구의 고장 메커니즘

백열전구의 고장모드는 필라멘트의 단선, 전구업체에서 백화라고 부르는 누설(leak)에 의한 필라멘트의 산화, 도입선 녹음, 유리구 파손 등 여러 가지 형태가 있다. 그러나 필라멘트 단선을 제외한 고장모드들은 대부분 제조상의 결함에 기인하며, 백열전구의 고장은 주로 필라멘트의 단선에 의하여 발생한다. 따라서 백열전구의 수명은 주로 필라멘트의 거동에 좌우된다고 할 수 있다. 필라멘트의 단선은 필라멘트 용융(burnout)에 의한 단선과 파손(fracture)에 의한 단선으로 구분할 수 있으며, 여기서 후자는 고장현상이라기 보다 공정 중에 필라멘트 찍힘 등의 결함으로 인하여 발생하는 취성 파괴이므로, 용융에 의한 단선이 백열전구의 주요 신뢰성 문제에 해당된다.

한편, 필라멘트 용융 단선의 원인은 텅스텐 증발에 의한 것임이 이미 밝혀져 있다. 온도 구배 및 텅스텐 증발율이 균일한 기하학적·물리적·화학적으로 완벽한 이상적 필라멘트는 지름이 점진적으로 감소하며, 따라서 전기 저항은 증가하고 전류와 필라멘트 온도는 점차 저하되게 된다. 즉, 발광효율은 점차 감소하지만 수명은 무한대가 된다. 그러나 실제 이러한 상황은 현실적으로 일어나지 않으므로 필라멘트의 용융 단선의 메커니즘을 설명하기 위한 여러 가지 모델들이 제시되었다. Becker[12]는 주변 필라멘트보다 국부적으로 온도가 높은 초기 결함 부위가 존재하고, 그로부터 필라멘트의 용융 단선이 발생한다는 국부온도상승이론(hot spot model)을 제안하였다. 즉, 텅스텐 증발율이 주위보다 높은 초기 결함 부위에서 자기가속과정(self accelerating process)에 의해 온도가 더욱 상승되어 결국 텅스텐이 용점에 도달하여 단선된다는 것이다. 초기 결함 부위는 필라멘트 두께의 편차, 코일 피치 간 편차 등 제조상의 편차에 의해 발생된다.[8, 11-13]

그 밖에 결정립 미끄러짐(grain boundary sliding) 현상으로 인한 처짐 변형(sag)에 의한 필라멘트 단선 모델이 있다.[10, 12, 16-17] 즉, 진동 등의 외부 하중 또는 자체 하중에 의하여 결정립에 전단응력이 가해져 결정립 미끄러짐 현상이 발생되고 이는 필라멘트를 변형시키며, 변형된 필라멘트 부위에서 국부온도상

승이 일어나 단선이 된다. 따라서 이 모델 역시 필라멘트 용융단선의 한 형태라고 할 수 있다. 처짐 변형 현상은 확산에 의한 재결정을 억제함으로써 방지할 수 있는데 이를 위해 알루미늄, 칼륨, 실리콘을 도핑한 텅스텐(AKS doped tungsten)이 사용되고 있다.[5-7, 14-17]

필라멘트의 용융단선은 초기 편차에 의한 국부온도상승, 처짐 변형 이외에도 백열전구의 스위칭 빈도와 주위 온도 등에 영향을 받는다. 즉, 백열전구의 스위칭 빈도는 스위칭 시 야기되는 돌입전류(inrush current)에 의해 증발을 가속하여 수명을 감소시킨다. 또한 전구 주위온도(bulb temperature)와 수명 간에도 관계가 있다는 것이 밝혀졌다. 전구 주위온도의 증가는 Langmuir sheath를 통한 텅스텐 증발율의 저하로 수명의 증가를 가져온다.[12] 그림 1은 백열전구에서 발생하는 고장모드와 메커니즘들을 나타낸 것이다.

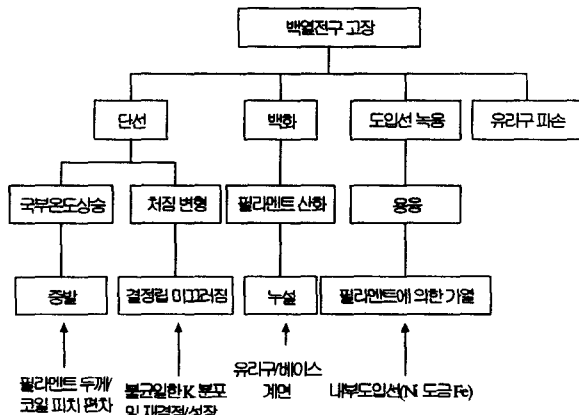


그림 1. 백열전구의 고장모드/메커니즘

2.2 고장분석

필드에서 사용 중에 고장이 발생한 백열전구를 수집하여 고장분석을 실시하였다. 그 결과 두 가지의 고장 메커니즘에 의하여 필라멘트 단선이 발생한 것으로 나타났다. 그림 2는 필라멘트의 국부온도상승에 의해 용융 단선된 현상을 나타내고 있으며, 그림 3은 필라멘트의 재결정/성장에 의한 처짐 변형에 의해 단선된 것을 보여준다. 그림 4와 5는 알루미늄(Al), 칼륨(K), 실리콘(Si)이 도핑된 텅스텐의 내부에 불균일한 성분분포로 인한 기공(void)에 의해 취성 파괴되거나, 필라멘트 가공 시

적힘 자국과 같은 공정결함에 의하여 단선된 사진을 나타낸다.

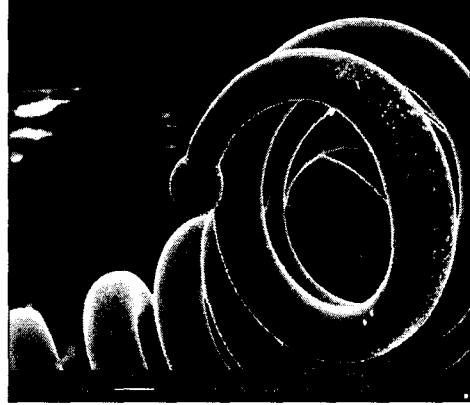


그림 2. 국부온도상승에 의한 용융단선



그림 3. 재결정/성장에 의한 처짐 변형

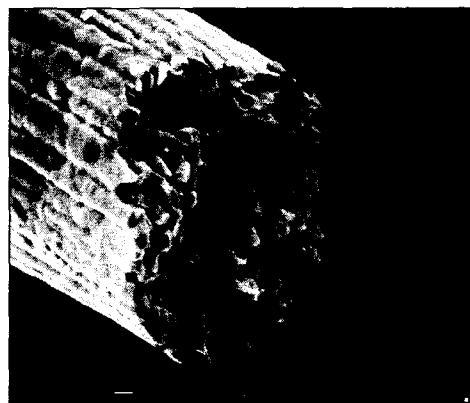


그림 4. 불균일한 K 분포로 인한 취성 파괴



그림 5. 찍힘 결함에 의한 초기파손

2.3 유한요소해석(FEM: Finite Element Method)

백열전구의 필라멘트 단선에 미치는 진동, 충격 등 외부하중의 영향을 유한요소해석을 통하여 분석하였다. 필라멘트의 구조를 빔 요소를 이용하여 3차원 모델링 하였으며 백열전구가 적용되는 냉장고 문 개폐 시 충격량을 측정하였다. 표 1의 필라멘트의 재질 물성 값을 참고하여, FEM을 통해 필라멘트에 미치는 최대 Von Mises 응력량과 진폭을 해석한 결과가 표 2에 있다. 그림 6은 필라멘트 구조의 전자현미경 사진, 그림 7은 충격량을 측정하는 데이터, 그림 8은 응력 해석을 위한 3차원 모델링을 보여주고 있으며, 그림 9는 최대 Von Mises 응력량 및 진폭의 해석 결과를 나타내고 있다.

FEM 해석 결과, 응력 집중부위 또는 구조적 취약부위는 발견되지 않았다. 표 1의 필라멘트 항복응력 값과 비교한 결과 필라멘트에 가해지는 Von Mises 응력 수준이 낮아 필라멘트 단선 고장은 외부 충격 등에 의한 과 하중(overload)에 의해서 일어나지는 않는 것으로 판단된다.

표 1. 필라멘트의 재질물성 데이터

재질	특성	탄성계수	항복응력	인장강도	밀도	최대 사용온도
Doped tungsten	Non-sag	415GPa	1.75GPa	2.5GPa	19.2g/cm ³	약 3,000°C

표 2. 외부 하중을 받는 필라멘트의 유한요소해석 결과

위치	도어 개폐 시 최대 충격량	필라멘트의 개선 형태	필라멘트 계 선시 신장율	최대 Von Mises 응력	최대 진폭	비고
F실	3440mm/s ² (약 3.5G)	7mm, 55µms	109.4%	102.5MPa	1.729mm	Case 1
		6mm, 42µms	120.9%	204.6MPa	0.441mm	Case 2
R실	1920mm/s ² (약 2G)	7mm, 55µms	109.4%	101.2MPa	1.103mm	Case 1
		6mm, 42µms	120.9%	203.8MPa	0.262mm	Case 2



EHT-20.00 kV M0- 27 mm Mag- 100 X
100µm Photo No. 4241 Detector- SE1

그림 6. 필라멘트 구조

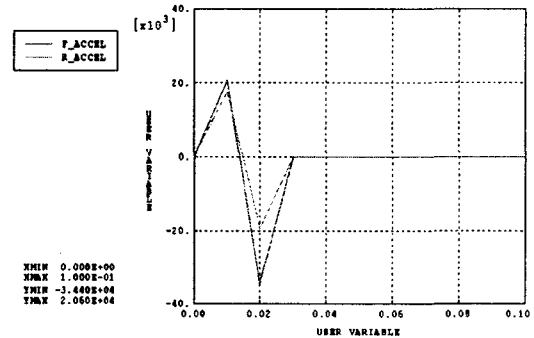


그림 7. 도어 개폐 시 충격량 측정 결과

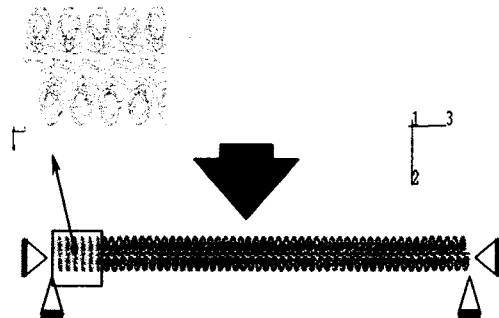


그림 8. 응력 해석을 위한 필라멘트 구조의 3차원 모델링

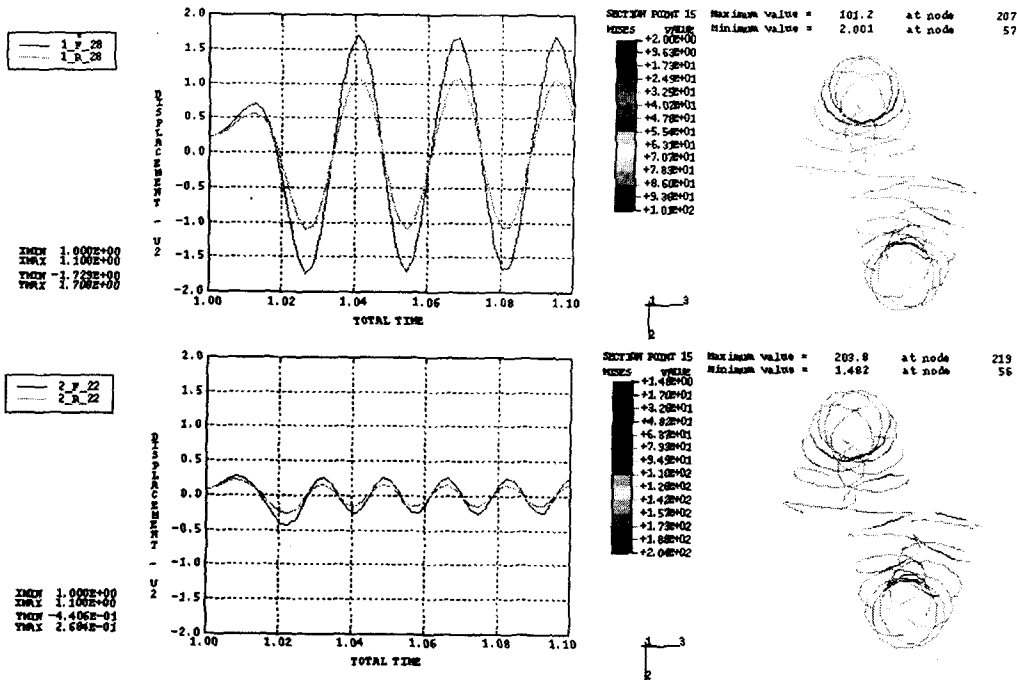


그림 9. 유한요소해석 결과 - 최대 Von Mises 응력량 및 진폭

3. 가속수명시험

백열전구의 고장분석 결과, 백열전구의 주요 고장모드는 필라멘트의 단선이며, 그 주된 메커니즘은 국부온도상승 및 필라멘트 처짐 변형에 의한 용융단선이다. 백열전구의 단선 고장에 대한 수명을 평가하기 위해 가속수명 시험을 수행하였다.

3.1.2 단계 품질기능전개

백열전구의 수명을 평가하기 위한 시험방법을 선정하기 위해 2단계 품질기능전개(Two Stage Quality Function Deployment, QFD)를 수행하였다. 단계 1에서는 고장모드/메커니즘과 스트레스의 관계를 분석하였고, 단계 2에서는 고장모드/메커니즘과 시험방법을 평가하였다. 그리고 각 항목에 대한 점수를 산정하여 신뢰성평가를 효과적으로 수행할 수 있는 시험 방법들을 평가하였다. 표 3과 4는 2단계 QFD 분석의 결과를 나타낸 것으로, 전압, 진동, 온도를 인가하는 복합진동시험이 백열전구 가속수명시험에 가장 적합하다고 결정하였다.

표 3. QFD 결과표-고장모드/메커니즘과 스트레스의 관계 (△:1, ○:3, ◎:9)

요구사항조건		고장메커니즘	
		국부온도상승	처짐 변형
성능	발광 효율		△
수명	2000시간	○	△
전압	240 to 288V	◎	△
	0 to 2G		◎
온도	-20 to 20°C	○	
점수		15	12

표 4. QFD 결과표-고장모드/메커니즘과 시험법의 관계 (△:1, ○:3, ◎:9)

순	시험방법		전압·온도 가속시험	전압·진동·가 속시험	복합진동시험
	고장 메커니즘	점수			
1	국부온도상승	15	○		○
2	처짐 변형	12		○	○
총점			45	36	81
순위			2	3	1

3.2 가속수명시험 계획

가속수명시험에서 재료의 물성이 변하지 않고, 고장모드와 메커니즘이 사용조건과 동일하도록 최대 스트레스 수준을 결정하는 것이 중요하다. 전압, 진동 가속도, 온도의 최대 스트레스 수준을 결정하기 위해 과전

압에 의한 백열전구 단선시험을 수행하였으며, 백열전구가 사용되는 제품에서 전구에 가해지는 최대 진동 또는 충격 스트레스를 가속도 센서를 이용하여 측정하였다. 또한, 백열전구 적용 제품의 주위 온도를 측정하여 고장 메커니즘이 변하지 않는 온도를 결정하였다. 여기서 온도는 주위 온도가 낮을수록 필라멘트 단선이 가속됨을 주목할 필요가 있다. 따라서 전압은 정격의 120%(288V), 진동은 2G, 온도는 -20℃로 결정하였고, 낮은 스트레스 수준은 기술적 판단에 따라 전압은 정격의 110%(264V), 진동은 1.8G, 온도는 20℃로 결정하였다. 따라서 가속수명시험 조건은 표 5와 같이 $L_4(2^3)$ 직교배열표를 이용하여 선정하였다.

표 5. 가속수명시험 조건

인자 실험	전압 (V)	진동 (G)	온도 (℃)	시료 수
1	288	2.0	20	18
2	264	1.8	20	18
3	288	1.8	-20	18
4	264	2.0	-20	18

3.3 시험 장치

그림 10은 백열전구의 가속수명시험을 수행하기 위한 복합진동시험 장치와 시험조건을 나타낸 것이다. 시험 장치는 백열전구를 고정하고 전원을 공급할 수 있는 시험 JIG, 가진 장치 및 제어 시스템, 항온조 및 On/Off 시험을 할 수 있는 타이머로 구성되어 있다.

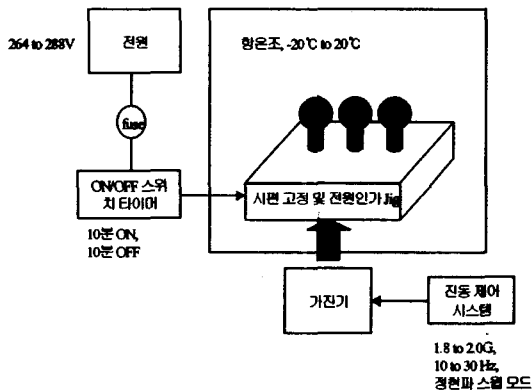


그림 10. 복합진동시험장치 개략도

3.4 시험 결과

3.4.1 수명분포의 적합성 검토 및 가속성 검토

가속수명시험을 통하여 수집된 데이터에 적합한 수명분포를 가정하기 위하여 와이블, 지수, 대수정규분포의 우도함수(likelihood function) 값을 비교하였다. 표 6은 3개 수명분포의 우도함수 값을 나타낸 것으로, 우도함수 값이 가장 큰 와이블분포가 가장 적합한 수명분포로 나타났다.

표 6. 수명분포의 적합성 검토 결과

수명분포	와이블분포	지수분포	대수정규분포
우도함수	-188.4030	-189.2048	-190.4702

또한, 4개의 가속수명시험 조건에서 와이블 분포의 형상모수 β 가 동일한지를 검정하기 위해 우도비 검정(likelihood ratio test)을 유의수준(significance level) $\alpha = 0.05$ 에서 수행하였다. 이때, 검정통계량 T 값은 0.09168로 $\chi_{0.05}^2(3) = 7.815$ 보다 작으므로 형상모수 값이 다르다고 할 수 없으며, 따라서 β 가 동일하여 가속성은 성립한다고 할 수 있다. 그림 11은 가속수명시험에서 관측된 고장시간을 시험조건별로 와이블 확률용지에 타점한 것이다. 각 시험조건별 데이터들이 직선에 가깝게 배치되어 있고, 각 시험조건별 수명분포 추정선이 서로 평행하게 나타난 것을 볼 수 있으며, 이로부터 와이블분포가 적합하고 시험조건 사이에 가속성이 성립한다는 것을 알 수 있다.

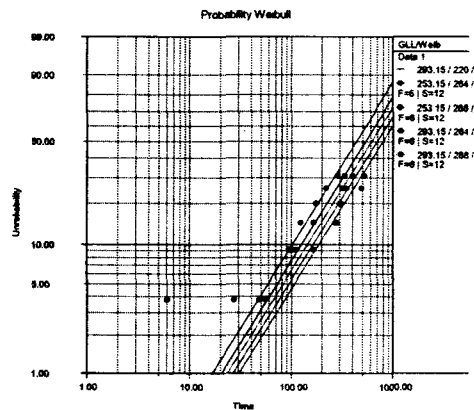


그림 11. 와이블 확률용지에 타점된 시험 데이터

3.4.2 가속수명시험 모델

백열전구의 수명과 3개의 가속변수인 전압, 진동 가속도, 온도의 수명-스트레스 관계에 대한 모델은 아직 연구되어 있지 않다. 일반적으로 백열전구의 수명은 전압에 대하여 역승모형(inverse power law)을 따른다고 알려져 있고, 아레니우스 모형을 제외한 대부분의 경험적 모형(empirical model)이 역승관계를 가정하고 있는 점을 고려하여 진동도 역승모형을 따른다고 가정하였다. 한편, 온도가 백열전구 수명에 미치는 가속시험 모형은 알려진 것이 없지만 온도가 증가하면 Langmuir sheath를 통한 텅스텐 증발율의 저하로 수명 증가를 가져온다는 사실이 알려져 있으므로 온도 역시 역승모형을 따른다고 가정하였다. 따라서 본 연구에서는 백열전구의 수명분포를 와이블로 가정하고, 와이블 척도모수(η)와 전압(V), 진동(U), 온도(T)사이의 관계식을 아래의 식 (1)과 같은 일반화된 선형모델(generalized linear model)로 가정하였다.

$$\eta(T, V, U) = e^{a(0)} (1/T)^{-a(1)} V^{a(2)} U^{a(3)} \quad (1)$$

또는

$$\eta(T, V, U) = \exp[a(0) + a(1)\ln(T) + a(2)\ln(V) + a(3)\ln(U)]$$

3.4.3 와이블 형상모수와 수명-스트레스 관계식의 추정

와이블 분포와 식 (1)의 수명-스트레스 관계식을 가정하고, 소프트웨어 ALTA를 이용하여 가속수명시험 데이터를 분석한 결과는 다음과 같다:

$$\hat{\beta} = 1.2968,$$

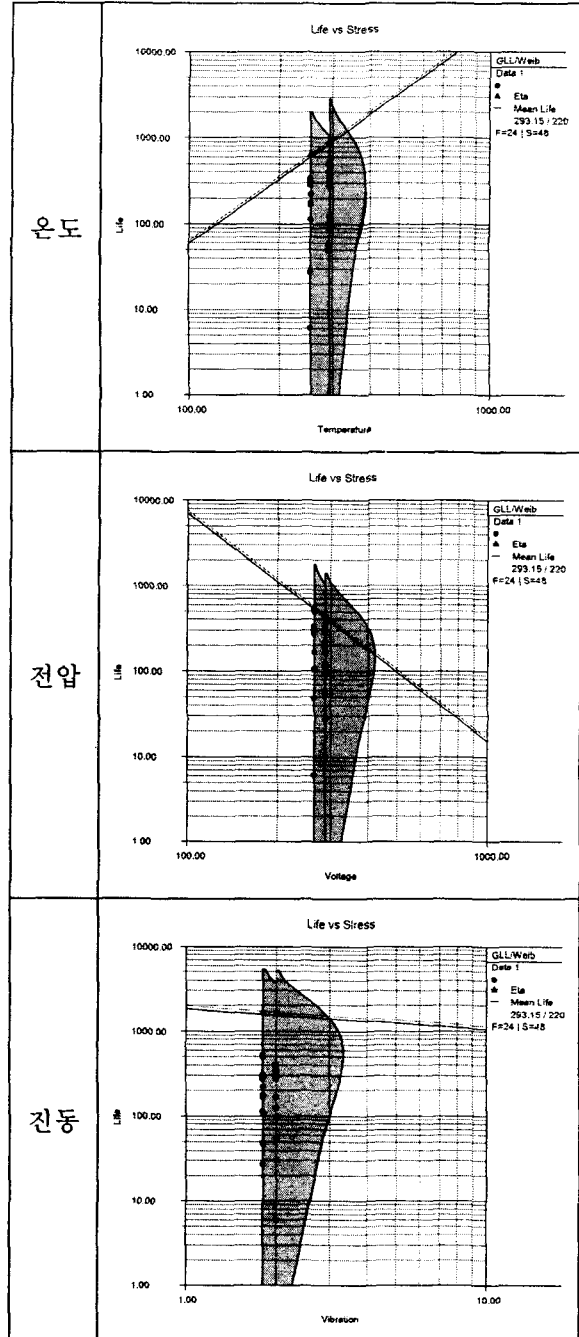
$$\alpha(0) = 7.7723, \alpha(1) = 2.4968, \alpha(2) = -2.6645, \alpha(3) = -0.2336$$

따라서 백열전구 필라멘트의 단선에 대한 수명-스트레스 관계식과 가속계수는 식 (2) 및 (3)과 같이 추정될 수 있다. 그림 12는 온도, 전압, 진동에 대한 수명-스트레스 관계식과 가속계수의 영향을 나타낸 것이다.

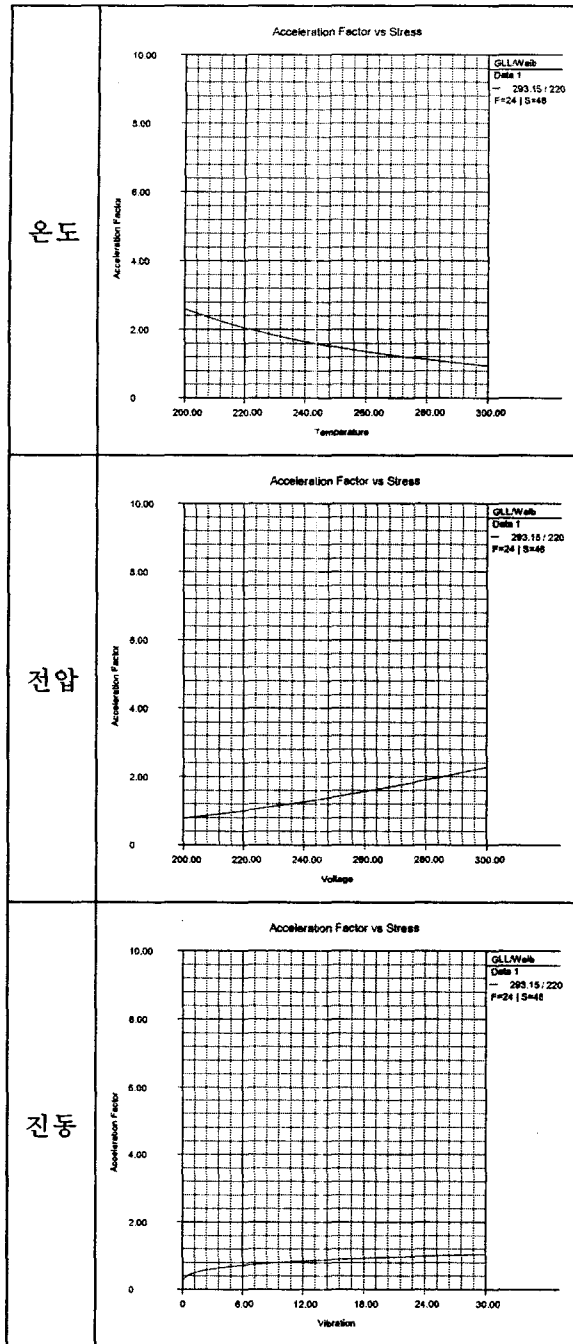
$$\eta(T, V, U) = \exp[7.7723 + 2.4968\ln(T) - 2.6645\ln(V) - 0.2336\ln(U)]$$

$$= e^{7.7723} (1/T)^{-2.4968} V^{-2.6645} U^{-0.2336} \quad (2)$$

$$AF = (T_a / T_d)^{-2.4968} \cdot (V_d / V_a)^{-2.6645} \cdot (U_d / U_a)^{-0.2336} \quad (3)$$



(a) 수명-스트레스 관계식



(b) 가속계수

그림 12. 온도, 전압 및 진동에 대한 수명-스트레스 관계식(a)과 가속계수(b)

3.5 시험결과의 해석

백열전구의 필라멘트 단선에 대한 와이블 분포의 형상모수 값이 1.2968로 추정되었다.

이는 필라멘트의 단선이 마모고장이라기보다 우발고장에 가까움을 나타낸다. 백열전구의 단선고장에 대한 메커니즘은 국부온도상승 및 처짐 변형 메커니즘으로 설명하였는데, 이는 초기결함, 결정립 미끄러짐에 의한 필라멘트의 처짐 변형, 텅스텐 증발, 국부온도상승, 단선의 경과를 거친다. 결정립 미끄러짐 및 처짐 변형 현상은 잘 일어나지 않음을 앞의 결과로부터 알 수 있다. 텅스텐 증발 및 국부온도상승에 의한 단선이 일어나는 단계는 전형적인 마모고장인데 본 시험 결과가 우발고장의 형태로 나타난 것으로 보아 국부온도상승 발생 단계가 고장에 이르는 율속과정(rate determining step)은 아닌 것으로 추정된다.

백열전구의 수명-스트레스 관계식 및 가속계수 추정 결과, 진동에 대한 가속계수 값이 작아 진동이 백열전구의 수명에 미치는 영향이 작은 것으로 추정된다. 이는 시험에 사용된 백열전구의 필라멘트 재질이 AKS 도핑된 텅스텐이 사용되었는데, AKS 도핑된 텅스텐은 재결정성장을 억제하여 결정립 미끄러짐에 의한 처짐 변형 현상이 잘 일어나지 않는 특성을 갖기 때문이라고 생각된다. 이는 과 하중에 의한 필라멘트 단선이 일어나지 않는 FEM 해석결과와 더불어 백열전구의 내진 특성이 우수함을 보여준다.

가속계수 추정결과 전압에 대한 파라미터 값이 2.6645이며, 이는 백열전구에 대한 KS 규격이나 관련업체에 알려진 값과는 차이를 알 수 있다. 부품은 제조업체, 로트별로 품질이 달라지며, 부품의 품질이 달라질 경우 수명에 대한 파라미터 값도 변한다. 따라서 파라미터 값을 모든 부품에 획일적으로 적용할 수는 없고, 부품별로 가속시험을 통한 파라미터의 추정이 선행되어야 한다.

수명-스트레스 관계식 추정 결과 온도가 감소할수록 수명이 짧아지는 것을 확인하였다. 따라서 저온에서 주로 사용되는 백열전구의 경우 본 식의 적용이 가능할 것이다. 이는 상온에서 저온에 이르는 구간에서 고장메커니즘이 변하지 않는 범위 내에서 적용될 수 있으며, 상온에서 고온에 이르는 구간에 대해서는 본 수명-스트레스 관계식의 적용범위 밖이며, 이에 대해서는 검토가 달리 진행되어야 한다.

4. 결론

본 논문에서는 가전제품에 사용되는 백열전구의 가속수명시험을 다루었다. 전구의 고장분석 결과 주 고장 메커니즘이 국부 온도상승 및 처짐 변형에 의한 필라멘트 용융 단선으로 확인되었으며, 이러한 고장 메커니즘을 재현할 수 있도록 실 사용조건을 반영하여 전압, 진동, 온도를 동시에 고려한 가속수명시험을 설계·실시하였다. 와이בל분포와 일반화된 선형모형을 가정하고 데이터를 분석하여 와이בל 형상모수와 수명-스트레스 관계식을 추정하였고, 전구 수명에 미치는 변수들의 영향을 해석할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] 김재수 외(1986), "도핑한 텅스텐선에 있어서 도펀트가 미세조직에 미치는 영향," 대한금속학회지, 24(6), 687-695.
- [2] 산업자원부 기술표준원(2003), 신뢰성용어 해설서, 10-11.
- [3] 이상용(1995), 신뢰성공학, 형설출판사.
- [4] 한국산업규격(2003), KS C 7501.
- [5] Briant, C. L. and Walter, J. L.(1989), "Potassium bubble formation and void growth in tungsten rod and wire," *High temperature-high pressures*, 21, 553-568.
- [6] Briant, C. L.(1993), "Potassium bubbles in tungsten wire," *Metallurgical transactions A*, 24A, 1073-1084.
- [7] Burkhanov, G. S. et. al.(1984), "Dependence of the burning time of a tungsten lamp filament on its structure," *Constr cost control russian metallurgy*, 35(1), 170-173.
- [8] Covington, E. J.(1973), "Hot spot burnout of tungsten filaments," *Journal of IES*, JULY, 372-380.
- [9] Evans, J. W. and Evans, J. Y.(1997), *Microsystem technologies*, Springer Verlag, 145-154.
- [10] Garbe, S and Hanloh, S.(1983), "Growth of potassium-filled bubbles in doped tungsten and its relation to hot spot development and intergranular fracture," *Philips Journal Res.*, 38, 248-262.
- [11] Godfrey, T. J. et al.(1976), "On the nature and distribution of defects in tungsten lamp wire," *Journal of the less-common metals*, 44, 319-326.
- [12] Horacsek, O.(1980), "Poperties and failure modes of incandescent tungsten filaments," *IEE PROC.*, 127A(3), 134-141.
- [13] Horster, H. et al.(1971), "The burnout mechanism of incandescent lamps," *Philips tech. Rev.* 32(6/7/8), 155-164.
- [14] Pugh, J. W. and Lasch, W. A.(1972), "Characterization of potassium bubbles in tungsten mill products," *120th TMS Annual Meeting on Recent Advances in Tungsten and tungsten alloys philosophical magazine A*, Nov, 64(5), 195-201.
- [15] Raj, R. and King, G. W.(1978), "Life prediction of tungsten filaments in incandescent lamps," *Metallurgical Transactions A*, 9A, 941-946.
- [16] Walter, J. L. et al.(1992), "Effects of vibration on the grain morphology of some tungsten incandescent lamp filaments," *Metallurgical transactions A*, 23A, August, 2259-2262.
- [17] Welsch, G. et. al.(1979), "Recovery and recrystallization of doped tungsten," *Strength of Metals and Alloys, Proceedings of the 5th International Conference*, 1693-1698.