

자동차용 전구의 열피로수명의 확률론적 거동

박상필*, 오환섭+, 박종찬**, 박철희**

Statistical Analysis of Thermal Fatigue Life for Automobile bulb

Sangpil Park*, Hwansup Oh+, Jongchan Park**

Abstract

At this research, we examined probability of light bulb's life span value and prediction on purpose to inquire out the span of repeat velocity as fracture probability by executing the fatigue test, which is considered property of Tungsten filament's thermal fatigue used as an automobile bulb. As a result, we can confirm what the most suitable solution is weibull distribution and log normal distribution. Tungsten filament's span gets longer as the fatigue repeat velocity gets shorter. And, repeat span is about 15%~40% shorter than sequence life span.

1. 서론

열피로(Thermal fatigue)의 정의는 자유열팽창이 부분적으로 또는 완전히 구속되었을 때 가열과 냉각이 반복됨에 따라 재질에 점증적인 손상을 주고 궁극적으로는 균열이 발생되어 최종적으로 파손에 이르는 현상이다.¹⁾ 열피로를 다시 세분하여 보면 내부의 구속조건과 반복되는 외부의 열적 변화에 의한 열응력피로(Thermal stress fatigue)와 외부의 구속조건에 의하여 열 및 기계적 변화가 복합적으로 반복되는 열기계적피로(Thermal mechanical fatigue)로 구분하고 있다. 열응력피로에 대한 연구는 온도구배가 큰 경우와 이종재 접합의 경우에 대하여 연구가 되었고¹⁰⁾, 열기계적피로에 대해서 경계의 구속조건에 따라서 연구가 체계적으로 되어있다. 그러나 전구의 필라멘트와 같이 경계

구속 없이 전구의 on/off로 열의 가열과 냉각만이 반복적으로 일어나는 열피로(thermal cyclic fatigue)가 있다. 이와같이 단순가열냉각만이 반복적으로 작용하는 경우는 아직 열피로의 관점에서 연구된 바가 없고 또, 열적 특성과 피로파괴의 기구가 마이크로 오더의 굽기를 갖는 텅스텐 필라멘트에도 적용되는가 하는 점은 매우 흥미롭다고 생각된다.

따라서 본 연구에서는 자동차용 전구용으로 사용되는 텅스텐 필라멘트의 열피로 특성을 고려한 피로시험을 수행하여 전구의 수명평가 및 예측에 대해서 확률론적으로 검토하여 전구의 수명의 반복속도 의존성과 관련하여 반복속도에 따른 수명의 확률거동, 통계적 해석에 의한 파손해석, 수명의 신뢰성과 확률밀도에 파괴 확률론적으로 규명하고자 한다.

* 발표자, 경희대 기계공학과 (seamew@joins.com)
주소: 449-701 경기도 용인시 기흥읍 서천리 1번지 경희대학교
+ 경희대 기계산업시스템공학부
++ 경희대학교 대학원

2. 실험 방법

2.1 시험재료 및 형상

본 연구에서 사용된 시료는 텅스텐 필라멘트를 사용하는 자동차 Stop lamp (12V 21/5W)를 시료로 채택하였다. 텅스텐 필라멘트의 화학 성분을 X-선 미량분석기(energy dispersive x-ray spectrometer)를 이용하여 분석한 결과는 Table 1과 같다. Table 2는 실험에 사용된 자동차 Stop lamp에 대한 한국공업규격의 형식이다.

Table 1 Characteristic of Tungsten Filament(Wt, %)

material	W	O	total
composition	88.47	11.53	100

Table 2 Type of stop lamp for automobile

type	glass blub	base	filament type	watt	life (hr)
A12V 21/5W	S25	BAY 15D	C-6 C-12	(21) (5)	200

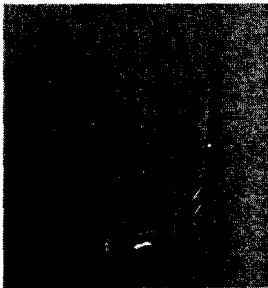


Fig. 1 Test specimen

2.2 실험장치 및 실험방법

시험은 IEC 809 규정에 의거하여 시료를 정격전압으로 1시간을 aging을 한 시료에 대하여 IEC 809의 규정에 의하여 On/Off 실험하였다. 전구 수명의 반복속도 실험의 경우 타이머릴레이를 이용하여 Fig. 2와 같이 텅스텐 필라멘트를 5sec, 10sec, 15sec 간격으로 on/off 시켰고, 열피로수명 실험의 경우 시험전압은 정격전압을 기준으로 2V씩 변화하여 가며 실험을 수행하였다. 또 입력전압의 XX과 전구의 필라멘트가 반복가열로 인하여 열피로 특성은 Fig. 3의 회로를 구성하여 수행하였다.

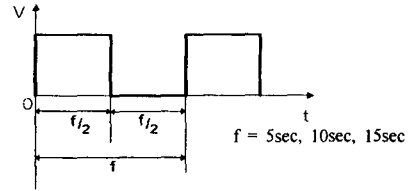


Fig. 2 Test condition by repeated thermal fatigue

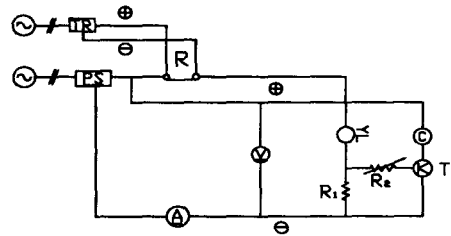


Fig. 3 Diagram of experiment device (on/off control)

2.3 텅스텐 전구의 수명특성

전구의 전압특성의 변화는 전구의 종류, 모양, 필라멘트의 제조 조건 등에 따라서 일정하지는 않으나 일반적으로 다음의 식이 적용된다.

$$\frac{L_1}{L_0} = \left(\frac{V_1}{V_0}\right)^a = \left(\frac{I_1}{I_0}\right)^b \quad (1)$$

$$\frac{W_0}{W_1} = \left(\frac{V_1}{V_0}\right)^c$$

여기서, L_0 , L_1 : 수명, V_0 , V_1 : 전압, I_0 , I_1 : 전류, W_0 , W_1 : 전력, a, b, c: 텅스텐 전구의 지수이다. 각 지수는 전구의 형식에 따라 다른 값을 나타낸다³⁾. 한국공업규격(KS)에서는 전압과 수명과의 관계식에서 지수 a를 진공전구 13, 가스들이전구 14로 정하고 있다.

2.4 전구수명의 통계적 해석의 기본 개념

가. 파손확률밀도 함수

파손확률밀도함수 (failure probability density function) $f(t)$ 는 어느 시간간격 사이에서 발생하는 고장수와 원표본수 N 과의 비율을 시간간격 Δt 로 나누어 준 것이다. 즉, 단위시간당 어떤 비율로 파손이 발생하고 있는가를 나타낸다.

$$f(t) = \frac{[n(t) - n(t + \Delta t)]/N}{\Delta t} = \frac{dF(t)}{dt} \quad (2)$$

누적파손확률함수 $F(t)$ 와 신뢰도 함수 $R(t)$ 는 다음과 같이 된다.

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt = 1 - \int_t^\infty f(t) dt \quad (3)$$

$$R(t) = \int_t^\infty f(t) dt = 1 - F(t) \quad (4)$$

그리고 식(3)에서 $F(t)$ 대신에 $1 - R(t)$ 를 대입하여 미분하면 파손확률밀도함수 $f(t)$ 는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{dF(t)}{dt} = \frac{d(1 - R(t))}{dt} \\ &= -\frac{dR(t)}{dt} = -\frac{1}{N} \frac{dn(t)}{dt} \end{aligned} \quad (5)$$

나. 파손확률밀도 함수의 종류

1) 지수분포(exponential distribution)

고장까지의 시간의 분포가 지수분포인 경우의 파손확률밀도함수 $f(t)$ 는 식(6)과 같다.

$$f(t) = \frac{1}{\theta} e^{-t/\theta}, \quad t > 0 \quad (6)$$

여기서 θ 는 파손확률밀도함수의 모수(parameter)로서 평균수명을 나타낸다. 이 경우의 신뢰도 함수 $R(t)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R(t) &= \int_t^\infty f(t) dt \\ &= \int_t^\infty \frac{1}{\theta} e^{-t/\theta} dt = e^{-t/\theta} \end{aligned} \quad (7)$$

또한 파손률함수 $h(t)$ 는 다음과 같이 평균수명의 역수인 상수가 된다.

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{1}{\theta} \quad (8)$$

2) 정규분포(normal distribution)

단일부품의 파손확률밀도함수는 대부분의 경우 정규분

포가 되며 사용시간이 증가함에 따라 그의 파손률 $h(t)$ 는 증가(Increasing Failure Rate)하게 된다.

정규분포인 경우의 확률밀도함수 $f(t)$ 와 누적분포함수 $F(t)$ 및 신뢰도 함수 $R(t)$ 는 다음과 같다.

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (9)$$

$$F(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^t \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] dx \quad (10)$$

$z = \frac{x-\mu}{\sigma}$ 라는 변수변환을 하면, $dz = \frac{dx}{\sigma}$ 이므로 $z=0$, $\sigma^2=1$ 로 표준화된 정규분포인 경우 $f(t)$ 와 $F(t)$ 는 다음과 같다.

$$f(t) = \phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) \quad (11)$$

$$F(t) = \Phi(z) = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz \quad (12)$$

3) 와이블 분포(Weibull distribution)

와이블 분포는 다음 식과 같이 표현되는데 α 는 형상모수(shape parameter), λ 는 척도모수(scale parameter) 그리고 r 는 위치모수(position parameter)를 가리킨다.

$$f(t) = \frac{\alpha}{\lambda} \left(\frac{t-r}{\lambda}\right)^{\alpha-1} \exp\left[-\left(\frac{t-r}{\lambda}\right)^\alpha\right] \quad (13)$$

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t-r}{\lambda}\right)^\alpha\right] \quad (14)$$

$$R(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t-r}{\lambda}\right)^\alpha\right] \quad (15)$$

$$h(t) = \frac{\alpha}{\lambda} \left(\frac{t-r}{\lambda}\right)^{\alpha-1} \quad (16)$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 열피로 수명 반복속도 의존성의 확률 특성

피로반복주기 변화에 따른 열피로 수명의 반복속도 의존성의 분석을 위해 우선 네 가지 분석법을 통해 전구의 열피로 파손특성이 어떤 분포인가를 검토하였다. Fig. 4는 13.8V(T=1885℃)의 전압하에서 반복속도 f=5sec, 10sec, 15sec로 실험한 결과 열피로 수명을 표시한 것이다. 이것을 전질의 파손확률 밀도함수 $f(t)$ 의 관점에서 검토하여 그 결과를 Fig. 5와 Table. 1에 각각 표시하였다. Fig. 5에서

아수 있듯이 반복주기가 5sec인 경우는 와이블 분포가, 10sec, 15sec에서는 로그 정규분포와 와이블 분포가 적합한 것으로 판단되고, Table. 1의 Anderson-Darling 지수 에서 알 수 있다. 이는 Schijve는 피로수명의 통계적 연구방법으로서 와이블 분포함수(Weibull distribution function function)와 정규분포 함수(normal distribution function)를 비교 연구하여 와이블 분포 함수가 피로수명 평가에 더 적합하다는 결과와도 일치한다. 이상에서 알 수 있듯이 Tungsten Filament의 파손확률적 거동은 본 연구의 범위에서는 와이블 확률 분포 함수를 이용하는 것이 적합함을 알 수 있다.

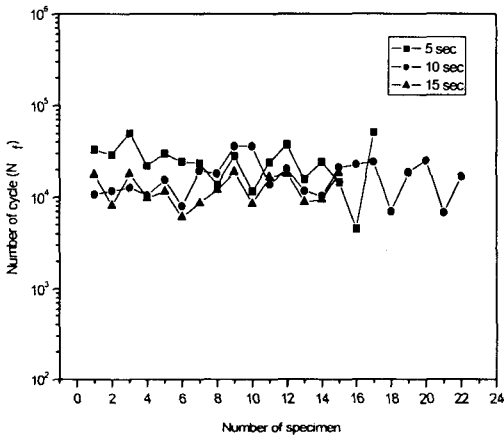
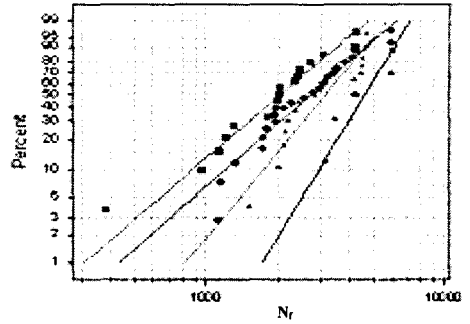
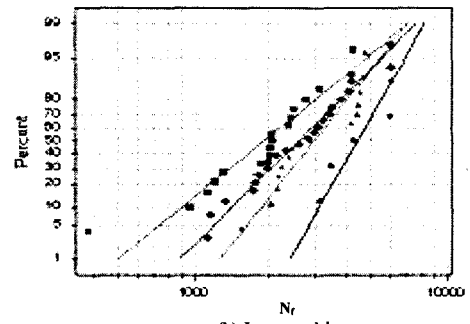


Fig 4 Fatigue cycle life according to fatigue cycle period (T=1885°C, V=13.8V)

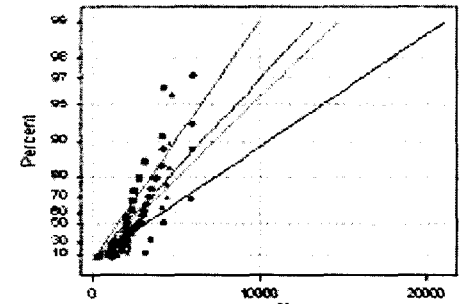
또 Fig. 5의 와이블 분포 거동을 형상모수(Shape parameter)와 척도모수(Scale parameter)의 거동을 Table. 1에 정리 하였다. 반복주기가 가장 큰 15sec의 경우 Shape parameter가 가장 크고 10sec, 일때 2.294, 5sec일때 2.232로서 점차 감소하고 반복주기(속도)의 의존성이 있음을 알 수 있다. 한편 척도모수(λ)는 반복속도가 비교적 빠른 5sec 일때 λ 는 29130이고 10sec, 15sec로 증가함에 따라 각각 19464, 14258로서 점차 감소하는 경향을 나타내고 있다.



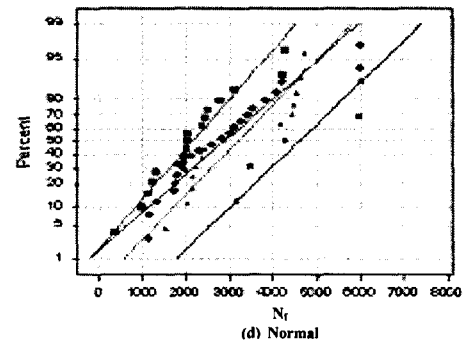
(a) weibull



(b) Lognormal base



(c) Exponential



(d) Normal

Fig. 5 Four Probability Comparison according to Fatigue Cycle Speed

3.2 열피로 수명거동과 파손확률 특성

열피로수명의 실험은 선풍창을 구속하지 않고, 단순 가열 냉각 만을 고려 정격전압을 기준으로 2V씩 변화하며 15sec 간격으로 on/off 시켜 피로시험한 결과 전구의 파손수명을 Fig. 6에 정리 하였다. 여기서 알 수 있듯이 텅스텐 필라멘트 전구의 열피로 수명을 입력전압 V(T)과 파손수명(Nf)이 semi-log 지상에서 직선상으로 잘 정리 되고 고온에서 피로 한도도 존재함을 보여주고 있다. Fig. 7은 Fig. 8의 V(T)-Nf 선도상에서 유한수명영역의 파손확률을 작용온도 기준으로 정리한 것이다. Fig. 7은 반복수명 실험된 데이터를 온도대비 상당 켄짐 시간으로 나타낸 와이블 확률을 나타낸 그림이며 Fig. 8은 반복수명 실험된 데이터를 온도대비 피로 반복수를 나타낸 그림이다. Table 2는 반복수명 실험된 데이터를 온도별로 분석한 와이블 분포 결과를 나타낸 테이블이다.

피로가 고려되지 않는 2307℃에서는 Shape(기울기)가 가장 크고 피로가 고려되는 실험온도 중 실험온도가 낮아질 수록 Shape가 작아지는 경향이 있다. MTF 및 Scale값은 실험온도가 낮을수록 커지는 경향이 있다.

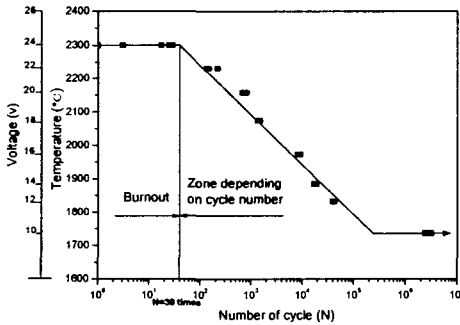


Fig. 6 Relation between number of cycle and temperature of tungsten filament for C-6 series

Table 1 Weibull Data according to Fatigue Cycle Speed

Fatigue Cycle Speed	Shape parameter (α)	Scale parameter (λ)	MTTF*1	A-D*2
5 sec	2.2332	29130	2150	0.928
10 sec	2.2942	19464	2873.3	0.815
15 sec	3.157	14258	3564	1.618

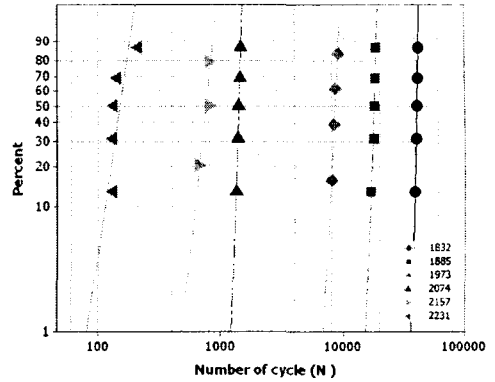


Fig. 7 Weibull Probability by temperature on number of cycle

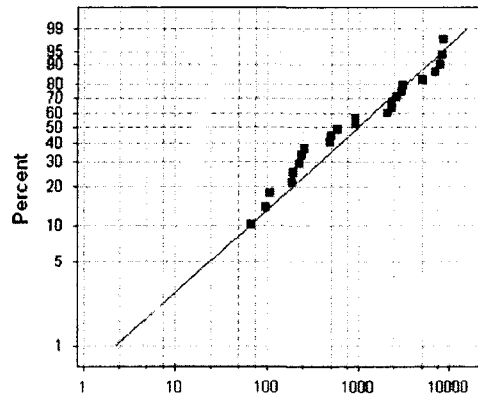


Fig. 4-5 Shape parameter of Weibull Probability by Gradient on Continuity test

Table. 2 Weibull Data according to Cycle

Temperature(°C)	Shape parameter (α)	Scale parameter (λ)	MTTF	A-D
1935	4.1616	4745.5	4311.1	3.297
2004	5.3575	1866.9	1721	1.918
2076	8.6906	583.37	551.54	2.347
2159	5.8097	206.68	191.4	2.39
2236	4.1671	53.028	48.177	2.259

4. 결론

텅스텐 필라멘트 전구 수명의 신뢰성을 확인하기 위하여 On/Off를 반복하는 열피로 수명실험하고 그 결과 얻어진 열피로에 의한 파손수명을 통계적으로 해석하여 전구수명의 확률론적 거동을 규명하고자 하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 자동차용 전구의 열피로 수명은 전압 V(T)와 파손수명(N_f)는 Semi-log 지 상에서

$$T = 2461 - 128.3 \log N_f$$

로 표시된 고온에서도 피로한도가 존재함을 확인하였다.

2) 유한수명영역내에서 전구의 weibull 분포의 파손확률함수로 표시된다.

3) 열피로 수명은 weibull 함수의 형상모수 α 와 척도모수 λ 는 각각 Table. 1과 같다.

참고 문헌

- 1) Spera, D. A., "What is thermal fatigue?", ASTM STP 612, pp. 3~9, 1976.
- 2) 지철근, 전기응용, 문운당, pp. 17~25, 1993.
- 3) David D. Van Horn, "Mathematical and physical bases for incandescent lamp exponents", illuminating engineering ,Vol. 6, pp. 196~202, 1965.
- 4) Becker, R., "The Life Period and the Vaporization of Tungsten," Zeitschrift pur Technische Physik, Vol.6,1925,p.309.
- 5) Bas-Taymaz, E, "On the life of an Incandescent Tungsten Filament and the Evaporation Velocityof

Tungsten in High Vacuum," Zeitschrift fur Angcwandte Physik, Vol. 2, 1950, P 374.

6) Jones, J. A. and Langmuir, L., "The Characteristics of Tungsten Filaments as Functions of Temperature, Part II," General Electric Review Vol. 30, 1927 , p. 354.

7) Szwarc, R., Plante, E. R. and Diamond, J. J., "Vapor Pressure, and Heat of Sublimation of Tungsten," Journal of Research NBS, Vol. 69A, p. 417.

8) Peacock, J. C. and Wilson, A. D., " Electrotransport of Tungsten and Life of a Filament, "Journal of Applied Physics, Vol. 39, 1968, p.6037.

9) Forsberg, O. J., "Determining subminiature Lamp Life ,"EDN/EEE(Electrical Design News/Electrical and Electronic Engineers), Vol. 16, 1971, p. 57.

10) 오환섭, 김성재, 김도형, 박래신 "이종재 브레이징 접합부에서의 중간재(Filler metal)두께에 따른 열응력 해석 및 고찰" 대한용접학회 추계학술대회 pp. 219~221, 2003

12) 김경열, 탁영지, 박종찬, 오환섭 "Tungsten Filament의 열피로 메카니즘", 한국자동차공학회 춘계학술대회논문집(III), pp1043~1049, 2002

13) 統計的J疲勞試驗方法, JSME 日本機械學會基準, JSME S 002-1981