

자동차용 Halogen Lamp의 수명 예측

김충식[†] · 신승중^{*} · 광계달^{**}

Lifetime Estimation of an Automotive Halogen Lamp

Chung-Sik Kim, Seung-Jung Shin and Kae-Dal Kwack

Key Words Halogen lamp(할로겐램프), Tungsten filament(텅스텐필라멘트), Burnout(용융), Hot spot model(국부온도상승), Sag(처짐변형), Oxidation(산화)

Abstract

This paper presents an accelerated life test for burn out of tungsten filament of automotive halogen lamp. There are many failure modes and failure factors that associated with tungsten filament. But in this explain the dominant failure mode of tungsten filament is the burnout of the filament failure. At first, over voltage, high temperature, inrush current and vibration are selected as stress factors by using of two stage Quality Function Deployment(QFD). And we planed accelerated life test that has one factor(voltage) and three levels. By experiment it has absorbed that over voltage has an effect on the life of halogen lamp. Using ALTA programs, we estimated the common shape parameter of Weibull distribution, life-stress relationship and B_{100p} life.

1. 서론

텅스텐 필라멘트를 사용한 halogen lamp는 incandescent lamp 내에 halogen gas과 noble gas를 봉입한 전구로 텅스텐 필라멘트에 전류가 흐르면서 빛을 발생시킨다.

이렇듯 halogen lamp는 그 동작원리가 간단하고 누구나 손쉽게 다룰 수 있으며, 또한 자연스러운 빛을 내어 대부분의 자동차 head light로 널리 사용되고 있으나 에너지의 95%가 열로 발산되고, 나머지 5%만이 빛으로 변환되기 때문에 효율이

떨어지고 수명이 짧다는 단점을 가지고 있다. 즉, 열이 상승할수록 광효율과 색온도는 증가하지만 필라멘트의 증발이 가속되어 점점 가늘어지다 결국 단선되어 lamp의 수명을 다하게 된다.

본 연구에서는 자동차 head light로 사용되는 halogen lamp를 대상으로 가속수명시험을 실시하여 고장모드 및 고장메커니즘을 규명하고 수명-스트레스의 관계식을 추정, 아울러 B_{100p} 수명을 제시하고자 한다.

2. Halogen lamp의 고장 분석

2.1 Halogen lamp의 구조와 동작원리

Halogen lamp의 구조 및 텅스텐 필라멘트의 형상을 Fig. 1 (a), (b)에 나타내었다. 그림 (a)에서 bulb 내부에는 N₂, Ar 및 halogen gas가 봉입되어 있고, 텅스텐으로 이루어진 필라멘트와 tungsten-molybdenum 합금으로 이루어진 leading

[†] 김충식, 한양대학교 전자통신컴퓨터공학부
E-mail : m0anin@hotmail.com

TEL : 010-6828-4609

^{*} 한세대학교 IT학부

^{**} 한양대학교 전자통신컴퓨터공학부,
신뢰성분석연구센터(RARC)

wire가 연결되어 있다. bulb의 하부는 insulation으로 채워진 base로 둘러싸여 절연의 역할을 하며, 필라멘트는 그림 (b)와 같이 짧은 길이에 최대 효율을 얻기 위한 2중 나선 구조로 되어있다.⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾

Halogen lamp에서 전류가 base와 leading wire를 통해 필라멘트로 흐르게 되면, 텅스텐으로 이루어진 필라멘트는 높은 전기 저항으로 인해 열과 빛을 발산하게 되는데 이때 필라멘트에서 발산되는 빛을 이용하여 자동차 head light로 사용한다.⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾

Halogen lamp는 Fig 2에서 보이는바와 같이 일반 incandescent lamp와 달리 필라멘트에서 증발한 텅스텐이 bulb 내부에 봉입된 halogen gas와 Ar에 의해 재생되는 halogen cycle model로 인해 보다 긴 수명을 갖고 있다.⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾

부가적으로 자동차에서 사용되는 halogen lamp의 각 요소와 그 재료들을 Table 1에 나타내었다.⁽⁶⁾

2.2 Halogen lamp의 고장모드 및 메커니즘

Halogen lamp의 고장모드는 필라멘트의 open, leading wire의 open, 필드에서 "백화(whitening)"라고 칭하는 leak에 의한 필라멘트의 oxidation 및 bulb fracture 등 여러 가지 형태가 있으나 공정 중 발생하는 결함에 의한 취성파괴, 또는 필드에서의 과도한 충격에 의한 bulb fracture를 제외한 대부분의 고장은 주로 필라멘트의 고장에 의해 발생한다. 따라서 halogen lamp의 수명은 필라멘트의 거동과 밀접한 관계가 있다고 할 수 있다.^{(4),(5)}

Halogen lamp의 수명에 가장 큰 영향을 끼치는 필라멘트의 고장모드는 크게 open과 백화가 있으며 그 원인이 되는 메커니즘으로는 burnout과 oxidation 등이 있다. 각 메커니즘에 따른 필라멘트의 변형 형태를 Fig. 3에 나타내었다.^{(1),(7)-(10)}

필라멘트의 burnout에 의한 open의 원인은 텅스텐 증발에 의한 것임이 이미 밝혀져 있다. 온도 구배 및 텅스텐 증발률이 균일한 기하학적, 물리적, 화학적으로 완벽한 이상적인 필라멘트는 lamp 점등 시 텅스텐 증발에 의한 직경의 점진적 감소와 halogen cycle model을 통한 재생이 반복되어 일정한 직경과 반영구적 수명을 갖게 된다. 그러나 실제 이러한 상황은 일어나지 않으므로 필라멘트 용융단선의 원인을 설명하기 위한 hot spot model, sag 등 여러 가지 모델들이 제시되었다.⁽⁷⁾⁻⁽¹⁰⁾

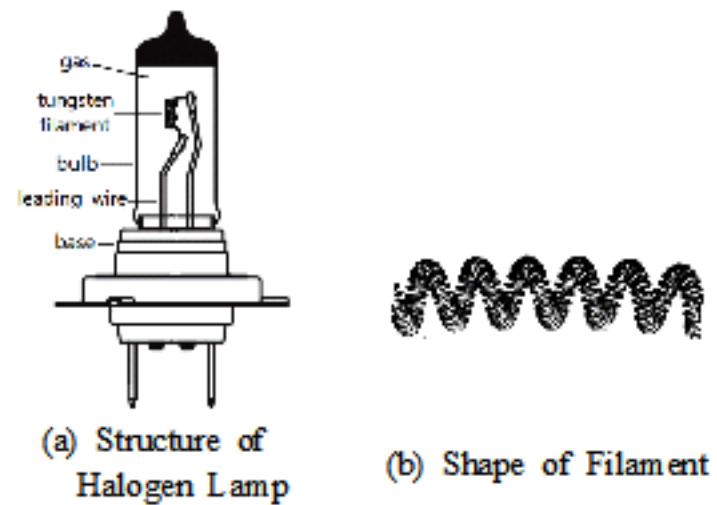


Fig. 1 Typical Halogen Lamp

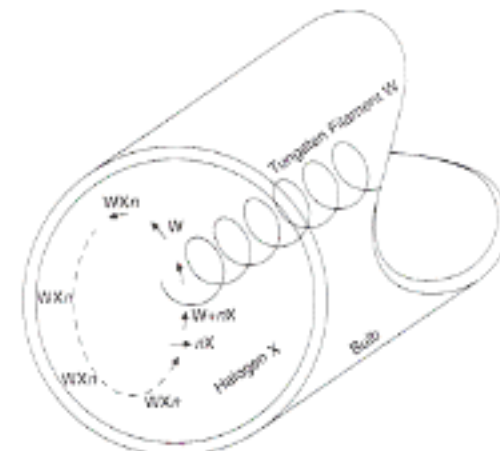
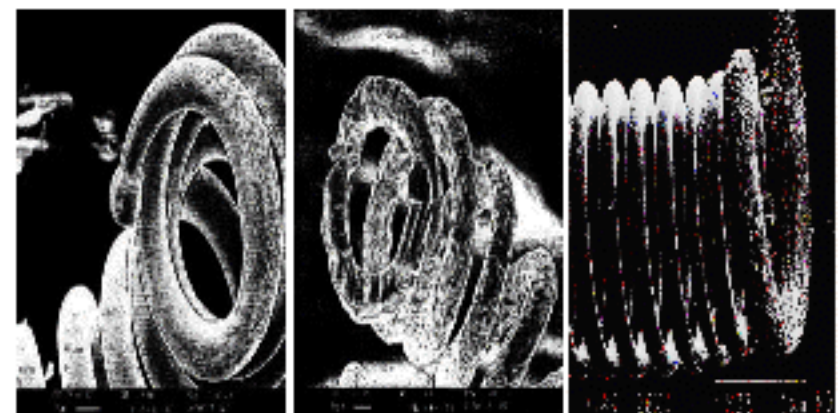


Fig. 2 Halogen Cycle Model

Table 1 Material of Halogen Lamp

Elements of Halogen Lamp	Material of Elements
Bulb	Hard glass, Quartz
Filament	Tungsten
Leading wire	Tungsten-Molybdenum
Gas	N ₂ + Ar + Halogen gas
Base	Copper, Aluminium



(a) Burnout - Hot spot model (b) Burnout - Sag (c) Oxidation

Fig. 3 Failure Mechanism of Filament

선행 연구⁽⁷⁾⁻⁽¹⁰⁾에서 주변 필라멘트 보다 국부적으로 온도가 높은 초기 결함 부위가 존재하고, 그로부터 필라멘트 용융단선이 발생한다는 **hot spot model**을 제안되었다. 즉, 텅스텐 증발률이 주위보다 높은 부위에서 **self accelerating process**에 의해 온도가 더욱 상승하여 결국 필라멘트가 용점에 도달, **open**된다는 이론이다.

그 밖에 **grain boundary sliding**에 의해 발생한 **sag**를 원인으로 하는 **open model**이 있다. 즉, 자동차 **head light**의 구조와 필드에서의 진동 등에 따른 하중에 의해 **grain boundary**에 전단응력이 가해져 **grain boundary sliding**이 발생하고, 이는 필라멘트의 **sag**를 유발, 변형시키며 변형된 부위에서는 **hot spot model**에 따른 **open**이 발생한다. 따라서 이 **model** 역시 필라멘트 **burnout open**의 한 형태라고 할 수 있다.⁽¹⁰⁾

Halogen lamp의 또 다른 고장모드인 백화는 필라멘트의 **oxidation**에 의해 발생하는데 이는 **bulb**의 밀봉상태 이상이 그 원인으로 정상적인 수명에 의한 고장이 아닌 제조 및 운반 과정상의 결함에 의한 고장 또는 필드에서 과도한 충격으로 인한 취성파괴로 볼 수 있다.^{(1), (5)}

필라멘트의 고장을 유발하는 원인에는 **hot spot model**, **sag**, **leak** 이외에도 **halogen lamp**의 **switching**에 따른 돌입전류, 필드에서 작동에 따른 외부 기온 및 차량 유동에 따른 진동 등에 영향을 받는다. 즉, 자동차 **head light**의 **switching**시 야기되는 돌입전류에 의해 필라멘트의 증발이 가속되어 수명이 감소하며, 또한 외부 기온과 차량의 이동에 따른 진동 역시 **lamp**의 수명에 영향을 미친다고 보고되었다.^{(5), (10)}

필드에서의 고장 사례 및 선행 연구의 결과를 바탕으로 **halogen lamp**의 **Fault Tree Analysis(FTA)**를 Fig 4에 나타내었다.

3. 가속수명시험

3.1 2-stage QFD(Quality Function Deployment)

가속수명시험을 계획하기 위해 **halogen lamp**의 **FTA**를 이용하여, 2-stage **QFD**를 Fig 5와 같이 시행하였다. 이를 통해 신뢰성 평가를 효과적으로 수행할 수 있는 시험방법들의 분석 결과, 전압을 가속인자로 하는 시험이 자동차용 **halogen lamp**의 가속수명시험에 가장 적합하다고 판단되었다.

3.2 시료 선정 및 고장 판정 기준

가속수명시험에 사용할 시료는 자동차 **head light**용 **halogen lamp**로 정격전압 및 정격전력이 각각 12V, 55W이다. 또한, 필라멘트의 **open**에 의한 **lamp**의 완전한 소등을 고장으로 판정하였으며 필라멘트를 구성하는 텅스텐의 용점은 3392℃이다. 상기 시료의 전기적 특성과 고장판정기준을 Table 2에 나타내었다.^{(6), (7)}

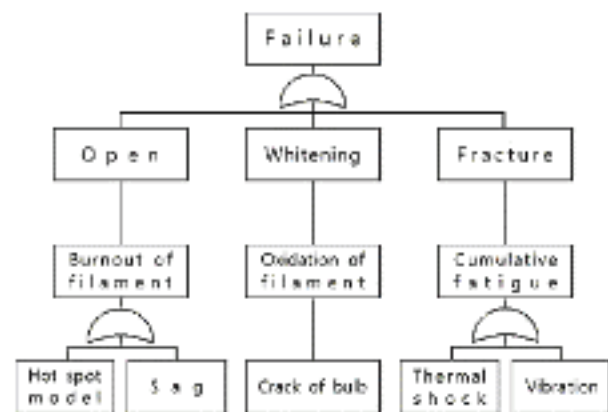


Fig. 4 Fault Tree Analysis

		Mechanisms		
		Burnout of filament	Oxidation of filament	Degradation of bulb
Requirements / Stresses	◎:5, ○:3, △:1			
	Operation Life time B ₀ = 330hr	◎		
	Voltage DC 13.2V ± 2.0V	◎		
	Temperature -10°C to 150°C	△	△	△
	Vibration 0 to 2G	△	△	△
Score	12	2	2	

(a) Matrix 1 - Failure Mode/Mechanism

		Test			
		Over voltage	On/off cycle	Thermal cycle	Vibration
Mechanisms	◎:5, ○:3, △:1				
	Burnout of filament	12	◎	○	△
	Oxidation of filament	2			△
	Degradation of bulb	2			△
Score		60	36	16	16

(b) Matrix 2 - Test Method

Fig. 5 2 - Stage Quality Function Deployment

Table 2 Electrical Specification & Criteria

Parameter	Specification	Criterion
Operation Voltage	12V	Malfunction of Halogen Lamp (Open of Filament)
Power	55W	
Material of Filament	Tungsten	
Melting Point of Filament	3392℃	

3.3 가속인자 및 수준 결정

자동차용 halogen lamp를 대상으로 하여, 전압이 수명에 미치는 영향을 알아보기 위해 lamp의 정격전압 12V의 110%, 117%, 127% 가속한 13.2V, 14.0V, 15.2V의 총 3개 수준의 전압을 인가하기로 결정하였고, 시험 환경은 실온인 25°C로 하는 가속수명시험을 설계하였다.

각 조건에서 시험시료는 Meeker-Hahn's rule⁽¹⁾을 이용하여 4:2:1의 비율을 갖는 16개, 8개, 4개의 시료를 사용하였고, 이를 Table 3에 나타내었다.

3.4 시험 장치 및 시험 방법

Halogen lamp의 가속수명시험을 수행하기 위한 DC power supply, 시료 고정용 jig, 항온항습기 및 fuse로 구성된 시험 장치를 Fig 6에 나타내었다.

시험에는 총 28개의 halogen lamp를 사용했으며 각 halogen lamp의 전류 변화를 24시간 간격으로 측정하여, 시간 경과에 따른 전기저항 변화를 간접적으로 확인하였다. 또한 시료가 고장을 일으키는 시점에는 측정 간격을 8시간 간격으로 하여 오차를 최소화 하였다.

3.5 시험 결과

3.5.1 시험 관측 결과

Halogen lamp의 가속수명시험을 시행하여 시료가 완전 소등 되었을 때의 필라멘트 상태를 분석한 결과 halogen lamp의 고장모드는 필라멘트의 burnout에 의한 open으로 판명되었으며, 이를 Fig 7에 나타내었다.

그림에서 보이듯이 halogen lamp의 고장모드는 필드에서 주로 발생하는 고장모드와 같은 필라멘트의 open임을 알 수 있으며, 각 시료의 고장시간을 Table 4에 나타내었다.

3.5.2 수명분포의 적합성 검토 및 가속성 검토

고장난 halogen lamp의 고장 분포 모델을 살펴 보기 위해서 와이블 분포(weibull), 지수 분포(exponential) 및 대수정규 분포(log-normal) 3가지의 분포함수를 대상으로 적합성 여부를 평가하였다. 시료의 고장 분포에 따른 고장의 적합성 여부는 우도함수(Likelihood Function) 평가 결과로 판단하였으며, halogen lamp의 고장 분포 함수 분석 결과 Table 5에서와 같이 가장 작은 우도함수 값을 갖

는 와이블 분포가 적합한 것으로 판단하여 halogen lamp의 수명 분포를 와이블 분포로 가정하였다.

Table 3 Test Matrix

Voltage	Temperature	25°C
13.2V (110%)		16ea
14.0V (117%)		8ea
15.2V (127%)		4ea

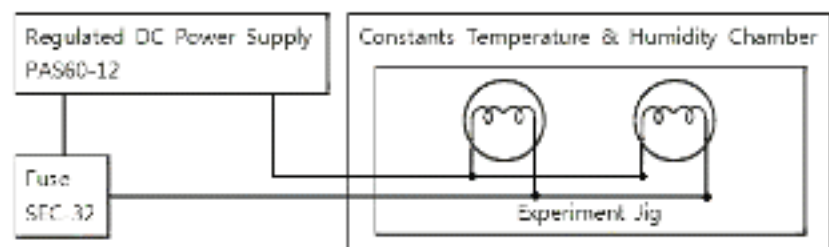


Fig. 6 Experiment Circuit for ALT

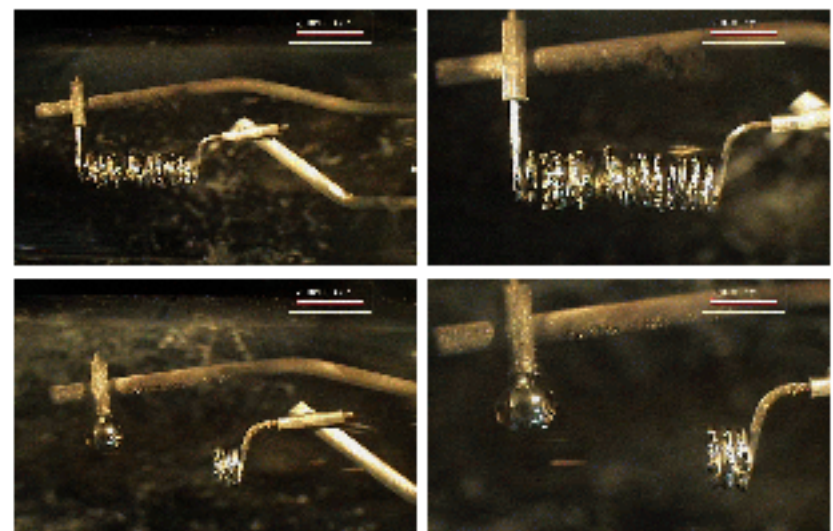


Fig. 7 Open of Filament(Burnout)

Table 4 Failure Time of Halogen Lamp [Unit : hr]

	13.2V	14.0V	15.2V
#1	1,710	1,610	840
#2	1,750	1,370	1,000
#3	1,280	1,740	1,170
#4	1,480	1,300	1,100
#5	1,750	1,290	830
#6	1,620	1,760	890
#7	1,380	1,720	1,080
#8	1,310	1,490	1,070

Table 5 Conformance Result of Life Distribution

Life Distribution	Weibull	Exponential	Log-normal
Likelihood Function	-179.0237	-224.6334	-180.0246

가속수명시험에서 관측된 고장시간을 시험조건 별로 와이블 확률지에 타점하여 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 인가한 전압의 세기 별로 데이터들이 직선에 가깝게 타점되어 있고, 각각의 수명분포 추정선이 서로 평행하게 나타난다는 것을 알 수 있다. 이로부터 halogen lamp의 수명 분포로서 와이블 분포가 적합하며 전압의 세기에 따른 가속성이 성립한다는 것을 알 수 있다.

3.5.3 가속수명시험 모델

Halogen lamp의 전기적 수명은 스트레스가 전압일 때 적용되는 모델인 역승모델(Inverse Power Law)이 적합하며, 본 연구에서는 특성수명(η), 전압(V) 사이의 관계식을 아래 식과 같이 적용하였다.

$$\eta(V) = A \cdot V^{-n} \quad (1)$$

여기서, A와 n은 재료 및 시험방법 등에 따라 결정되는 상수이다.

3.5.4 와이블 형상모수와 수명-스트레스 관계

와이블 분포와 식 (1)의 수명-스트레스 관계식을 가정하고, ALTA 프로그램을 이용하여 가속수명시험 데이터를 분석한 결과 형상모수(β) 및 각각의 상수의 추정치는 다음과 같다.

$$\beta = 8.4142, A = 2.2174 \times 10^{13}, n = 9.0368$$

따라서, halogen lamp의 전압에 따른 수명-스트레스 관계식은 아래의 식 (2)와 같다.

$$\eta(V) = 2.2174 \times 10^{13} V^{-9.0368} \quad (2)$$

식 (2)를 통하여 전압에 대하여 halogen lamp의 특성 수명을 추정할 수 있으며, 아울러 식 (2)를 이용하여 B_{100p} 수명을 식 (3)과 같이 추정할 수 있다. 또한 식 (3)을 이용한 B_{100p} 수명을 아래 식과 같이 추정할 수 있었다.

$$B_{100p} = \eta \cdot (-\ln(1-p))^{1/\beta} \quad (3)$$

3.5.5 시험결과의 해석

식 (3)을 통해 추정된 halogen lamp의 B₁₀ 수명 및 B₃ 수명을 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서와 같

이 전압의 변화에 따라 halogen lamp의 B_{100p} 수명은 지수함수적으로 감소하며, 전압의 미세한 변화에도 추정 수명이 급격하게 변화함을 알 수 있다. 또한 본 시료의 정격전압 12V 및 가속수명시험에서의 스트레스 수준인 13.2V, 14.0V, 15.2V 각각의 B₁₀ 수명 및 B₃ 수명을 추정하여 Table 6에 나타내었다.

본 연구대상이 사용되는 자동차용 head light에서 제시된 정격전압, 13.5V에서 추정되는 B₁₀ 수명은 1,035시간으로 halogen lamp의 최소 전기적 수명목표치인 3,000시간을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 또한, 수명의 3,000시간의 B₁₀ 수명을 보장하기 위해서는 12.0V이하의 전압에서 사용하여야 함을 알 수 있다.

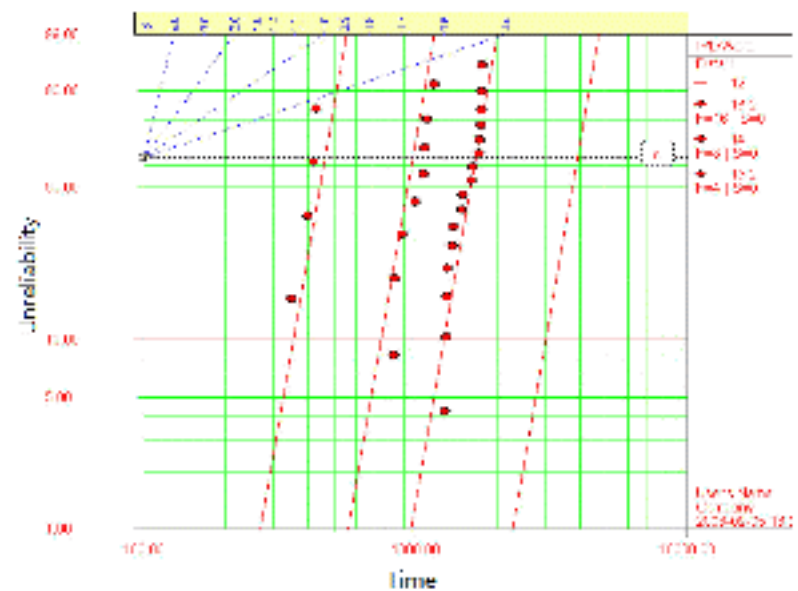


Fig. 8 Weibull probability paper plot

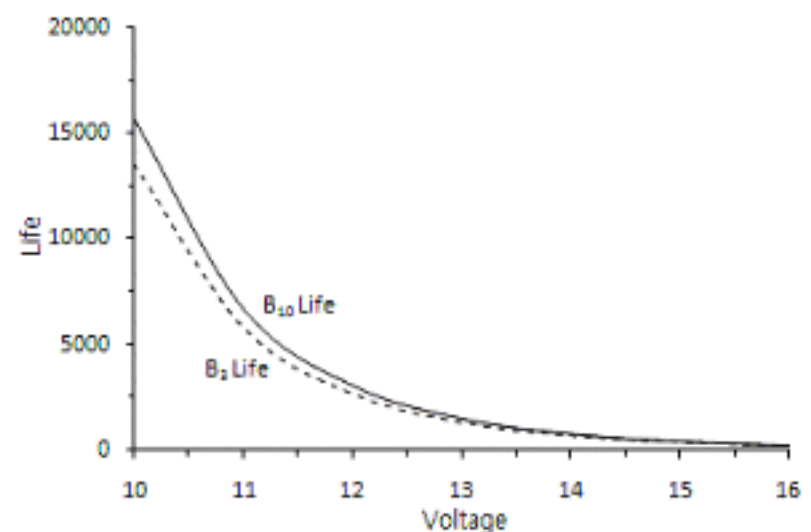


Fig. 9 B_{100p} Life vs. Voltage

Table 6 B_{100p} Life vs. Voltage

Running Voltage	12.0V (100%)	13.2V (110%)	14.0V (117%)	15.2V (127%)
B ₁₀ Life	3,002hr	1,268hr	745hr	354hr
B ₃ Life	2,590hr	1,095hr	643hr	306hr

본 시료의 "Test Report"⁽⁶⁾를 살펴보면 13.2V 인가 시 330hr의 B₃ 수명을 보증하고 있는데, 시험 결과 회사에서 제시한 기준 이상의 수명을 갖는 것으로 추정된다. 또한 "RS C 0061"⁽⁵⁾의 신뢰성 평가 기준에 따르면 15.2V 인가 시 350hr의 B₃ 수명을 보증수명 목표로 하는데, 시험 결과 이에 못 미치는 306hr의 B₃ 수명을 갖는 것으로 추정할 수 있었으며, 각 보증수명 및 추정수명을 Table 7에 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 자동차 head light로 사용되는 halogen lamp를 대상으로 가속수명시험을 실시하여 주로 발생하는 필라멘트의 고장에 대하여 고찰하였다. 고장분석 결과 주요 고장모드는 burnout에 의한 필라멘트의 open으로 확인되었다.

또한, 전압을 스트레스 요인으로 하는 가속수명 시험 결과 수명의 전압에 따른 가속성을 확인하였으며, 그 가속성을 바탕으로 B_{100p} 수명식을 추정하였고, 추정수명과 시료의 보증수명 및 "RC C 0061"⁽⁵⁾에서의 신뢰성 평가 기준을 비교하여 자동차용 필라멘트 전구로서의 신뢰성을 평가할 수 있었다.

Table 7 Qualification and Estimate B₃ Life

Running Voltage	Classification	B ₃ Life
13.2V	Osram Report	330hr
	Test	1,095hr
15.2V	RS C 0061	350hr
	Test	306hr

참고문헌

- (1) Cayless M. A. and Marsden A. M., 1997, "Lamps and lighting", *Arnold*, pp. 177-193.
- (2) Che B. and Park J. P. 2006, "Illumination Engineering", *Taeyoung*, pp. 26-40.
- (3) Choi B. S., Choi H. K., Jo K. N., Jo K. S., Kang T. W., Kim J. H., Park H. M. and Won J. H., 2000, "Lighting System and Design", *Sungandang*, pp. 29-30.
- (4) Han S. C., Jung J. Y., Jung Y. U. and Lee E. J., 2006, "Electrical and Electronics Engineering for Automobile", *Mission*, pp. 417-424.
- (5) KATS, 2007, "RS C 0061: Lamps for Road vehicles"
- (6) Osram, 2005, "Test Report: H7"
- (7) Covington E. J., 1973, "Hot spot burnout of tungsten filaments", *Journal of IES*, pp. 372-380.
- (8) Horster H., 1971, "The burnout mechanism of incandescent lamps", *Philips tech. Rev.*, pp. 155-164.
- (9) Godfrey T. J., 1976, "On the nature and distribution of defects in tungsten lamp wire", *Journal of the less-common metals*, pp. 319-326.
- (10) Horacsek O., 1980, "Properties and failure modes of incandescent tungsten filaments", *IEE PROC.*, pp. 134-141.
- (11) Hahn G. J. and Meeker W. Q., 1985, "How to Plan an Accelerated Life Test - Some Practical Guidelines," *ASC Basic References In Quality Control: Statistical Techniques - Vol. 10, ASQC*