

의료용 할로겐램프의 가속수명시험에 관한 연구

정재한* · 김명수** · 임헌상*** · 김용수****†

* 경기대학교 대학원 산업경영공학과

** 수원대학교 산업공학과

*** 삼성전자(주)

**** 경기대학교 산업경영공학과

A Study on Accelerated Life Test of Halogen Lamps for Medical Device

Jae Han Jung* · Myung Soo Kim** · Lim Heonsang*** · Yong Soo Kim****†

* Department of Industrial and Management Engineering, Graduate School, Kyonggi University

** Department of Industrial Engineering, Suwon University

*** Samsung Electronics Co., Ltd.

**** Department of Industrial and Management Engineering, Kyonggi University

Abstract

Purpose: The purpose of this study was to estimate life time of halogen lamps and acceleration factors using accelerated life test.

Methods: Voltage was selected as an accelerating variable through the technical review about failure mechanism. The test was performed at 14.5V, 15.5V and 16.5 for 4,471 hours. It was assumed that the lifetime of Halogen lamps follow Weibull distribution and the inverse power life-stress relationship models.

Results: Mean lifetimes of pin and screw types were 19,477 hours and 6,056 hours, respectively. In addition, acceleration factor of two items are calculated as 4.8 and 2.2 based on 15.5V, respectively.

Conclusion: The life-stress relationship, acceleration factor, and MTTF at design condition are estimated by analyzing the accelerated life test data. These results suggest that voltage was very important factor to accelerate life time in the case of halogen lamps and the life time of pin type is three times longer than screw type lamps.

Key Words: Halogen Lamp, Accelerated Life Test, Inverse Power Model, Medical Device

• Received 22 September 2013, 1st revised 11 November 2013, 2nd revised 23 November 2013, accepted 25 November 2013

† Corresponding Author (kimys@kgu.ac.kr)

© 2013, The Korean Society for Quality Management

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-Commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

1.1 연구배경

본 연구에서는 산업 및 의료용에 적용하는 할로겐램프의 가속수명시험을 통한 수명 추정에 관한 연구를 수행하였다. 의료용 할로겐램프는 산업용 할로겐램프보다 연색성이 높아 피부의 색상, 염증의 진행 정도 등을 확인할 수 있도록 제작된 램프이다. 또한, 할로겐램프는 일반 백열전구에 비해 최대 5배 수명이 길고, 같은 전력을 사용 할 때 약 200배 이상의 작은 체적으로도 동일한 광 효율을 낼 수 있으며, LED 조명 보다는 연색성과 조도, 색온도가 높은 관계로 경제적으로 활용하기가 좋은 조명 장치이다. 내열성 및 내온도성 특성이 매우 우수하여 온도변화가 심한 장소 또는 온도가 매우 낮거나 높은 장소에서도 사용이 가능하며, 높은 조도를 요구하는 산업용장비 및 자동차 조명용으로 널리 사용되고 있다. 특히 의료기기용에 사용되는 조명은 할로겐램프처럼 연색성이 태양광과 비슷한 광원으로 사용해야만 시술자 및 환자에게 바른 의료 정보를 제공할 수 있다. 높은 연색성 및 높은 조도를 유지하기 위해 교류 및 직류 전원이 모두 사용 가능한 전원 내성이 우수한 할로겐램프가 널리 활용된다.

할로겐램프는 이와 같이 우수한 특성을 지녔음에도 불구하고, 짧은 수명으로 인한 잦은 교체로 사용자의 불만을 초래하며, 유지 보수에 많은 어려움을 겪고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 가속수명 시험을 활용하여 빠른 시간 내에 수명을 확인 할 필요가 있으며, 수명 예측을 통한 예방 정비를 수행함으로써, 사용자의 불편을 최소화 하는 것이 매우 중요하다. 예방정비를 수행함으로써, 진료 중 발생 가능한 사고를 미연에 방지하고 의료 사고를 막을 수 있다. 고가의 의료용 장비에 적용되는 저가형 조명의 잦은 고장은 제품의 가치를 떨어뜨리는 효과를 야기한다. 이러한 가치 하락은 국내 시장 및 해외 시장 개척을 저해하는 요인으로 분석 되고 있다.

따라서, 수명이 길고 안정적으로 사용할 수 있는 할로겐램프의 개발이 요구되며, 할로겐램프의 형태에 따른 수명에 대한 연구가 요구된다.

1.2 관련 문헌 연구

가속수명시험이란, 정상조건보다 가혹한 조건하에서 시험을 실시한 결과를 분석하여 정상조건에서의 수명을 추정하는 시험이며, 일반적인 프로세스는 <Figure 1>과 같다. 우선, 가속시험 대상을 정의한 후 시험을 수행하는 실험실 및 사용 현장 데이터를 바탕으로 고장원인, 고장 메커니즘 및 고장 모드 등을 분석한다. 그 다음, 고장 물리의 관점에서 가속 모형의 적합성을 검토한 후, 가속시험 적용의 적합성을 판단한다. 가속시험이 가능한 항목으로 판단되면, 가속수명 시험계획을 수립하고 시험을 실시한다. 가속 시험을 통하여 얻어진 자료는 정확하고 공정하게 정리한 다음 통계적 분석을 수행한다. 끝으로, 분석결과 및 필드 고장 품으로부터 가속시험법에 대한 재현성을 검증하고, 가속시험법을 확정하게 되는 것이다(Seo et al, 2008).

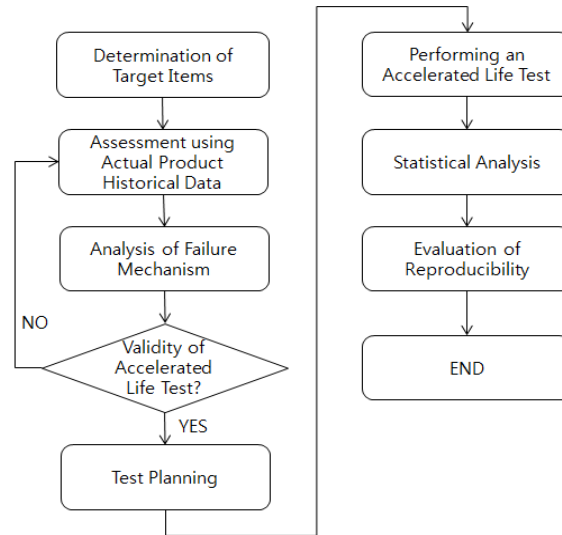


Figure 1. Process for Accelerated Life Test (Seo et al.2008)

가속수명시험에 관한 이론적 연구는 이미 많이 이루어졌다. 주로 가속 수명시험을 수행하기 전, 사용조건에서 수명과 관련된 추정치의 정밀도를 높이기 위해 가속 스트레스 수준, 총 시료수, 각 스트레스 수준에서 할당되는 시료비율과 같은 인자들을 최적화한 시험계획에 대한 연구가 많이 이루어졌다. 가속 수명 시험의 최적 계획은 제품에 인가하는 스트레스 방법, 관측방법, 관측중단여부 등에 의존한다(Nelson, 1990). 스트레스 인가 방법은 크게 일정형 스트레스, 계단형 스트레스, 점진형 스트레스 등이 있다. 일정형 스트레스는 스트레스 인가 방법 중 가장 대표적인 것으로서 시험단위에 일정한 수준의 스트레스를 시험 종료시점까지 유지하는 방법이다(Chernoff 1962, Nelson and Kielpinski 1976, Seo and Yum 1991, Tang and Xu 2005). 계단형 스트레스는 스트레스 수준을 계단형으로 증가시키는 시험으로, 시험단위의 고장까지 각 스트레스에 노출된 누적효과가 전이되는 모형을 요구한다(Miller and Nelson 1983, Bai et al. 1993, Fard and Li 2009). 점진형 스트레스는 시간에 따라 선형적으로 스트레스가 증가하는 시험이나, 스트레스 증가율을 일정 비율로 유지하기 어렵다는 단점이 있다(Bai et al. 1992, Yun and Jung 1993). 또한, 전원투입 및 전원 차단방식으로 사용되어지는 실제의 사용조건을 연속적인 가속시험 조건으로 가속을 수행하는 방법도 있다(Chun and Lee 1997).

관측방법은 연속적인 관측을 통해 정확한 고장시간을 측정하는 방법과 간헐적 관측을 통해 고장시간을 구간으로 측정하는 방법이 있다. 대부분의 연구에서는 연속적인 관측을 가정한 연구가 주로 이루어졌으나, 시험의 용이성 및 현실성을 감안할 때 간헐적 관측이 유용한 경우가 많다(Seo and Yum 1991, Wu et al 2008). 한편, 가속수명시험 데이터 형태는 모든 시험품목이 고장날 때까지 시험하여 고장시간에 대한 정보를 모두 수집할 수 있는 완전데이터, 일정시간동안 시험 후 시험을 종료하는 정시종결중단 데이터 및 일정 개수가 고장날 때까지 시험을 실시한 후 종료하는 정수종결중단데이터로 구분된다(Escobar and Meeker 1986). 더불어, 제품의 높은 신뢰성 때문에 가속 조건에서도 고장 시간 데이터를 획득하기 어려운 경우에는 고장 메커니즘이 유사할 경우에 적용이 가능한 가속열화시험이 대안으로 연구되기도 하며, 이는 제한된 시간과 비용 제약에서의 효율적으로 신뢰성을 평가하기 위한 시험 등이 있다(Lim 2012).

앞서 언급한 가속수명시험의 다양한 조건을 가정하여 가속수명시험 최적 설계에 관한 연구와 가속수명시험 분석 및 모수 추정에 관한 연구가 수행되었다. 첫째, 가속수명시험 최적 설계에 관한 연구는 가속 스트레스 수준의 최적

설계에 관한 연구(Fard and Li, 2009, Srivastava and Mittal 2010, Tang et al.2002, Seo et al.2009, Liu and Tang 2010)와 가속 스트레스 하에서 최적화된 시료 수 설계에 관한 연구(Tang et al. 2002, Seo et al. 2009, Liu and Tang 2010)로 구분된다. 둘째, 가속수명시험 분석 및 모수 추정에 관한 연구로는 특정 조건하에서 최대우도추정치에 관한 연구(Balakrishnan and Xie, 2007, Abd-Elfattah et al.2008)와 특정 조건하에서의 가속수명시험 데이터 분석에 관한 연구(Maciejewski 1995) 등으로 구분된다.

예를 들어, Miller and Nelson(1983)은 계단형 스트레스하에서 연속적인 관측을 통해 얻어진 완전데이터 하에서의 최적 시험설계에 관한 연구를 수행하였고, Escobar and Meeker(1986)는 일정형 스트레스하에서 연속적 관측으로 얻어진 정수종결중단 데이터의 최적 시험설계에 관한 연구를 수행하였다. 또한, 일정형 스트레스하에서 간헐적 관측을 통해 얻어진 정시종결중단 데이터의 최적 시험 설계에 관한 연구(Seo and Yum, 1991)와 점진형 스트레스하에서 연속적 관측을 통해 얻어진 완전데이터에 대한 최적설계에 관한 연구(Yun and Jung, 1993), 계단형 스트레스하에서 연속적 관측을 통해 얻어진 정시종결중단데이터에 대한 최적설계에 관한 연구(Fard and Li, 2009) 등이 이루어졌다. 뿐만 아니라, 단일 스트레스 뿐 아니라 복수의 스트레스 변수를 고려한 경우의 최적설계에 관한 연구도 이루어지고 있다(Park and Yum 1996, Khamis 1997, Elsayed and Zhang 2007, Xu and Fei 2007). 본 연구에서는 가장 보편적으로 사용되는 일정형 스트레스를 인가하였으며, 시험 설비에 센서를 부착하여 연속적 관측을 통해 정확한 고장 시간을 탐지하였다. 또한, 시험 계획 시, 정시종결중단 데이터를 얻고자 하였으나, 특정 시험 조건을 제외하고는 모든 시료의 고장 시간을 얻어, 완전 데이터의 형태로 분석이 이루어졌다. 다른 관점으로는 세 수준 스트레스에서의 시험되는 실제 모형이 이차인 경우에는 모형 모수들의 오추정에 따른 민감도 분석을 실시한 결과 모형 모수의 오추정의 폭이 크더라도 가중인자를 모형에서 위배되지 않게 추정한다면 통계적 효율이 크게 떨어지지 않음을 파악할 수 있다(Seo et al., 2001).

최근에는 이론적 연구뿐만 아니라, 기계류 및 전자부품 등의 가속수명시험에 관한 사례연구들이 많이 발표되고 있으며, 그 중 할로겐램프의 가속수명시험에 관한 연구는 다음과 같다. Jeong et al.(2010)는 할로겐램프의 주요 고장 모드로 텅스텐 필라멘트의 Burnout 현상을 제시하였고, 이러한 현상을 유발하는 원인으로 Sag 및 Hot Spot Model이 나타났으며, 주변의 필라멘트보다 점점 가늘어지는 Hot Spot Model이 정상 램프의 고장을 유발하는 가장 일반적 현상임을 확인하였으며, 이러한 할로겐램프의 고장모드는 Cayless et al.(1997)의 연구에서도 언급되었다. 아울러, 12V, 55W 급의 램프를 선정하여 전압을 가속인자로 가속수명시험 수행 시, 필라멘트의 열화를 확인하기 위해 특성측정으로 저항 성분 및 필라멘트 표면의 주름의 크기를 이용하였다.

이외에도 가속조건으로 전압 이외에 필드 환경을 묘사하기 위해 전압 변동 및 진동조건을 추가하여 가속수명시험을 실시한 연구도 이루어졌고(Lee et al. 2010), 자동차용 할로겐램프의 수명 추정 시, 2단계 품질기능전개 과정을 거쳐 가속인자로 전압을 선정하여 수명을 추정한 연구도 이루어졌다(Kim et al. 2008). 즉, 기존 연구에서는 가속인자로 전압을 주로 고려하였으며, 사용조건에 따라 진동을 복합적으로 고려하기도 하였다. 본 연구 대상인 의료용 할로겐램프는 사용 환경에서 진동 상태에 노출되지 않으므로 진동 시험을 고려하지 않았다.

따라서, 본 연구에서는 사용환경 및 기존 연구를 바탕으로 13.5V 의료기기용 할로겐램프의 가속조건으로 전압을 선정하였으며, 각 제조사의 제품을 14.5V, 15.5V 및 16.5V의 3수준에서 가속수명시험을 실시하였다. 아울러, 할로겐램프의 특성에 대한 열화 메커니즘을 확인하기 보다는 수명 관점에서의 시간을 확인하기 위해 고장 판정기준으로 필라멘트의 단선을 적용하였다.

1.3 연구의 목적

본 연구에서는 의료용 할로겐램프의 두 가지 형태인 핀 타입과 스크류 타입의 수명을 추정하고자 하며, 이를 통해 장시간 수명을 지닌 램프 형태를 파악하고자 한다.

본 연구 대상으로는 12V, 50W 급의 할로겐램프를 대상으로 하였으며, 시험 환경 등을 고려하여 여러 제조회사 중에서 대표적 두 기업의 제품으로 선정하였으며, 가속수명시험을 수행하였다. 제조사 사양을 확인한 결과 수명에 대한 언급은 2,000시간 이상으로 표기되어 있으나, 사용자의 사용 방법 및 적용 환경에 따른 수명의 편차가 매우 큰 제품이다.



본 연구에서는 국내 시장에서 가장 큰 매출을 차지하는 제조사의 사용 환경을 연구하고 필드의 고장 메커니즘을 확인하여 가속수명시험을 수행함으로써, 수명 분포의 예측을 통해 수명-스트레스 관계식을 확인한 다음, 가속계수 산출과 정상상태에서의 통계적 수명을 추정하고자 한다.

2. 할로겐램프의 구조 및 고장 메커니즘

2.1 할로겐램프의 구조

할로겐램프는 적용 분야에 따라 다양한 형상의 램프가 있다. 산업용 건조 시스템 및 겨울철 난방 전열기에 사용되는 할로겐램프로 활용되는 막대 타입 및 원형 타입은 2,000 와트 이상의 대 전력용 램프로 사용된다. 또한 조명용으로는 가정에서 많이 사용되어지는 백열전구 모양의 할로겐램프도 있고, 박물관 및 전시실에서 사용되는 방사형 모양의 할로겐램프 등이 있으며 레이저 프린터의 토너를 증착시키기 위한 A4 용지 크기의 할로겐램프 등이 있다. 이와 같이 많은 응용 분야에서 사용 중인 할로겐램프 중 본 연구에서는 현재 의료 기기 조명용으로 사용 중인 형태 중 가장 널리 이용되는 두 가지 형태의 핀 타입과 스크류 타입 램프를 대상으로 시험을 수행하였다(<Table 1> 참조).

Table 1. Two Types of Halogen Lamp

No.	Item	Pin Type	Screw Type
1	Maker	A	B
2	Model	64440	KZ1250-E10
3	Terminal Type	GY6.35	EZ10
4	Direction of Filament	Horizontal	Horizontal
5	Power	AC 12V 50W	AC 12V 50W
6	Figure		

할로겐램프는 전압이 인가되었을 때 빛을 발광하는 텅스텐 필라멘트, 내부에 사용되는 할로겐 가스의 기밀성을 유지하기 위한 씨링부, 텅스텐 필라멘트의 수명을 장시간 유지하기 위한 요오드, 브롬, 염소계 및 미량의 할로겐 가스와 할로겐 사이클에 의한 흑화 현상을 막기 위한 석영 유리로 구성 된다 (<Table 2>, <Figure 2> 참조).

Table 2. Part of Halogen Lamp

No.	Name	Function	Material
1	Filament	Radiation	Tungsten
2	Bulb	Sealed	Quartz
3	Gas	Radiation, Halogen Cycle	I2, Br2, Cl2
4	Base	Foundation	Ceramic, Al

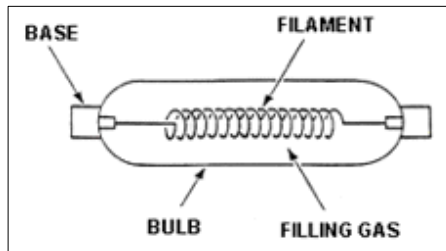


Figure 2. Structure of Halogen Lamp

2.2 할로젠램프의 고장 메커니즘

할로젠램프의 가속수명시험을 수행하기 위해서는 먼저 할로젠램프 및 할로젠 가스의 동작 원리에 대한 이해가 필요하다. 할로젠램프는 장시간 수명 및 광량을 유지하기 위해 필라멘트의 구성 재료인 텅스텐의 원자가 필라멘트 표면에서 증발한 다음, 할로젠 가스의 원자와 결합하여 할로젠화 금속 화합물을 형성한다. 이 금속 화합물은 매우 안정적이어서 석영 유리에 달라붙지 않으며, 내부에 충전 되어 있는 가스의 대류 현상에 의해 다시 필라멘트로 결합하여 텅스텐 필라멘트가 증발하는 것을 방지한다. 이러한 일련의 현상을 ‘할로젠 순환 효과’라 하며, 이러한 현상은 필라멘트의 증발을 방지하고 석영 유리의 내부를 항상 깨끗하게 유지시켜 초기의 광량을 오랫동안 지속시킨다. <Figure 3>은 할로젠 사이클 현상을 표현한 그림이다.

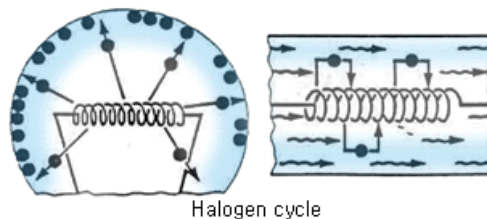


Figure 3. Halogen Cycle

할로젠램프는 할로젠 순환 효과에 의해 긴 수명을 보장하나, 영구적으로 빛을 낼 수 없다. <Table 3>은 품질기능전개를 통한 고장 모드 및 고장 메커니즘을 분석한 결과이다. 분석 결과 텅스텐 필라멘트의 단선이 주요 고장 모드가

며 반복된 사용으로 인한 필라멘트의 증발, 기계적 스트레스에 의한 램프 파손 등이 주요 고장 메커니즘이다. 본 연구에서는 기계적 스트레스에 의한 램프 파손은 사용자 부주의가 많은 관계로 제외하였으며, 전압적 스트레스에 의한 텅스텐 필라멘트의 단선을 대상으로 하였는데, 전원의 인가 여부에 따른 가속 인자는 이전에 많은 연구에서 활용되었으며, 온도에 따른 수명-스트레스 시험은 예비시험을 수행한 결과 할로겐램프의 표면 온도가 300도 이상으로 높은 온도에서 사용되므로, 온도에 따른 수명의 영향은 미비한 것으로 판단하였다.

Table 3. Failure Modes, Mechanisms and Test Methods Matrix

Failure Modes \ Test Methods	High Temperature	High Temp and Humidity	Temperature Cycle	Vibration	Over Voltage
Open	◇	◇	◇	○	◎
Breakage	◇	◇	◇	◎	◇
Carbonization	○	◇	◇	○	○
Poor contact	◇	○	○	○	○

Note : ◎ Major ○ Minor ◇ Normal

위 결과 및 기존 연구로부터 전압적 스트레스에 의한 필라멘트의 단선이 주요 고장 모드임을 확인하였다. 이러한 필라멘트의 단선은 전원을 켜고 할로겐램프를 사용하면서 발생한 열에 의해 필라멘트가 증발하고 점점 필라멘트의 굵기가 감소함으로써 발생한다(<Figure 4> 참조).

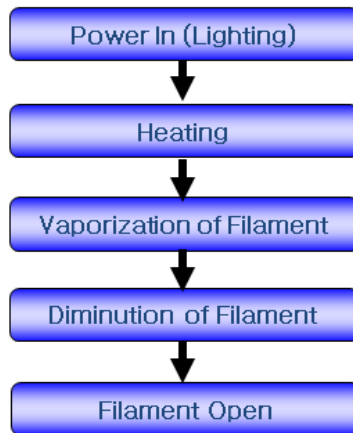


Figure 4. Failure Mechanism of Halogen Lamp

3. 가속수명시험

3.1 사전 시험 및 시험 설계

할로겐램프의 효율적인 가속수명시험을 수행하기 위해서는 적절한 시험 설계가 중요하다. 특히, 가속성이 성립하는 가속 전압 범위의 설정이 중요하여 최대 가속 전압을 확인하기 위한 사전 시험이 필요하다. <Table 4>는 사전 시험의 전압 조건 및 고장 시간 결과를 나타낸다.

Table 4. Preliminary Test Results

Voltage	Failure Time	Censoring	Sample Size
19.0 V	1 h	Fail	1
18.0 V	72 h	Fail	1
17.0 V	168 h	Censoring	1

정상조건에서의 고장은 필라멘트가 가늘어지면서 단선이 이루어지나 18V 인가 시에 발생한 고장 시료의 필라멘트는 가늘어지는 현상 없이 바로 단선이 이루어지는 비이상적인 형태를 보여 본 시험에서의 최대 가속 전압으로 17V 이하로 고려하였다(<Figure 5> 참조).



Figure 5. Filament Failure at 18V Test

사전 시험 결과를 바탕으로 본 연구에서는 13.5 V와 17 V 사이의 전압에서 3수준의 시험조건 및 시료수, 평가시간을 선정하였으며 그 결과는 <Table 5>와 같다. 시료 수가 많을수록 정확한 수명추정이 가능하나, 본 연구의 대상인 의료용 할로겐램프는 양산품이 아닌 개발품으로서 시료 수급이 어렵고, 고용량의 전원 장치 구성의 어려움 등과 같은 제약으로 인하여 최소의 시료를 이용하여 시험을 실시하였다.

Table 5. Accelerated Life Test Plan

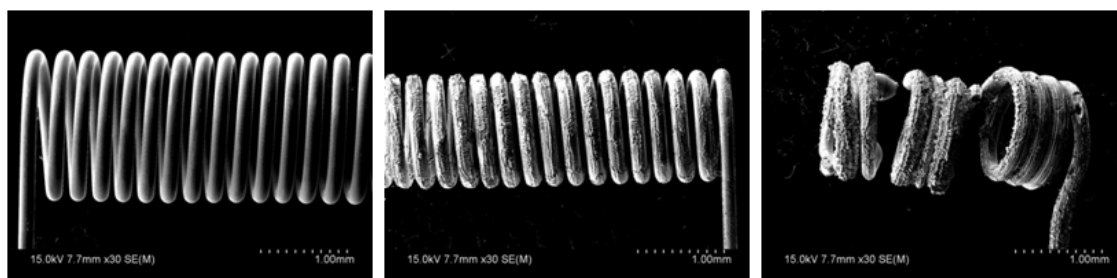
Input Voltage	Test Time	Sample Size	
		Pin Type	Screw Type
14.5 V	4,471 h	3	3
15.5 V	4,471 h	3	3
16.5 V	4,471 h	3	3

3.2 시험 결과 및 분석

4.1절의 시험 계획에 따라 4,471시간 동안 시험을 진행한 고장시간 및 중도절단시간 결과는 <Table 6>과 같다. 또한 텅스텐 필라멘트의 고장 현상을 확인하기 위하여 미사용 램프, 필드 고장품 및 고장이 발생한 시료의 SEM 영상을 촬영하였으며, 그 결과는 <Figure 6>과 같다. 여기서 ‘C’는 중도절단을 의미한다.

Table 6. Accelerated Life Tests Result

Input Voltage	Failure Time (h)	
	Pin Type	Screw Type
14.5 V	4,471 (C)	4,471 (C)
	4,471 (C)	4,471 (C)
	4,471 (C)	4,471 (C)
15.5 V	4,159	3,091
	3,768	2,472
	4,080	2,664
16.5 V	1,992	2,160
	2,064	1,752
	1,656	1,824



(a) Unused filament

(b) Field failure

(c) 15.5 V test failure

Figure 6. The shape of the magnified filament

먼저, 두 제품의 수명 분포를 확인하기 위하여 Probability plot을 수행한 결과 핀 타입의 제품은 와이블 분포, 스크류 타입의 제품은 대수정규분포를 따른다는 것을 확인하였다 (<Table 6>, <Figure 7> 참조). 적합성 분석은 수명 분포에서 널리 사용되는 분포인 와이블 분포, 대수정규분포, 지수분포, 정규분포 등을 적용하였으며, 추정방법은 최소제곱법을 이용하였다.

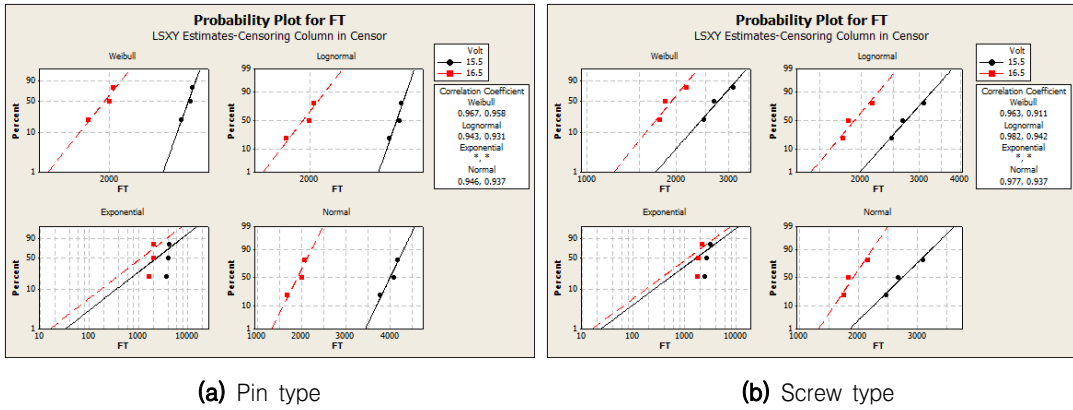


Figure 7. Probability Plots for Two Types

가속수명시험의 결과로부터 가속 조건 별 고장 메커니즘이 동일함을 확인하였으며(Figure 6), 기율기 동일성 검정을 수행하고 그 결과 핀 타입의 경우 p-value가 0.268, 스크류 타입의 경우 0.967로 유의수준 5%에서 가속성이 성립함을 확인하였다(<Figure 8> 참조).

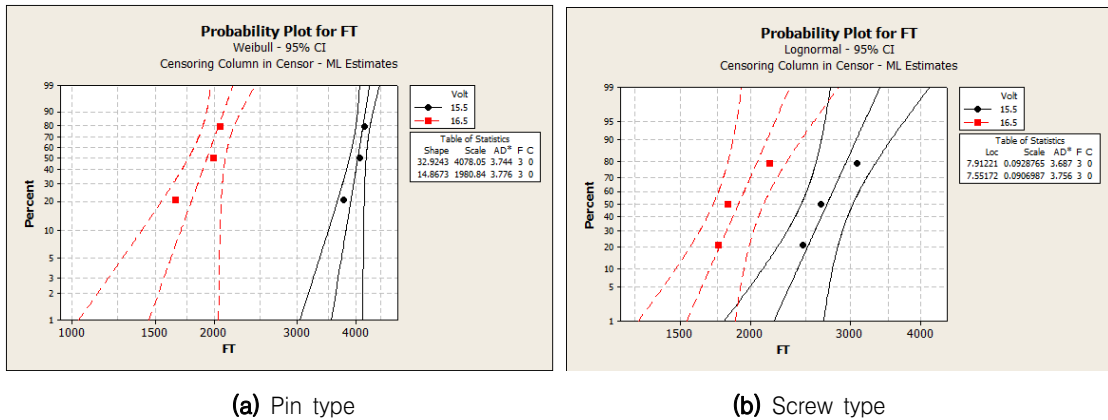


Figure 8. Equality Test for Slope

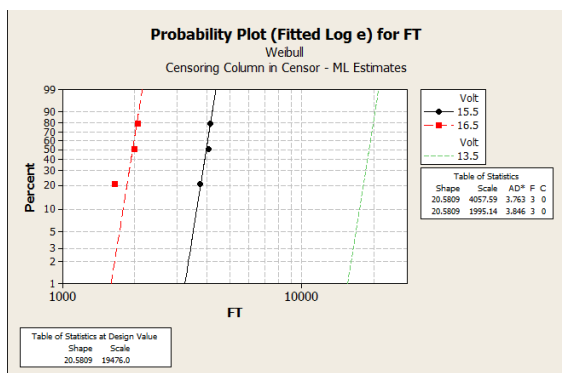
전압 스트레스를 가하는 경우의 가속 모형으로 아래와 같이 역누승 모형을 가정 한다 (Nelson, 1990). L 은 명목 수명, V 는 스트레스(전압), A 와 n 은 각각 상수를 의미한다.

$$L = AV^{-n}$$

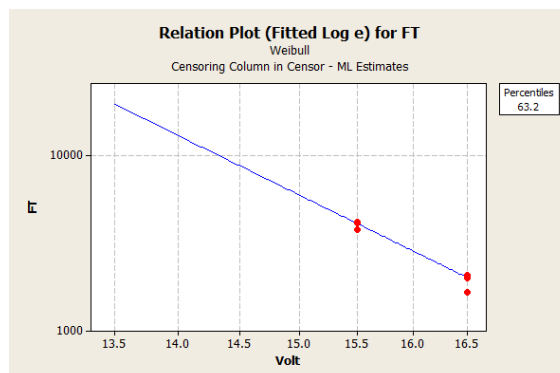
정상 상태(13.5 V)에서의 수명 및 모수의 추정, 수명과 스트레스의 관계를 확인하기 위한 분석을 실시하였으며, 핀 타입의 결과는 <Table 7>, <Figure 9>와 같으며, 스크류 타입은 <Table 8>, <Figure 10>과 같이 추정 하였다. <Table 7>에서 β 는 와이블 분포의 형상모수를 의미하고, <Table 8>에서 σ 는 대수정규분포의 척도모수를 의미한다.

Table 7. Regression Analysis Results for Pin Type

Parameter	Coefficient	Standard Error	95.0 % Normal CI	
			Lower	Upper
$\ln A$	39.4285	1.76680	35.9657	42.8914
n	11.3542	0.63750	12.6037	10.1048
β	20.5809	7.48624	10.0888	41.9842



(a) Probability Plot

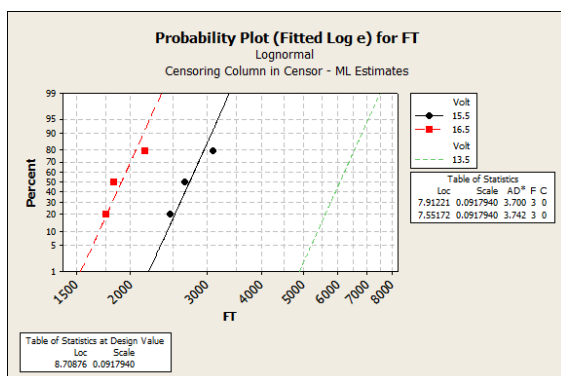


(b) Relation Plot

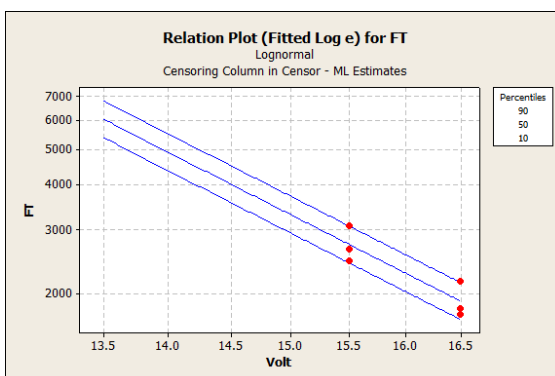
Figure 9. Probability and Relation Plots for Pin Type

Table 8. Regression Analysis Results for Screw Type

Parameter	Coefficient	Standard Error	95.0 % Normal CI	
			Lower	Upper
$\ln A$	23.7155	3.32341	17.2018	30.2293
n	5.76587	1.19880	8.11548	3.41626
σ	0.09179	0.02650	0.05213	0.16135



(a) Probability Plot



(b) Relation Plot

Figure 10. Probability and Relation Plots for Screw Type

가속모형으로 역누승을 모형을 고려하여 두 가지 형태의 할로겐램프 수명을 산출한 결과는 아래와 같다 (<Table 9>, <Table 10> 참조). 분석 결과 의료용 할로겐램프의 10분위수 목표수명인 6개월(4,380시간)을 모두 충족하며, 두 타입을 분석한 결과 핀 타입이 스크류 타입에 비해 약 3배가량 높은 수명을 지니는 것을 알 수 있다.

Table 9. Percentiles of Normal State (13.5V)

Types	Percentiles (Life Time)				
	1 %	10 %	50 %	90 %	99 %
Pin Type	15,575	17,458	19,132	20,281	20,976
Screw Type	4,891	5,383	6,056	6,811	7,497

Table 10. Parameter Estimation Results

Types	Distribution	β	σ	A	n	Mean Time To Failure (MTTF)		
						13.5 V	15.5 V	16.5 v
Pin Type	Weibull	20.58	-	1.32×1017	11.35	19,477	4,058	1,995
Screw Type	Log-normal	-	0.092	1.99×1010	5.76	6,056	2,730	1,904

또한 역누승 모델을 가속 모델로 사용하여 가속계수는 다음과 같이 산출할 수 있다.

$$AF(\text{가속계수}) = \left(\frac{V_a}{V_0} \right)^n$$

위의 식에서 V_0 는 정상전압을, V_a 는 가속전압을 의미한다. 따라서 핀 타입의 경우 15.5V에서의 가속계수는 $\left(\frac{15.5}{13.5} \right)^{11.35} \approx 4.8$ 배로 계산되며 16.5V에서는 $\left(\frac{16.5}{13.5} \right)^{11.35} \approx 9.8$ 배로 계산된다. 이와 같이 스크류 타입에 적용하면 15.5V와 16.5V에서 각각 2.2배와 3.2배로 산출된다.

4. 결론 및 추후 연구과제

본 연구에서는 의료용 할로겐램프에 대한 가속 수명 시험을 수행하였다. 기존 연구 고찰 및 품질기능전개를 이용하여 할로겐램프는 전압 스트레스에 민감함을 확인하였으며, 본 연구에서도 가속 인자로 전압을 이용하였다. 여러 스트레스 인자 중 널리 활용되는 온도 스트레스는 제품의 특성 상 고온에 노출되는 제품으로 고온 상태에서 가속 시험을 수행하기 어렵다고 판단하였으며, 예비시험을 통해 이를 확인하였다. 시험 설계 단계에서는 제조사 제공 스펙 및 예비 시험을 수행하여, 14.5 V, 15.5 V, 16.5 V 의 3 수준의 시험 설계를 하였으며, 시험 수행 한계 상 각 조건 당 3 개의 시료만을 대상으로 시험을 수행하였다. 14.5 V 이외의 조건에서는 시료의 고장이 발생하였으며, 통계적 분석을 통해 각 전압별 수명 분포 및 모수 및 전압에 따른 가속 계수 등을 추정하였다. 추정 결과 핀 타입의 경우 13.5 V 에서는 평균 수명이 19,477 시간, 스크류 타입의 경우 6,056 시간이 추정 되었으며, 16.5 V 에서는 3 ~ 10 배 정도의 가속 계수가 산출 되었다. 이러한 가속 계수를 이용하며, 시험 시간을 3~ 10 배정도 단축시킬 수 있으며, 전압에 대한 민감도도 확인 할 수 있었다. 특히, 의료용 할로겐램프의 10분위수 목표수명인 6개월을 모두

충족하였으며, 핀 타입이 스크류 타입에 비해 약 3배 가량 수명이 길게 나타남을 알 수 있었다.

추후 연구 방향으로는 2개 이상의 가속 인장 선정 및 고 전력을 발생시킬 수 있는 전원장치 등을 구비함으로써 연속적인 부하 시험 이외에 전원 온오프를 이용한 단속 운전 및 시간에 따른 필라멘트의 증발 현상에 대한 연구가 필요하며, 전원 성분에 따른 연구도 추후 이루어져야 할 것이다.

REFERENCES

- Abd-Elfattah, A. M., Hassan, A. S., and Nassr, S. G. 2008. "Estimation in Step-Stress Partially Accelerated Life Tests for the Burr Type XII Distribution using Type I Censoring." *Statistical Methodology* 5(6): 502-514.
- Bai, D. S., and Chung, S. W. 1992. "Optimal Design of Partially Accelerated Life Tests for the Exponential Distribution under Type-I Censoring." *IEEE Transactions on Reliability* 41:400-406.
- Bai, D. S., Chung, S. W., and Chun, Y. R. 1993. "Optimal Design of Partially Accelerated Life Tests for the Log Normal Distribution under Type-I Censoring." *Reliability Engineering and System Safety* 40:193-210.
- Balarkishnan, N., and Xie, Q. 2007. "Exact Inference for a Simple Step-Stress Model with Type-I Hybrid Censored Data from the Exponential Distribution." *Journal of Statistical Planning and Inference* 137(11):3268-3290.
- Cayless, M. A., and Marsden, A. M. 1997. *Lamps and lighting*. Arnold. 177-193.
- Chernoff, H. 1962. "Optimal Accelerated Life Designs for Estimation." *Technometrics* 4:381-408.
- Chun, Y. H., and Kwon, L. J. 1997. "Accelerated Life Test and Data Analysis of the Silver Through Hole Printed Wiring Board." *Journal of the Korean Society for Quality Management* 25(2):15-27.
- Escobar, L. A., and Meeker, W. C. 1986. "Planning Accelerated Life Tests with Type II Censored Data." *Journal of Statistical Computation and Simulation* 23:273-297.
- Fard, N., and Li, C. 2009. "Optimal Simple Step-Stress Accelerated Life Test Design for Reliability Prediction." *Journal Statistical Planning and Inference* 139(5):1799-1808.
- Jeong, H. R., Kim, J. J., and Song, Y. H. 2010. "Degradation Analysis of Tungsten filament in Automotive Halogen Lamp." *Proceedings of the KSME conference*, November 2143-2148.
- Khamis, I. H. 1997. "Optimum M-Step, Step Stress Design with K Stress Variables." *Communications in Statistics-Simulation and Computation* 26:1301-1313.
- Kim, C. S., Shin, S. J., and Kwack, K. D. 2008. "Lifetime Estimation of an Automotive Halogen Lamp." *Proceedings of the KSME conference*, November 1259-1264.
- Lee, Y. S., Kim, J. J., and Kim, T. W. 2010. "Lifetime decrease of halogen lamps for Automotive Headlighting by Field Stress." *Proceedings of the KSME*, May 134-136.
- Lim, H. 2012. "Optimal Design of Accelerated Degradation Tests under the Constraint of Total Experimental Cost in the Case that the Degradation Characteristic Follows a Wiener Process." *Journal of the Korean Society for Quality Management* 40(2):117-125.
- Liu, X., and Tang, L. C. 2010. "Planning Sequential Constant-Stress Accelerated Life Tests with Stepwise Loaded Auxiliary Acceleration Factor." *Journal of Statistical Planning and Inference* 140:1968-1985.
- Maciejewski, H. 1995. "Accelerated Life Test Data Analysis with Generalized Life Distribution Function and with No Aging Model Assumption." *Microelectronics Reliability* 35(7):1047-1051.
- Miller, R., and Nelson, W. 1983. "Optimal Simple Step-Stress Plans for Accelerated Life Testing." *IEEE Transaction on Reliability* 32:59-65.
- Moon, J. S., Jeong, S. Y., and Kim, M. S. 2011. "An Accelerated Life Test of Booster Pump for Water Purifier." *Journal of Applied Reliability* 11(3):281-291.
- Nelson, W. 1990. *Accelerating Test: Statistical Models, Test Plans and Data Analysis*. NY: John Wiley and Sons.

- Nelson, W., and Kielpinski, T. J. 1976. "Theory for Optimum Censored Accelerated Tests for Normal and Lognormal Life Distribution." *Technometrics* 18:105-114.
- Park, J. W., and Yum, B. J. 1996. "Optimal Design of Partially Accelerated Life Tests with Two Stresses." *Naval Research Logistics* 43:863-884.
- Seo, J. H., Jung, M., and Kim, C. M. 2009. "Design of Accelerated Life Test Sampling Plans with a Nonconstant Shape Parameter." *European Journal of Operational Research* 197:659-666.
- Seo, S. K., Ha, C. S., and 2001. "Optimal Design of Accelerated Life Tests under Model Uncertainty." *Journal of the Korean Society for Quality Management* 29(3):49-65.
- Seo, S. K., Kim, H. G., Kwon, H. M., Cha, M. S., Yun, W. Y., and Cha, J. H. 2010. *Reliability Engineering*. Korea: Kyobomungo.
- Seo, S. K., and Yum, B. J. 1991. "Accelerated Life Test Plans under Intermittent Inspection and Type I Censoring: The Case of Weibull Failure Distribution." *Naval Research Logistics* 38:1-22.
- Srivastava, P. W., and Mittal, N. 2010. "Optimum Step-Stress Accelerated Life Test for the Truncated Logistic Distribution with Censoring." *Applied Mathematical Modelling* 34(10):3166-3178.
- Tang, L. C., Tan, A. P., and Ong, S. H. 2002. "Planning Accelerated Life Tests with Three Constant Stress Levels." *Computers and Industrial Engineering* 42:439-446.
- Tang, L. C., and Xu, K. 2005. "A Multiple Objective Framework for Planning Accelerated Life Tests." *IEEE Transactions on Reliability* 54:58-63.
- Yun, W. Y., and Jung, S. G. 1993. "Optimum Progressive-Stress Accelerated Life Test." *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers* 19:15-21.
- Wu, S. J., Lin, Y. P., and Chen, Y. J. 2008. "Optimal Step-Stress Test under Type I Progressive Group-Censoring with Random Removals." *Journal of Statistical Planning and Inference* 138:817-826.