

LED 열화 데이터에 대한 정규화 방법에 대한 연구*

정의효¹ · 임홍우² · 형재필² · 정창욱¹ · 조정하¹ · 장중순^{1†}

¹아주대학교 산업공학과, ²한국기계전기전자시험연구원

Study on Normalization Method of LED Degradation Data^{*}

Uihyo Jeong¹ · Hongwoo Lim² · Jaephil Hyung² · Changuk Jung¹ · Jeongha Cho¹ · Joongsoon Jang^{1†}

¹Department of Industrial Engineering, AJOU University

²Korea Testing Certification

Purpose: To propose improved method for normalization, compare to the de facto international standard which is IESNA TM-21 or conventional normalization methods.

Methods: Firstly, we analysed conventional methods and specified the problem of normalization method which is based on first measured data. Secondly, we proposed our approach which is based on the design specification. Lastly, we studied a real degradation data which is conducted for 15,000 hours.

Conclusion: Proposed normalization method is better approach because it can reflect real data and design specification, and reduce distortion when analysing degradation data. Also, It is applicable to other long-life reliability items.

Keywords: ADT, Degradation, Normalization, Lumen Maintenance

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 필요성

LED(Light Emitting Diode)는 순방향으로 전압을 가하였을 때 발광하는 반도체 소자로서 미국 제너럴 일렉트릭社의 닉 홀로니아크이 1962년에 최초로 빨간색 가시광선을 발광하는 발광다이오드를 개발하였다 [1]. 이후 지속적인 발전을 거쳐 일본 니치아社의 나카무라 슈지가 1993년 고효율 청색 LED를 개발함에 따라 LED는 백색구현이 가능해 졌으며 조명광원으로 서로 각광받게 되었다. LED의 장점으로 여러 가지

꼽을 수 있지만 대표적으로 소형화가 가능하며, 고효율으로 에너지 절감이 가능하며, 점멸열화 내성을 지니고 있어 높은 빈도의 점멸에 강하며, 저온 시동성 등의 온도 의존성이 낮으며, 수은 등의 유해물질이 미포함 되어 있어 친환경적이라는 장점이 존재한다. 무엇보다 큰 장점으로 3만~5만 시간 이상의 고수명을 지니고 있다는 장점이 존재한다.

이러한 높은 수명에 대해서 평가하기 위해 국제적으로 사용되는 실질적 표준(de facto standard)로는 시험방법을 규정한 IESNA LM-80[2]과 이러한 시험결과를 기반으로 데이터를 분석하는 IESNA TM-21[3]

* 본 논문은 소재부품융합얼라이언스사업으로부터 연구비를 지원받아 작성하였다

† 교신저자 jsjang@ajou.ac.kr

2017년 12월 27일 접수; 2018년 3월 8일 수정본 접수; 2018년 3월 9일 게재 확정.

이 존재한다. Jiajie[4]와 Wang[5]는 IESNA TM-21의 대안적인 방법을 제시하였지만 일반적으로 행해지는 신뢰성 분석방법과 마찬가지로 초기데이터를 1.0으로 두고 그 차이를 표현하는 정규화(Normalized)방법을 기반으로 분석을 실시하였다 하지만 이는 실제 LED 조명 제품을 설계할 때 사용하는 패키지의 스펙이나 초기편차를 반영하지 못하며 결국 분석 후 예측된 수명에도 차이가 발생하게 된다. 본 논문에서는 이러한 표준화된 데이터를 기반으로 수행하는 분석과 제품의 스펙을 기반으로 수행하는 열화 분석의 차이에 대해서 설명하고 개선안을 도출 및 제안하고자 한다.

2. 본론

2.1 LED 수명시험법과 IESNA LM-80

LED 수명시험에 있어서 실질적인 국제표준으로 사용되고 있는 IESNA LM-80은 LED package, array, module의 광속유지율 테스트 수행 방법에 대해서 다룬다. IESNA LM-80의 시험결과는 미국 환경보호국(EPA, Environment Protection Agency)와 에너지성(DOE, Department Of Energy) 에너지스타 프로그램 인증프로그램이 요구하고 있으며 우리나라에서도 에너지관리공단의 고효율인증을 받기위해서 IESNA LM-80에 의거한 테스트 결과를 리포트로 제출하여 수명시험 결과를 인정받을 수 있다.

IESNA LM-80의 열화데이터 수집과 관련된 주요한 내용은 아래 <Table 1>에 정리되어 있다. 주요한 내용을 정리해보면 최소 6천 시간 또는 1만 시간의 테스트, 55℃, 85℃ 그리고 85℃보다 더 높은 제조사가 제시한 온도 이렇게 3가지 온도조건에서 시험 1,000

Table 1 IESNA LM-80 summary

Object	Description
Testing Duration	6,000 hours or more, 10,000 hours preferred
Testing Temperature	55℃, 85℃, selected by manufacturer
Testing Interval	At a minimum of every 1,000 hours
Sample Size	Standard does not specify, but EPA require minimum 25 samples

시간 마다 광속유지율 확인을 요구하며 표준에는 샘플수가 명시되어 있지 않지만 미국 에너지성에서 25개의 샘플이상을 요구하기 때문에 일반적으로 25개의 샘플로 테스트가 수행 된다.

2.2 LED 열화분석법과 IESNA TM-21

IESNA LM-80이 LED 수명시험의 실질적인 표준이라고 하면 IESNA TM-21은 IESNA LM-80에 의한 수명시험데이터의 분석을 위한 실질적인 표준으로 사용된다. IESNA TM-21은 열화데이터를 어떻게 회귀분석을 통해 외삽(Extrapolate)할 것인지에 대해 규정하고 있으며 이렇게 외삽으로 얻어진 수명을 제조사가 보증하고자 하는 25,000 또는 30,000시간 이상의 수명을 보증하기 위한 가이드라인을 제공한다 또한 이렇게 얻어진 수명은 미국 에너지스타 프로그램의 승인을 얻기 위해 사용된다.

IESNA TM-21과 기존의 일반적인 열화분석과 공통점과 차이점 점을 요약해보면 아래 <Table 2>와 같이 정리할 수 있다. 먼저 공통점으로는 LED 열화데이터 분석에 일반적으로 사용되는 지수함수와 표준화된 값을 사용한다는 점이다. 하지만 기존의 신뢰성 분석법과 다른 방식의 접근도 시도하고 있다 첫째, 일반적인 열화분석에 있어서는 열화 데이터의 전체를 사용하고 있지만, IESNA TM-21에서는 LED의 초기 광속 변화가 때때로 신뢰성 시험 중에 올라가거나 떨어지는 중 제품에 따라 예측하기 어려운 점을 들어 초기데이터 1,000시간을 삭제하거나 나중의 데이터에 가중치를 두어 전체 데이터의 절반만 사용하도록 하였다. 둘째, 일반적인 신뢰성 분석에 있어서는 열화데이터를 외삽한 후에 얻어진 각각 시료의 수명을 이용하여 와이불 분포 또는 로그노멀 등 통계적 분포를 추정하고 그 분포에서 B₁₀수명 또는 MTBF를 구하거나 이렇게 구해진 수명의 통계적 하한치를 보증수명으로 사용하게 된다. IESNA TM-21에서는 이러한 복잡한 절차를 통하지 않고 간단하게 IESNA LM-80에서 얻어진 표준화된 데이터의 각 측정 포인트의 광속 평균을 구하고 그 데이터를 정규화 시켜 수명을 추정한다. 다만, 통계적 분포를 고려하는 대신 테스트된 시험 결과의 최대 6배 까지만 보증할 수 있도록 규정하고 있다. 예를 들어 10,000시간의 수명시험을 수행한

Table 2 IESNA TM-21 Summary

Object	Traditional degradation analysis method	IESNA TM-21 degradation analysis method
Extrapolation model	Exponential model, normalized	Exponential model, normalized
Data used for analysis	full range	after 1,000 hours when 6,000 hours tested or half of tested time when more than 6,000 hours tested
Life guarantee	Statistical lower bound	Extrapolated value, but limited by only less than 6 times of tested time
Reliability distribution	Weibull distribution	none(averaged data)

경우 외삽 결과가 10만 시간의 수명으로 확인된다고 하더라도 최대 6만 시간의 수명만 보증할 수 있다. 만약 6,000시간의 수명시험을 했다면 최대 3만 시간의 보증만 가능하다. 이러한 IESNA TM-21의 수명평가 방법은 직관적이고 간단한 논리를 지니고 있으면서도 복잡한 통계분석을 요구하지 않아 통계적 개념이 부족한 경우라도 쉽게 이해할 수 있는 장점이 있다.

하지만 이러한 직관적인 수명추정 LED의 특성을 고려한 초기데이터 제외 등의 기준 수명 분석방법에 대비해 장점에도 불구하고 일반적인 신뢰성 분석과 동일하게 초기값을 기준으로 한 표준화된 데이터를 이용하여 L70 분석을 하는데, 이는 설계측면이나 제조사의 스펙을 고려하지 못하는 단점이 있다.

2.3 LED 조명 설계와 고장판정 기준

<Table 3>은 미국 에너지스타 프로그램에서 공개하고 있는 Philips 社의 LED 램프 중 한 제품 정보의 일부이다[6]. 조명을 설계함에 있어서 고려해야 하는 요소는 광속(Total Light Output[Lumen]), 색온도(Correlated Color Temperature), 연색성(CRI) 등이 있을 수 있다. 이중 색온도와 연색성의 경우 “색이 얼마나

나 푸른가?”, “색이 얼마나 태양빛과 가까운가?”를 나타내는 감성적인 영역의 제품의 특성이며 수명과 직접적인 연관성은 없다. LED제품의 수명 또한 광속이 70%로 줄어드는 지점을 고장의 기준으로 삼기 때문에 가장 중요한 특성은 광속이라고 할 수 있다.

조명 시스템을 설계할 때는 필요한 광속을 충족시키기 위해서는 상대적으로 낮은 광속을 지닌 LED pkg를 <Fig. 1>과 같이 여러 개를 사용하게 된다. 이때 설계 시 제조사가 제시한 스펙을 기반으로 전체 시스템의 광속을 계산하거나 단품 패키지를 배광 측정 등의 광특성 측정을 통해서 평가하고 설계에 이용하게 된다. 스펙 기반으로 설계를 하는 것과 광특성 측정 평가 후 설계를 하는 것, 두 가지 경우 모두 결국은 대푯값을 이용하게 되고 그 대푯값을 기반으로 전체 조명의 특성을 시뮬레이션 등을 통해서 예측하고 평가하여 최종적인 광속(lumen)을 충족시킬 수 있도록 설계한다.

앞서 살펴본 바와 같이 LED 조명 제품은 각 패키지 의 광속의 합을 기준으로 제품을 설계하지만 IESNA TM-21과 기존의 신뢰성 분석방법은 각 단품 패키지 단위에서의 상대값 열화를 기준으로 제품의 수명을 평가하기 때문에 실제 최종제품(End-Product)에서 필요한 절대적인 고장판정 기준을 반영하지 못하는 단점이 존재한다.

Table 3 Example for ENERGY STAR certified lighting fixture

Object	Specification
Total Light Output(Lumen)	108
Appearance/Correlated Color Temperature(K)	2,700
Color Quality(CRI)	82
Total Input Power(W)	1.7
Energy Efficiency(Lumen/Watt)	62.8
Light Source Life	60,000



Fig. 1 Example of LED Lamp

Table 4 Example for conventional normalization method

Sample Number (Each Package)	Initial Value [Lumen] /Normalized	L70 Conventional/ Normalized
1	110/1	77.0/0.7
2	113/1	79.1/0.7
3	108/1	75.6/0.7
4	112/1	78.4/0.7
5	103/1	72.1/0.7
6	102/1	71.4/0.7
7	100/1	70.0/0.7
Average	106.9	74.8/0.7

이를 <Table 4>를 통해서 자세히 살펴보면, 예를 들어 LED Lamp의 제품의 스펙은 108 lm인데 7개의 샘플링된 데이터의 평균은 106.9 lm일 수 있다. 이때 일반적인 신뢰성 분석방법인 표준화(Normalized)된 방법으로는 <Table 4>와 같이 시료별로 제각각 판정기준이 달라진다. LED 제품을 설계하는데 있어서 분명한 목표 광속(108 lm)이 존재하기 때문에 이를 반영하지 못하게 된다.

이러한 단점을 보완하기 위해서 본 논문에서는 제품 스펙을 기준으로 한 표준화방법을 식(1)과 같이 제안한다. 기존에는 초기값을 기준으로 표준화를 시켰다면 본 논문에서는 제품의 스펙을 기준으로 표준화를 시키는 방법을 제안한다. 이렇게 스펙을 반영한 표준화를 사용하게 되면 수명분석에 있어서 초기 산포가 존재할 경우 초기 산포가 산출된 수명에도 영향을 미쳐서 보다 정확한 수명산출이 가능한 장점이 존재한다. 예를 들어, 제조사가 제품의 성능을 초기 광속 108 ± 10 lm으로 제시하였고 초기 광속이 100 lm이라고 한다면 기존의 방법으로는 70 lm이 고장판정 기준이 되지만 제안된 방법으로는 75.6 lm이 고장판정 기준으로 선정되기 때문에 보다 정확한 설계기준을 반영한 제품 수명의 평가가 가능하다. 앞서 살펴본 <Table 4>를 제안된 방법으로 다시 표준화를 시키면 <Table 5>와 같이 정리할 수 있다.

$$\Phi(t)_{normalized} = \frac{\Phi(t)}{\Phi(t=0)} \quad (1)$$

$$\rightarrow \Phi(t)_{normalized} = \frac{\Phi(t)}{\Phi(specification)}$$

Table 5 Example for proposed normalization method

Sample Number (Each Package)	Initial Value[Lumen] /Normalized	L70 Proposed/ Normalized
1	110/1.02	75.6/0.7
2	113/1.05	75.6/0.7
3	108/1.00	75.6/0.7
4	112/1.04	75.6/0.7
5	103/0.95	75.6/0.7
6	102/0.94	75.6/0.7
7	100/0.93	75.6/0.7
Average	106.9	75.6/0.7

2.4 사례연구: 제안된 판정기준치를 적용한 수명 분석

본 논문에서는 제안한 표준화 방법과 기존의 규격에서 사용하고 있는 열화분석 방법의 차이를 확인하기 위하여 약 15,000시간 동안 상온 측정 데이터가 확보된 데이터를 이용해서 초기 값을 이용한 표준화 방법과, 제조사가 제시하는 스펙을 이용한 표준화방법 분석으로 인한 수명 차이를 확인해 보았다

2.4.1 대상 LED 및 시험결과

LED는 국내 중견기업에서 제조한 LED pkg로서 <Table 6>에는 제품의 주요 스펙이 정리되어있다. 시험은 총 25개의 시료로 15,000시간 수행되었으며 상온에서 정상 동작시켜 열화를 진행시켰고 매 100 또는 200시간 마다 열화를 확인하기 위한 광속 데이터를 적분구를 이용하여 측정하였다. 시험결과는 <Fig. 2>에 그래프로 확인 할 수 있다.

2.4.2 열화분석 비교

제안된 방법과 일반적인 신뢰성 분석방법의 차이를 직접적으로 확인하기 위해서 <Fig 3>을 살펴보면

Table 6 Specification of DUT(Device Under Test)

Subject	Typical
Luminous Intensity	5.65 lm
Forward Voltage	3.2 V
Forward Current	20 mA

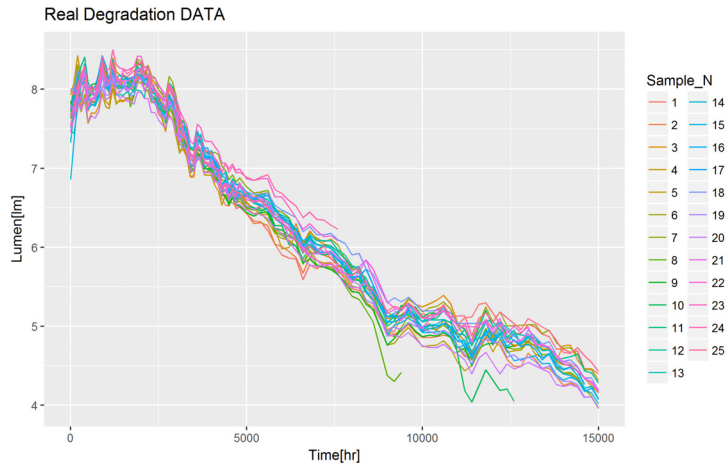


Fig. 2 Real degradation data of DUT

기존의 방법의 경우 초기값이 모두 1.0으로 세팅되기 때문에 초기 변화에 대해 민감하게 변화하게 되고 실제데이터에 비해 왜곡이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 스펙 대비로 표준화를 진행하면 절대값 기준과 동일한 형태의 그래프를 얻을 수 있음을 알 수 있다 두 가지 방법의 차이를 정량적 수명데이터로 확인하기 위해, 먼저 정규화를 진행하기 전의 실제 데이터를 고장판정기준을 제조사스펙대비 70%, 즉 L70으로 설정하고 실제 고장 시점을 구간절단데이터(Intervalic Censored Data)를 확인하여 Weibull 분포에 MLE(Maximum Likelihood Estimation)를 사용하여 B_{10} 수명과 형상모수, 척도모수를 추정하였다. 이어서, 실제 데이터를 기존의 정규화 방법과 제안된 정규화 방법을 이용하여 정규화된 데이터를 각각 얻은 뒤에, TM-21에서 제안하는 방법과 같이 선형회귀분석을 이용하여 지수함수를 추정하여 외삽(Extrapolation)을 통해 각 시

료별 수명을 추정하였다. 이렇게 얻은 수명데이터는 실제데이터와 마찬가지로 Weibull 분포에 MLE를 이용하여 B_{10} 수명과 형상모수, 척도모수를 추정하였으며 결과는 <Table 7>에서 확인할 수 있다. <Table 7>에는 실제 수명을 기반으로 얻은 추정값과, 기존의 표준화방법, 그리고 제안된 표준화방법을 통해 확인된 수명데이터, 그리고 실제 수명데이터와 각 방법으로 인한 차이가 명기되어 있다. 결과를 확인해보면 제안된 방법과 기존의 방법의 수명 및 모수의 추정값 차이를 확인할 수 있는데, B_{10} 수명 및 척도모수(Scale Parameter)와 형상(Shape Parameter)모두 제안된 방법이 실제 수명 추정치에 비해 더 높은 정확도로 추정할 수 있음을 확인할 수 있다.

<Table 8>은 두 방법의 차이를 정성적으로 정리한 것이다. 기존의 방법은 열화분석을 수행하기 전에 제품의 스펙을 정확하게 알 필요가 없지만, 초기편차가

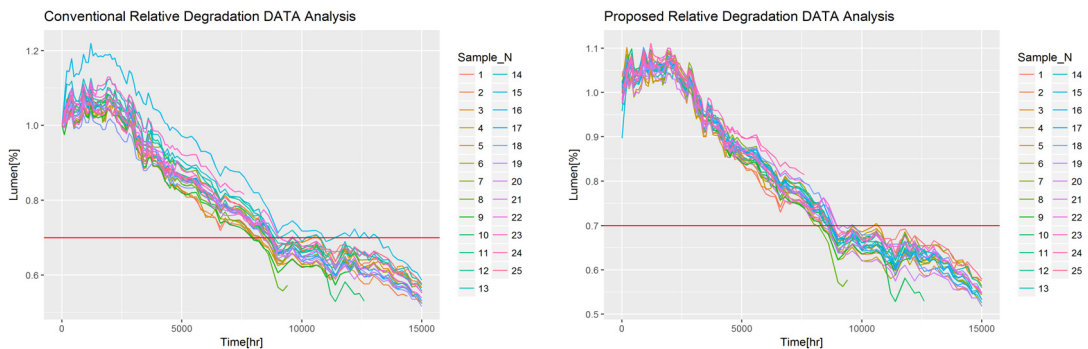


Fig. 3 Comparison of relative degradation analysis method of graph

Table 7 Comparison of relative degradation analysis method of life

Subject	Real Life	Conventional Method(Deviation)	Proposed Method(Deviation)
B10 Life	8309 hr	8065 hr(-244)	8460 hr(+151)
Weibull Shape Parameter(k)	50.9	9.9173(-40.98)	13.38(-37.52)
Weibull Scale Parameter(λ)	8,684.0	10,119.6(+1436)	10,010.6(+1326)

Table 8 Qualitative Comparison of relative degradation analysis method of life

Subject/Method	Conventional	Proposed
Pros	- Not need to know product's specification	- Consistent failure threshold based on specification - Accurate degradation path compare with real measured data(same with prior to normalization) - Accurate life estimation based on specification
Cons	- Each sample has different failure threshold - Intial variance affects to each sample's degradation path then make distortion (compare with real measured data)	- Need to know product's specification

제품의 열화곡선에 영향을 끼쳐서 실제 데이터와 차이가 발생하며, 고장판정기준이 샘플별로 제각각이 되어 고장판정기준이 일관성이 없게 된다 하지만 제안된 방법은 제품의 스펙에 기반 하여 일관된 고장판정기준을 설정할 수 있고 열화 추정에 사용하는 열화곡선의 경우에 실제데이터와 동일한 곡선을 이용하여 분석을 수행하여, 결과적으로 제품의 스펙을 반영한 정확한 수명을 추정할 수 있게 된다.

3. 결론

조명용 LED는 친환경, 고효율, 장수명 등의 장점을 지니고 있어 차세대 조명으로 많은 보급이 이루어지고 있다. 특히 높은 수명을 지니고 있고 이런 수명의 평가 및 보증을 위해서 북미 조명협회(IESNA, Illuminating Engineering Society of North America)의 LM-80, TM-21이 실질적인 국제 표준으로 사용되고 있다. 위 규격은 LED의 1,000시간가량의 초기 불안정한 데이터를 제외하거나, 분포를 이용한 방법보다 간략한 방법을 제공하는 등의 장점이 존재하지만 수명분석을 실시할 때 제품의 스펙을 고려하지 않고 초기값 기준으로 표준화된 데이터를 기반으로 분석하기 때문에 실제 데이터를 반영하지 못한다는 단점이 있다

본 논문에서는 IESNA LM-80, IESNA TM-21 등 기

존의 신뢰성 열화분석을 살펴보고, 제품 스펙을 고려한 표준화 기법을 제안하였다 또한 제안된 방법을 이용하여 약 16,000시간 동안 25개의 시료로 수행된 실제 LED 열화데이터를 이용하여 분석방법에 따른 차이를 실제 사례를 통하여 살펴보았다. 제안된 방법은 초기값의 분포에 민감하게 반응하지 않고 절대값으로 분석하는 것과 동일하게 왜곡 없이 데이터를 분석할 수 있으며, 제품의 설계 스펙을 반영할 수 있다는 장점이 있다. 또한 LED뿐만 아니라 유사한 장수명을 지닌 신뢰성 아이টে에 대해서도 동일하게 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] IESNA Light Source Committee (2005). "IESNA Technical Memorandum on Light Emitting Diode (LED) Sources and Systems". p. 001
- [2] IESNA The Subcommittee on Solid State Lighting of the IES Testing Procedures Committee (2008). "IES Approved Method for Measuring Lumen Maintenance of LED Light Sources".
- [3] IESNA The Subcommittee on Solid State Lighting of the IES Testing Procedures Committee (2011). "Projecting Long Term Lumen Maintenance of LED Light Sources".

- [4] Fan, J., Yung, K. C., and Pecht, M. (2012). "Lifetime estimation of high-power white LED using degradation-data-driven method". *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, Vol. 12, No. 2, pp. 470-477.
- [5] Wang, F. K. and Lu, Y. C. (2014). "Useful lifetime analysis for high-power white LEDs". *Microelectronics Reliability*, Vol. 54, pp. 1307-1315.
- [6] EnergyStar (2017). "Philips Color Kinetics - 523-000090-80". <https://www.energystar.gov/productfinder/product/certified-light-fixtures/details/2280030> (11 Nov. 2017).