

광속의 열화시험을 이용한 신광원의 수명분포 분석

이세현 <한국조명기술연구소 연구사업부 선임연구원/팀장>

황명근 <한국조명기술연구소 수석연구원>

1 서 론

최근 들어 광원 기술의 발달로 여러 형태의 새로운 신광원이 개발되고 있으며, 이를 구동하기 위한 전원 장치도 다양한 형태로 연구개발되고 있다. 특히, 장수명과 고효율을 내세우는 무전극 신광원 및 LED조명이 근래에 들어 크게 대두되면서 광원 자체의 신뢰성을 평가하기 위한 여러 가지 방법들이 제안되고 있다.

그 중에서 제품의 품질 특성치인 수명에 관한 데이터를 분석하는 것은 제품의 신뢰성을 판단하기 위한 가장 좋은 수단 중에 하나로서, 보통 수명 시험을 통해 필요한 데이터를 획득한다. 하지만 고 신뢰성의 제품일 경우 수명 시험을 통해 데이터를 얻기까지의 시간이 과다하게 소요되므로, 일반적으로 사용 조건보다 가혹한 스트레스를 가하는 가속 시험방법이 널리 적용되고 있다.

특히, 고장 날 가능성이 아주 희박하거나 전혀 고장이 발생하지 않는 제품의 경우, 수명 시험을 통해 고장 데이터를 확보하는 것은 거의 불가능하며, 이런 경우 제품의 수명에 결정적인 영향을 미치는 특성치의 열화량을 추이하여 수명을 추정하는 열화시험이 활용되고 있다.

무전극 신광원은 이러한 고 신뢰성을 내세우는 조명 기기로서 60,000시간 이상의 장수명과 80(lm/W) 이상의 고효율일 뿐만 아니라, 평균연색평가수(Ra) 80 이상의 고 연색성을 나타냄으로 공원 및 도로의 가로등과 국내·외의 고 신뢰성을 요구하는 산업 현장 및 유지보수가 힘든 장소에 설치되어 유용하게 활용될 것이 예상된다. 따라서 신광원의 수명 특성에 대한 신뢰성시험 분석과 예측이 필수적으로 요구되는 상황이다.

이에 본 논문에서는 무전극 신광원의 수명 평가를 위하여 메탈할라이드 램프의 광속 변화량을 활용한 방정식을 유도하였으며, 제안된 방정식을 통해 고장 분포 유형을 분석하였다. 또한 추정된 분석 자료는 KS(Kolmogorov-Smirnov) 검정을 실시하여 분석하였다.

2 본 론

2.1 신광원의 확률계수 열화모형

측정 시료에 대해 어떤 시각 t 에서의 열화량을 b 라 하고, 시간 0에서의 열화량을 a , 확률오차를 β 라 하면 단순 확률계수 열화모형을 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$f(t) = a + b \cdot t + \beta \quad (1)$$

그림 1은 단순 확률계수 열화모형(수식 1)을 설명하기 위한 것으로 방정식 $f(t) = a + b \cdot t$ 위의 임의의 점 $(X_1, a + bX_1)$ 는 또 다른 임의의 점 (X_1, Y_1) 와 오차 β 만큼의 차이를 보인다고 가정한다.

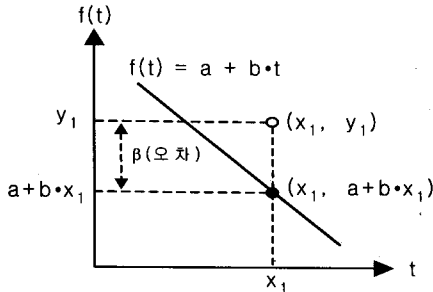


그림 1. 열화분포 방정식의 모델링

만약 방정식 $f(t) = a + b \cdot t$ 을 중심으로 다량의 임의의 점들이 표시된다면, 이 점들을 표현하기 위한 가장 근접한 방정식을 구하기 위하여, 방정식으로부터 임의의 점까지의 잔차가 최소가 되는 오차(β)를 고려해 보자.

식 (1)로부터 β 항에 대해 정리한 후, $t=x$ 와 $f(t)=y$ 를 대입하여 정리하면 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} y_1 - (a + bX_1) &= \beta_1 \\ y_2 - (a + bX_2) &= \beta_2 \\ \cdot & \quad \cdot \quad \cdot \\ \cdot & \quad \cdot \quad \cdot \\ \cdot & \quad \cdot \quad \cdot \\ y_n - (a + bX_n) &= \beta_n \\ \sum\{y_i - (a + bX_i)\}_2 &= \sum\beta_n^2 \end{aligned}$$

여기서 $\sum\beta_n^2$ 는 임의의 모든 점의 오차(β)를 더한 것으로서, 제곱의 합이 최소(least square)가 되는

a 와 b 의 값을 구한다면 가장 근접화된 방정식을 유도할 수 있으며, $\sum\beta_n^2$ 가 최소가 되기 위한 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \partial\beta/\partial a &= 0, \quad \partial\beta/\partial b = 0 \\ \partial\beta/\partial a &= -2\sum\{y_i - (a + bX_i)\} = 0 \\ \partial\beta/\partial b &= -2\sum\{y_i - (a + bX_i)\}X_i = 0 \end{aligned}$$

위의 조건을 다시 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \sum y_i - na + b\sum X_i &= 0 \\ \sum X_i y_i - a\sum X_i + b\sum X_i^2 &= 0 \end{aligned}$$

위 식을 a, b 에 대하여 각각 풀면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} a &= \sum y_i / n - b \sum X_i / n = \text{mean}(y) - b \cdot \text{mean}(x) \\ b &= [n\sum X_i y_i - a\sum X_i \sum y_i] / [n\sum X_i^2 - (\sum X_i)^2] \\ &= \text{cov}(x, y) / \text{var}(x) \end{aligned}$$

이렇게 구하여진 최적화 방정식에 대한 유의성 검정을 위하여 상관계수(r , correlation coefficient)라는 개념을 도입하면, a 와 b 값은 x 나 y 의 단위에 크게 영향을 받으므로, 기울기를 β_x 와 β_y 로 나누어 나타낼 수 있으며 이를 상관계수 r 이라 표현하여 다음과 같이 나타내었다.

$$r = \text{cov}(x, y) / [\beta_x \cdot \beta_y]$$

여기서

$$\text{cov}(x, y) = \sum\{x_i - \text{mean}(x)\}\{y_i - \text{mean}(y)\} / n$$

그러므로 b 는 다음과 같이 정리된다.

$$b = r \cdot \beta_x / \beta_y$$

$$\sum \beta = \sum (Y - Y_i) = \sum [(r \cdot s_y / s_x) X_i - Y_i]$$

$$= ns_y^2 (1 - r^2)$$

위 식을 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$ns_y^2 = r^2 ns_y^2 + \sum \beta$$

$$var(y) = r^2 var(y) + \sum \beta$$

이 식을 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\text{총분산} = r^2 \times \text{총분산} + \text{오차}$$

$$(\text{총 데이터}) = (\text{회귀직선이 나타내는 데이터})$$

$$+ (\text{미지의 요인이 갖는 데이터})$$

$$1.00 = r^2 + (1 - r^2)$$

즉, 총분산 $var(y)$ 은 회귀직선에 의하여 $r^2(\%)$ 로 나타내지고, 나머지 $(1 - r^2)$ 는 다른 미지의 요인에 의하여 결정된다. 이 r^2 를 결정계수(coefficient of determination)라 하며, 총 데이터 중 모델식이 나타내주는 데이터의 양을 뜻한다.

2.2 실험 방법

본 연구에서는 무전극 신평원의 수명에 결정적인 요소로 작용할 수 있는 광속(luminous flux)을 일정 시간 추이하면서 그 특성치를 기 제시된 모델식(식 1)에 대입함으로써, 어느 정도의 수명을 보장할 수 있는지에 대해 추정하려 하였다. 또한 측정 시료가 방전 램프라는 점을 고려하여 가장 유사한 형태로 나타내어질 수 있는 메탈헬라이드 400(W)급 램프의 광속 유지율 데이터를 활용하여 무전극 신평원의 60,000시간 이상의 장수명을 보장하기 위한 조건을 분석하였다.

2.2.1 시료 선정 및 측정 방법

측정 시료는 메탈헬라이드 400(W)급 램프를 4개社 각 2종씩 임의로 선정하여 초광속을 측정한 후 400시간까지는 매 100시간 마다 광속을 측정하고, 1,000시간까지는 매 200시간 마다 광속을 측정하였다. 이러한 사항을 표 1에 정리하였다.

표 1. 시료 선정 및 측정 방법

총 시료수	4개社 × 2종 = 8개
소비전력	400(W)급
광속측정 시간(방법)	1차 : 100(h), 200(h), 300(h), 400(h) 2차 : 600(h), 800(h), 1,000(h)

또한 모든 측정은 1.5[m] 적분구안에서 주위온도 $25 \pm 5(^\circ\text{C})$ 만족하는지 확인한 후, 소비전력이 안정화된 이후에 측정하였다.

2.2.2 측정 자료 및 분석

4개社 총 8개의 측정 시료에 대해 1,000시간까지의 광속변화량을 추이하여 이를 그림 2에 나타내었으

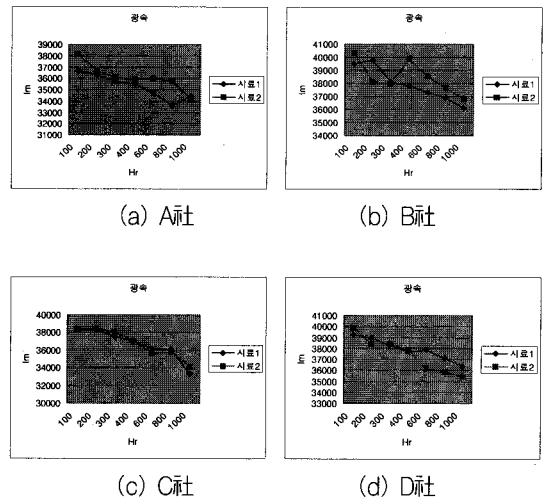
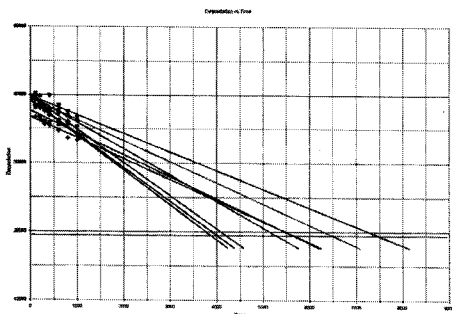


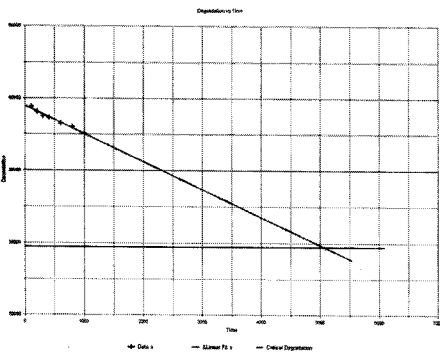
그림 2. 측정시료의 광속변화량 추이

며, A社의 경우 초광속 대비 1,000시간 후의 광속은 10[%]정도 떨어졌으며, B社는 12[%], C社는 9[%], D社는 8[%]로 감소하였다.

이는 측정 시료의 광속 열화 특성을 1,000시간까지 추이함으로써, 이를 통해 나타내어질 수 있는 최적의 방정식을 찾아 측정 시료의 수명을 예측하고자 하는 것이다.



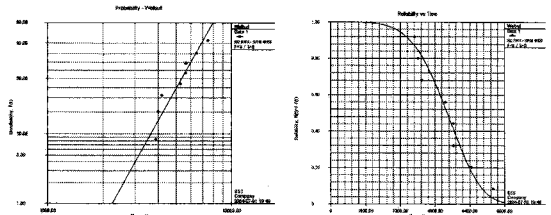
(a) 측정 시료별 광속 열화 곡선



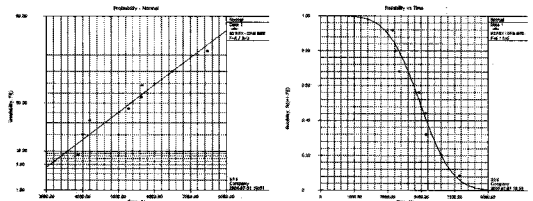
(b) 측정 시료의 평균 광속 열화 곡선

그림 3. 시료의 광속 열화 특성 곡선

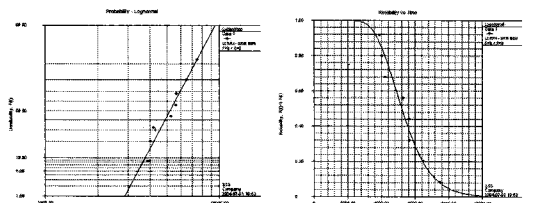
그림 3은 이러한 광속 열화 특성 방정식을 유도하기 위한 방법으로서 측정 시료에 대한 열화 특성을 선형(linear)적으로 나타낸 것이며, (a)는 4개社 8개 측정 시료의 개별 추이 곡선을, (b)는 평균 추이 곡선을 나타내었다.



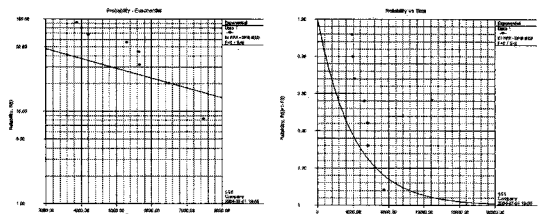
(a) 와이블 분포에 따른 분석(상관계수 $\sigma=0.95$)



(b) 정규 분포에 따른 분석(상관계수 $\sigma=0.97$)



(c) 대수정규 분포에 따른 분석(상관계수 $\sigma=0.97$)



(d) 지수 분포에 따른 분석(상관계수 $\sigma=-0.64$)

그림 4. 분포별 고장 분포 해석

또한 측정 시료의 광속이 초광속에 비하여 50[%]로 떨어지는 시점을 추정하여 그 때의 시간을 시료가 고장난 시간으로 정하였으며, 이는 무전극램프는 수명이 길다라는 점과 수명보증을 감안하여 정한 것이다. 이러한 고장 분포에 따른 가장 최적화된 분포 모형을 유도하기 위해 여러 가지 분석을 실시하였다. 표 2와 그림 4는 이러한 분석 결과를 나타내어주는 것

로서, 표 2는 측정 시료의 고장 분포를 그림 4는 각각의 가정된 분포(assumed distribution)별로 분석한 결과를 나타내었다.

표 2. 시료별 추정된 고장 시간

시료 구분		
A社	1	5,673
	2	5,656
B社	1	5,295
	2	7,487
C社	1	3,883
	2	4,016
D社	1	6,499
	2	4,206

각 분포별 분석결과 지수 분포의 형태로 해석하는 것이 가장 타당성이 있으며, 이를 검정하기 위하여 카이제곱(χ^2) 적합도 검정과 고르모고르프-스미르노프(Kolmogorov-Smirnov, 이하 KS) 적합도 검정을 검토하여 본 연구에 적합한 검정으로 KS 검정법을 선택하였다.

또한 지수 분포에 따른 2,000시간까지의 가장 적당한 시료수를 결정하기 위해 표 3의 사항을 고려하였다.

표 3. 시료수 설계시 유의사항

구분	유의사항
Assumed Distribution	Exponential (지수형)
Required Reliability(%)	80(%)
Required Confidence Level(%)	60(%)
Required Time(h)	2,000(h)

무전극 신평원의 경우 일반조명램프와 같이 1회성 제품이 아닌, 유지보수가 가능한 조명기기로서 2,000시간까지의 신뢰성을 다소 낮게 설계하였다.

이는 TV, 냉장고, 컴퓨터와 같이 고장이 AS가 가능하며, 수리 후 다시 실험을 실시할 수 있기 때문이다.

이러한 표 3의 유의사항을 만족하며 2,000시간을 실험할 수 있는 적당한 시료수는 분석 결과 4개로 판정하였으며, 이러한 시료수를 결정한 분석 프로그램 결과를 그림 5에 나타내었다.

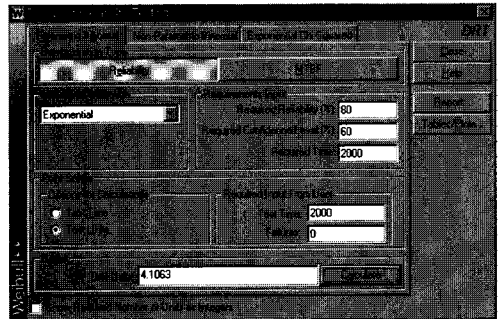
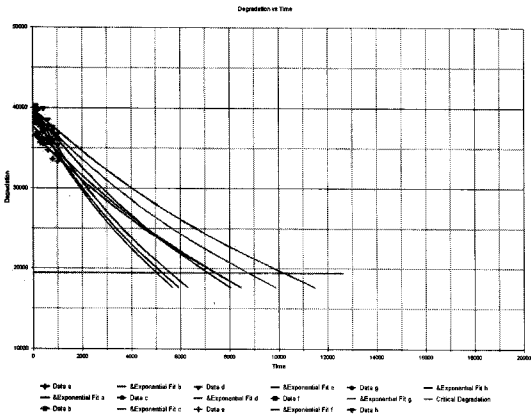


그림 5. 시료수 결정 프로그램 분석 결과

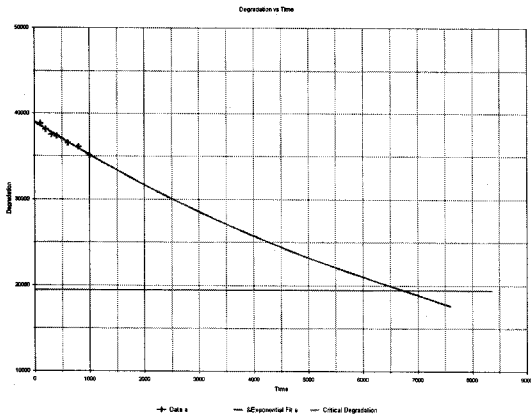
이제 측정 시료의 데이터를 지수분포로 가정하여 분석하여 보자. 이는 전술한 분석결과를 토대로 지수 분포로 해석하는 것이 가장 적합할 것으로 예상하였기 때문이며, 지수분포로 해석한 후 KS 검정을 통해 지수분포의 적합성을 증명하려는 것이다.

그림 6은 측정 시료별 광속 열화 특성을 지수 분포에 따라 분석한 결과를 나타낸 것으로서, (a)는 4개社 8개 측정 시료의 개별 추이 곡선을 (b)는 평균 추이 곡선을 나타내었다.

표 4와 그림 7은 지수 분포에 따른 고장 분포를 해석한 결과를 나타내었다. 또한 상관 계수를 통해 볼 때 지수분포로의 해석이 타당성이 있음을 예상할 수 있는데, 상관계수는 -1과 1사이의 값이어서 -1이나 1에 가까워질수록 직선에 가까운 곡선이 된다. 따라서 지수 분포에 따른 분석에서의 상관계수 -0.64는 직선이 아닌 지수 분포의 가능성을 충분히 보여주고 있다.



(a) 측정 시료별 광속 열화 곡선(지수 분포)

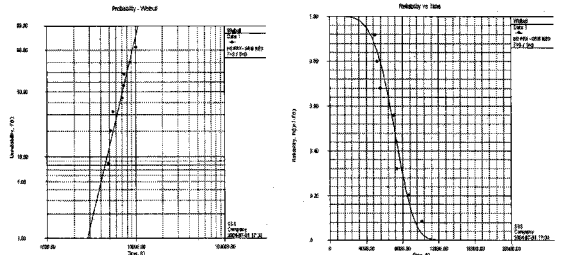


(b) 측정 시료의 평균 광속 열화 곡선(지수 분포)

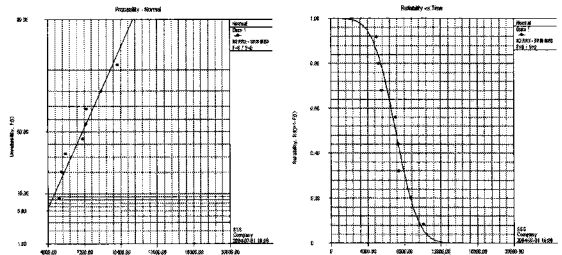
그림 6. 시료의 광속 열화 특성 곡선

표 4. 지수분포에 따른 시료별 추정된 고장시간

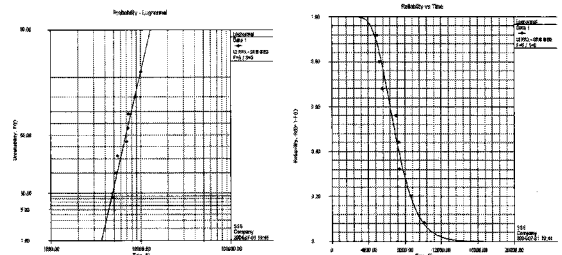
시료 구분		고장시간
A社	1	7,358
	2	7,394
B社	1	7,069
	2	10,132
C社	1	4,988
	2	5,211
D社	1	8,701
	2	5,543



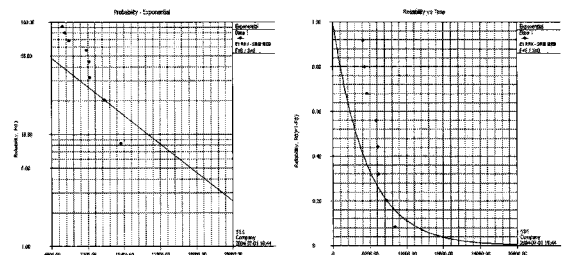
(a) 와이블 분포에 따른 분석(상관계수 $\sigma=0.95$)



(b) 정규 분포에 따른 분석(상관계수 $\sigma=0.97$)



(c) 대수정규 분포에 따른 분석(상관계수 $\sigma=0.97$)



(d) 지수분포에 따른 분석(상관계수 $\sigma=-0.64$)

그림 7. 분포별 고장분포 해석

2.2.3 KS 검정 방법 및 결과

전술한 지수 분포의 분석 결과를 검증을 위해 KS

검정 방법을 사용하여 이를 확인하려 하였다. KS 검정 방법은 적은 시료수의 신뢰성 분석 결과를 검증하기에 적합한 방법으로서 다음에 따라 실시하였다.

- ① 가정한 지수 분포에 따라 누적분포함수를 구한다.
- ② 고장시간 데이터에 의거 누적고장확률을 메디안 순위법에 의하여 구한다.
- ③ 다음 식에 의거 통계량 D 를 구한다.

$$D = \max | F(t_i) - F_0(t_i) |$$

즉, 고장시간 데이터에 의해 구한 관측값의 누적고장확률과와 이론분포의 누적분포함수와의 차의 절대치를 구하고 이 중 가장 큰 값을 통계량 D 로 놓는다.

- KS의 검정표에서 $d(n, a)$ 값을 찾는다. 여기서 n 은 샘플수이고 a 는 위험률이다.
- 통계량 D 와 $d(n, a)$ 값을 비교하여 다음에 따라 판정한다.

- ① $D > d(n, a)$ 이면 위험률 a 로 가정한 이론분포에 적합하다고 볼 수 없다.
- ② $D < d(n, a)$ 이면 위험률 a 로 가정한 이론분포에 적합하다고 볼 수 있다.

KS 검정법에 따라 분석 결과를 표 5에 나타내었으며, 이 결과는 가정된 분포를 채택해야만 하는 가능성을 퍼센트로 나타낸 것이다.

표 5. 분포별 KS 검정 결과

가정된 분포	신형	지수형
와이블	0.2[%]	0.04[%]
정규	0.03[%]	0.01[%]
대수정규	0.04[%]	0.01[%]
지수	98[%]	99[%]

따라서 측정 시료의 고장 분포 유형이 지수형을 따

른다고 해석하는 것이 타당성이 충분하며, 이는 위험도 1[%] 수준에서 지수분포형을 채택할 수 있다고 바꿔 말할 수 있다. 또한 측정 시료가 방전 램프라는 점을 유의하여 무전극 신평원에 이러한 분석 방법을 적용할 경우 가장 적합한 모델식은 지수형의 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f(t) = b \cdot e^{-at} + \beta \tag{2}$$

여기서

- $f(t)$: 광속(lm)
- t : 시간(h)
- a, b : 미지수
- β : 오차

3. 결 론

본 논문은 무전극 신평원의 수명 평가를 위하여 광속의 열화 특성을 추이하면서 광속 데이터들의 최적 표현을 위한 방정식을 유도하였다. 이를 위해 방전 램프의 일종인 메탈헬라이드 400(W)급 8개의 1,000시간까지의 광속 열화 특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 메탈헬라이드 400(W)급 램프의 광속 열화 특성을 분석한 결과 전광속이 초광속 대비 50[%]로 떨어지는 시간이 7,000시간으로 예측되었고 전광속이 초광속 대비 50[%]로 떨어지는 시간을 기기의 고장 시간으로 판정하여, 가장 적합한 고장 분포 유형을 분석한 결과 지수 분포형이 가장 적합한 분포 유형으로 분석되었다.
- 2) 무전극 신평원의 수명 분포를 분석하기 위하여 지수 분포의 고장 유형을 가정할 경우, 대략 2,000시간 정도의 광속 열화 특성을 추이하여야 하며 2,000시간까지의 고장 없이 실험할 수

있는 시료수는 4개로 분석되었다.

- 3) 지수 분포에 따른 분석 결과의 검정을 위하여 고르모고르프-스미르노프(Kolmogorov-Smirnov)을 사용하여 확인한 결과 지수 분포를 채택하는 것이 99[%]로서 가장 최적인 것을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) 지철근, “조명원론”, 문운당, 1996.
- (2) 지철근 외 4, “조명환경원론”, 문운당, 2004. 2.
- (3) 황명근, “조명공학개론”, 도서출판성우, 2003. 9.
- (4) 한국조명전기설비학회, “조명데이터 북”, 1997. 06.
- (5) 이상용, “신뢰성 공학”, 형설출판사, pp. 9~124, 2003.
- (6) 서순근, 하천수, “단순 확률계수 열화모형하에서 수명시험과 열화시험의 비교연구”, Journal of the Korean Institute of Plant Engineering, Vol. 7, No. 2, JUN. 2002.
- (7) ReliaSoft, “Life Data Analysis Reference”, ReliaSoft publishing, 2004.
- (8) 김광섭, “신뢰성평가 전문인력 양성-신뢰성 분석 및 시험”, 기술표준원, 아주신뢰성센터 pp. 1~262, 2004.
- (9) 산업자원부, “초고속 신뢰성 평가를 위한 가속수명 시험”, 2004.

◇ 저 자 소 개 ◇



이세현(李世賢)

1973년 3월 18일생. 인하대학교 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국조명기술연구소 연구사업부 선임연구원/팀장 근무. 현재 성균관대학교 박사과정. 현재 한국조명전기설비학회 정회원. 현재 대한전기학회 정회원.



황명근(黃明根)

1961년 4월 3일생. 서울산업대학교 졸업. 한양대학교 졸업(석사). 인하대학교 졸업(박사). 한국조명기술연구소 수석연구원 /LED조명센터장 근무. 전 세종대학교 겸임교수. 현재 한국산업기술대학교 겸임교수. 본 학회 학술이사 및 KCIE 이사. 대한전기학회 C분과 편집위원.