LED식 신호등의 열피로 수명의 예측법

(Method of Predicting Thermal Fatigue Life of LED Traffic Signal Module)

박태근*, 김진선, 정희석, 김정수, 김도형, 이영주
Tae-Keun Park*, Jin-Sun Kim, Hee-Suk Jung, Jung-Soo Kim, Do-Hyong Kim, Young-Joo Lee

한국조명기술연구소

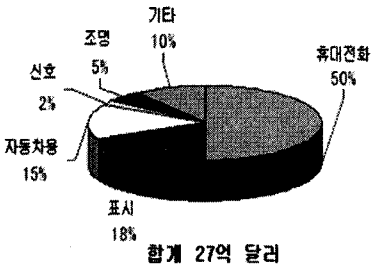
Abstract

In this paper we investigated the method of examining the accelerated life test on LED traffic signal module by the temperature. The longevity presumption of the LED type signal light by a general heat cycle test used and executed cycle when it was done to longevity by the heat cycle test number and the acceleration factor of a real system requirements of this heat cycle test. Therefore, it reports on the introduction of the acceleration type from which the LED traffic signal module is done here to clarify the above-mentioned acceleration factor with the object and the acceleration factor is requested the test atmosphere actually in the system requirements.

1. 서 론

LED (Light Emitting Diode, 발광다이오드)의 역사는 의외로 역사가 길며, 탄화규소에 전류를 흐르게 하면 발광하는 기본적인 원리는 20세기 초반에 발견했다. 현재와 같이 청·녹·적색의 LED가 등장하고, 기술이 확립된 것은 1960대이다. 1990년대에 청색 LED가 개발됨으로서 반도체에 의한 빛의 3원색이 가능하게 되었다. 다시 말해 다양한 색 표현이 가능하게 된 계기로 인해 표시 장치와 같은 LED 용도 확대라는 점에서 전환기를 맞게 되었고, 종래의 LED는 휴대전화, 디지털카메라, PDA, 전자기기의 백라이트와 같은 용도로서 많이 이용되었으나, 청색이 개발됨으로서 백색 LED의 생산이 가능하게 되었다. 그림 1에 의하면 고휘도 LED의 시장 규모 (세계 시장)는 2003년도에 약 27억 달러로 추정하고 있으며, 2002년도와 비교하여 보면 약 47 %의 시장 규모 확대를 보이고 있다[3]. 조명용도로서 LED를 사용하기 위해서는 고출력이고, 고효율적인 LED의 개발이 필수이다. 종래의 LED는 50 mW 정도의 입력으로 1 lm 정도의 밝기밖에 얻을 수 없었다. 최근에는 1 W 입력 클래스의 백색 LED가 계속해서 개발되기 시작하고 있으며, 일부는 시판되기 시작하고 있으나 본격적인 조명에 충분한 광속은 얻지 못하고 있다. 또 효율도 20 lm/W 정도로서, 백열전구보다 높지만, 형광램프에는 미치지 못하고 있다. LED 조명에 기대되고 있는 장수명, 콤팩트 등의 특징은 고출력화와 기술적으로 상반되는 문제점이 있다. 그림 1에서 표시에 사용하는 LED는 약 20 %의 점유를 보이고 있다.

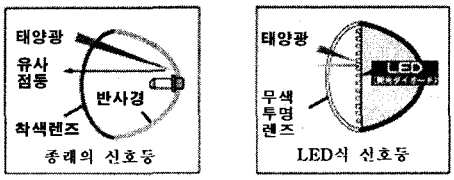
그림 1 LED 용도별 시장 규모 (2003)
Fig 1. Market Scale according to LED Usage



出所 : Strategies Unlimited 社

또한 LED를 광원으로 하는 LED식 신호등은 종래의 전구식 신호등에 비교하여 다음과 같은 점에서 우수한 경향을 보이고 있다 (그림 2 참조).

그림 2 종래의 신호등과 최근의 LED식 신호등
Fig 2. Signal Module of the Past Light and LED Type of Recent



- 렌즈에서 색 구별을 하는 전구식의 경우, 태양광이 반사광에서 적과 청의 발광색의 구별이 어려운 유

사 점등이 발생하나, 광원 자체가 발광하는 LED식은 유사 점등이 발생하지 않고, 안전성에서 우수하다.

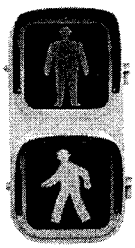
- 발광부의 수명은 전구식이 약 6개월에서 1년 정도이기 때문에 정기적인 램프 교환이 필요하나, LED식은 6년에서 8년의 장수명이기 때문에 보수적인 면에서 우수하다.
- LED식 소비전력은 전구식에 비해 약 1/4이기 때문에 전기요금의 저감이 가능하고, 또한 전력 사용에 의한 이산화탄소의 발생을 억제할 수 있기 때문에 환경에의 부담을 경감할 수 있다.
- 전구식의 경우, 램프의 필라멘트가 단선이 되면 완전 부점등이 되나, LED식 신호등은 LED를 다중회로로서 설계되어 있기 때문에 완전 부점등에 의한 우려는 없다.

2. 각국의 LED식 신호등

2.1 한국

LED식 신호등 <**그림 3**>은 2001년 한국전기 교통이업체로서는 최초로 외국 제품을 모방하여 개발을 시작하여 대전 대덕 연구 단지 내에 최초로 설치된 이 후 급속도로 보급화가 진행되었다.

그림 3 LED식 신호등
Fig 3 LED Type Signal Module



현재 고효율 에너지 기자재로 등록된 업체는 역 87개로 그 밖의 미 인증업체를 포함하여 120여개의 업체가 난립하여 품질저하의 원인이 되고 있다. 그로 인한 대책을 마련하고자 에너지 관리 공단에서는 산업자원부 고시 제 2005-29호 부칙 제 3조(LED식 신호등의 검사 장비 보유)에 의거 업체가 광도 분포 설비를 보유하도록 강제 규정함으로서 품질 향상을 꾀하고 있다.

이에 따라 일부 제조업체 제품을 매입하여 인증을 추진, 저가로 입찰에 참여하는 업체들이 인증을 반납 또는 취소됨에 따라 현재는 약 50여개 업체만이 고효율을 유지하고 있다. 그러나 인증업체들 사이에도 가격 경쟁이 심하여 저 품질의 LED식 신호등 보급이 염려되고 있는 실정이다. 또한 LED 소자를 대부분 수입해 오는 실정으로 LED 소자의 가격 상승이 원가 절감에 큰 영향을 미치고 있으며 이로 인해 국내 LED식 신호등 업체들은 일본의 니치아화학(日亞化學) 등 기존의 수입 LED 생산업체를 대만, 중국 등 저가용으로 바꾸고 있는 실정이다. 2005년 광원 분야 수입 중 약 50 %를 차지할 정도로 큰 비중을 차지하고 있으며, 현재 LED식 신호등의 전국 보급률도 2005년 말 기준 약 35 % 정도로 향후 LED식 신호등 및 제품에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다.

2.2 일본

일본에서는 타 국가에 비교하면 신호등의 LED화 비율이 낮다. 2004년 3월 경찰청에 의하면 일본 약 108만기의 차량용 3색 교통신호등 중 LED를 이용한 것은 지역별로 동경(東京) 16.2 %, 나라(奈良) 15.2 %, 도쿠시마(德島) 14.1 %, 홋카이도(北海道) 0.8 %, 이시가와(石川) 0.3 %이다. 일본의 신호등은 크게 나누어 2종류가 있다. 하나는 곤충의 눈과 비슷한 복안 타입이고, 또 하나는 무색투명 수지의 커버 뒤에 수십 개의 대전류 LED를 배열한 타입이다. 복안 타입의 현재 사용하고 있는 예로서 직경 5 ㎜의 포탄형(砲彈型) LED 램프가 1색 당 312개 사용하고 있다.

2.3 싱가포르

싱가포르에서는 신호등의 100 %가 LED화 되어 있다. 또, 보행자용 신호등에서 녹색에서 적색으로 변경하기까지 남은 시간에 맞추어 녹색 인형의 발이 움직이고, 그 스피드가 점점 빨라진다.

3. LED식 신호등의 수명

최근 보급이 촉진되고 있는 LED식 신호등에 대해서 다음과 같이 정의를 내리고 있다[2]. 우선 LED의 수명에 대해서 LED를 반도체로서 볼 것인지, 조명용의 광원으로서 볼 것인지에 따라서 크게 달라진다. 이제까지 표시 용도의 중심으로서 이용되어 온 LED에 대해서는 반도체 업체의 판단은 「발광 출력이 최초의 1/2로 저하하는 시간」, 즉 광속 유지율 50 %를 기능으로서 수명으로 정의하고 있다. 한편, 조명 업계에서는 종래의 필라멘트 램프의 기준인 「광속이 최초 70 %로 저하하는 시간」, 즉 광속 유지율 70 %를 기능으로서 수명으로 정의하고 있다. LED 애플리케이션으로서 일반적인 수명의 정의에 대해서는

① 애플리케이션마다 기능을 만족하기 위해 최저한의 밝기
② ①에 이르기까지의 시간이 교환수명으로 한다 (사용하는 LED 칩의 보증수명이나 기대수명으로부터 산출된 값에 애플리케이션에서의 연명(延命) 효과 등을 가미한다).

3.1 시험 방법

온도 사이클 시험에서 발생하는 선팽창 계수차에 기인하는 열 피로에 의한 왜도는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$N = C \times f^{\lambda} \cdot \left(\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2} \cdot \Delta T \right)^{-n} \times \exp\left(\frac{E_a}{K T_{max}} \right) \quad (1)$$

여기에서 K, n은 환경에 의해 결정되는 재료 정수, α_1, α_2(1/℃)는 부품의 선팽창 계수, T_{max}(k)는 최대온도, ΔT(k)는 사용온도 범위 차, E_a(eV)는 활성화에너지, k는 볼쯔만 정수 (8.6159×10^{-5} eV/k), C, λ, n은 정수, f (Hz)는 반복 주파수를 나타낸다.

따라서 어느 특정의 시료에 있어 온도 사이클 시험의 가속계수 Acc를 구하면 다음의 식 (2)와 같이 표시 할 수 있다.

$$Acc = \frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right)^n \times \exp\left(\frac{E_a}{K} \left(\frac{1}{T_{1max}} - \frac{1}{T_{2max}} \right) \right) \quad (2)$$

이 식에서 온도사이클 시험의 실사용 환경에 대한 가속계수를 구하기 위해서는 시험환경을 ΔT_2, T_{2max}로 하고, 실사용 환경을 ΔT_1, T_{1max}에 대입한다.
따라서 위 식의 온도 가속성을 나타내는 정수 n과 활성화에너지 E_a를 명확히 설정하는 것이 필요하다. 온도 가속성을 나타내는 경우 n은 $T_{1max} = T_{2max}$인 조건에서의 시험결과로부터 구할 수 있다.

한편, 활성화에너지 E_a는 $\Delta T_1 = \Delta T_2$인 조건에서의 시험결과로부터 구할 수 있다.

3.2 시험 결과

3.2.1 온도 사이클 시험 결과

온도 사이클 시험에는 그림 4와 같이 내구성 시험 챔버를 사용하였다. LED 신호등 모듈은 -30~+80 ℃, -20~+70 ℃, -30~+60 ℃, -10~+40 ℃ 각 온도의 유지 시간은 각각 60분의 조건에서 온도 사이클 시험을 실시하였다 (그림 5 참조).

또한 시험결과가 관측중단 자료인 불완전 데이터이기 때문에 세로축에 누적 하저드값 (Hazard Value)의 추정치를, 가로축에 고장시간을 플롯할 수 있는 와이블 누적 확률지를 이용했다. 여기에서 LED 신호등 모듈의 수명의 정의는 초기 광속에 70 % 지점에 도달한 시점으로 했다. 한편, 각 시험 수준에서의 측정 결과가 거의 직선이기 때문에 온도 사이클 시험에 의한 수명 데이터는 와이블분포를 따른다고 말할 수 있다.

그림 4 항온조에서의 시험
Fig 4 Examination in Temperature Controlled Bath

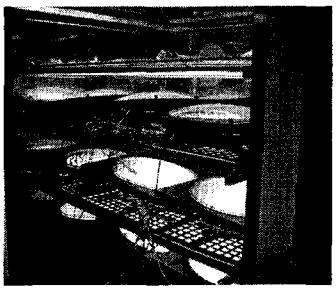


그림 5 -30~+80 ℃ 시험 예
Fig 5 -30~+80 ℃ Testing

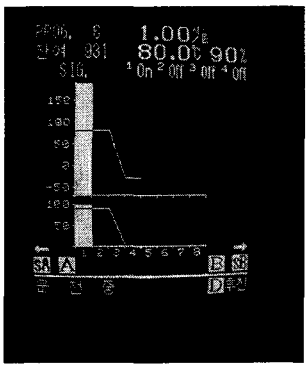


그림 6은 LED식 신호등을 대상으로 하여 실시한 온도 사이클 시험의 시험 결과를 플롯한 것이다.
그림 6에서 각 시험 수준의 형상 파라미터 β와 B_{10} 수명의 결과를 표 1에 표시한다. 여기에서 B_{10} 수명이란 누적고장률이 10 %가 되는 시간이다.

그림 6 와이블 플롯
Fig 6 Weibull Plot

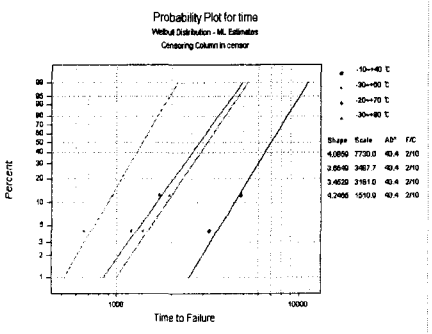


표 1 시험조건에 따른 β와 B_{10} 수명

Table 1 β and B_{10} life depends on the test condition

No.	시험조건	ΔT	β	B_{10}
1	-30~+80 ℃ (243~353 K)	110	4.25	890
2	-20~+70 ℃ (253~343 K)	90	3.45	1660
3	-30~+60 ℃ (243~333 K)	90	3.66	1890
4	-10~+40 ℃ (263~323 K)	50	4.09	4460

3.2.2 가속식의 도입

표 1에 표시한 B_{10} 수명으로부터 온도 가속성을 나타내는 정수 n과 활성화에너지 E_a를 다음과 같이 산출하였다.

3.2.2.1 활성화에너지 E_a의 산출

ΔT가 일정한 경우, 식 (1)은 N과 T_{max}의 함수가 되어

$$N = A_1 \cdot \exp\left(\frac{E_a}{KT_{max}}\right) \tag{3}$$

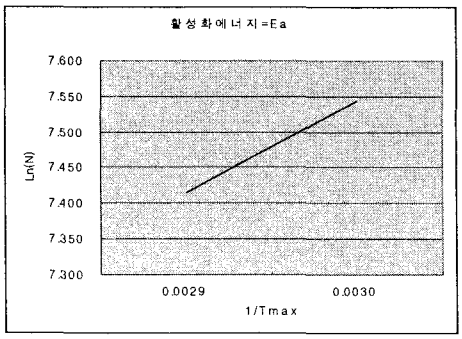
이 된다. 여기에서 A_1은 정수이다. 다음으로 식 (2)의 양변에 대수를 취하면

$$\ln(N) = \frac{E_a}{K} \cdot \frac{1}{T_{max}} + \ln(A_1) \tag{4}$$

이 되고, 식 (4)을 ln(N)와 $1/T_{max}$ 의 함수로서 플롯하면, 그 기울기로부터 E_a를 산출 할 수 있다. -20~+70 ℃ 및 -30~+60 ℃ 에서의 B_{10} 수명을 플롯한 데이터를 <그림 7>에 표시한다. 여기에서 구한 기울기로부터 E_a=0.128이 된다.

그림 7 활성화에너지 E_a의 도입

Fig 7 Introduction of Activation energy Ea



3.2.2.2 온도가속성을 나타내는 정수 n의 결정

식 (1)의 양변을 $\exp(E_a/KT_{max})$로 나누고, 양변에 대수를 취하면

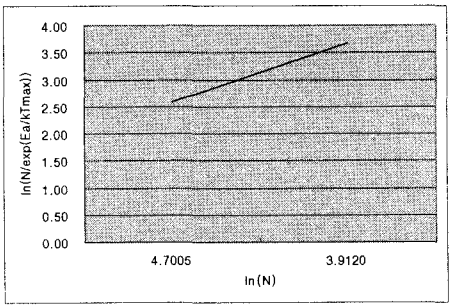
$$\ln\left(\frac{N}{\exp\left(\frac{E_a}{KT_{max}}\right)}\right) = -n \cdot \ln(\Delta T) + \ln(A_2) \tag{5}$$

가 된다. 여기에서 A_2는 정수이다.

따라서 이 식을 $\{N/\exp(E_a/KT_{max})\}$과 $\ln(\Delta T)$의 함수로서 플롯하면, 그 기울기가 n이 된다. -30~+80 ℃, -10~+40 ℃에서의 B_{10} 수명 및 위에서 구한 활성화에너지 E_a = 0.128 eV로부터 그림 8과 같이 플롯할 수 있다. 이 그림에서 n=1.36를 구할 수 있다.

그림 8 온도 가속성을 나타내는 정수 n의 도입

Fig 8 Introduction of constant n that shows temperature acceleration



이상의 결과로부터 실제 사용 환경에 있어서 사용 최고 온도 T_{1max}(K)와 사용 온도 범위 ΔT_1 및 온도 사이클 시험에 있어서 최고 온도 T_{2max}(K)와 온도 범위 ΔT_2에서, 온도 사이클 시험의 실제 사용 환경에 대한 가속계수를 산출하는 식은 다음과 같다.

$$Acc = \frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)^{1.36} \times \exp\left(\frac{0.128}{K}\left(\frac{1}{T_{1max}} - \frac{1}{T_{2max}}\right)\right) \tag{6}$$

4. 결 말

차세대의 신광원으로서 기대되고 있는 LED는 본격적인 보급에는 아직 기술적인 과제(발광 효율의 향상 등), 가격의 문제, 수명 및 제품으로서의 기능 평가 등 극복해야할 과제가 남아있다. 또한 신광원으로서 이용되었을 때에 인체에의 영향에 대해서 유해 여부 등 앞으로 적극적으로 검증해야 할 것이다.

- 발광 효율
- 가격 문제 (현재 같은 밝기(광속비)로 백열램프의 약 300배, 형광등의 약 21배)
- 연색성의 문제

• 고휘도화에 동반한 인체에의 영향

일반적인 온도 사이클 시험에 의한 LED식 신호등의 수명 추정은 온도 사이클 시험에 의해서 수명에 도달한 사이클 수와 이 온도 사이클 시험의 실제 사용 환경에 대한 가속 계수를 이용하여 실시했다. 따라서 여기에서는 LED식 신호등을 대상으로 상기의 가속계수를 명확히 하는 것을 목적으로 하여 시험환경과 실사용 환경에서 가속 계수를 구하는 가속식의 도입에 대해서 보고했다.

참 고 문 헌

[1] 大野浩一, 本山晃, 魚留秀司, 黑井修一 "무연 땜납의 熱疲勞壽命의 予測法", 松下電工技報, Feb. 2003
[2] LED 照明 推進 協議會, 白色 LED의 技術 로드맵, JLEDS Technical Report, Vol. 1, Oct. 2005
[3] 機械 시스템 振興協會, "친환경형 LED 照明機器 시스템의 總合的 普及 戰略에 관한 調査 硏究 報告書", 2004