

국내 직관형 형광램프(FL20)의 고장분석 및 수명평가

(Failure Analysis and Life Estimation of Fluorescent Lamp (FL20))

김도형, 이영주

(DoHyeong Kim, YoungJoo Lee)

한국조명기술연구소, 121-883 서울시 마포구 합정동 355-24

1. 도입

형광램프는 미국의 GE(General Electric Company)가 1938년 Nera Park이 형광램프의 양산 설비의 제작 및 설치를 완료하여 양산체제를 정비하고, 주광색 및 백색형광 4종과 5종류의 색형광램프의 발매를 발표한 후 약 70년이 되는 역사를 가진 광원이다. 한국에서 형광등이란 말이 생긴 것은, 1957년 신광전기가 지철근 박사의 도움으로 형광등을 개발하면서부터이다. 본 고에서는 직관형 형광램프(FL 20W)에 대한 수명 평가 및 고장분석을 중심으로 논한다.

2. 형광램프 구조 및 주요 구성 재료

2.1 형광램프 구조

형광램프는 그림 1과 같이 내벽에 형광물질을 도포한 유리관과 양단의 전극(필라멘트)로 구성되어 있다. 유리관의 공기를 빼어 진공으로 한 후 소량의 수은과 아르곤 가스를 봉입한다. 또 전극에는 전자 방사 물질이 도포되어 있다.

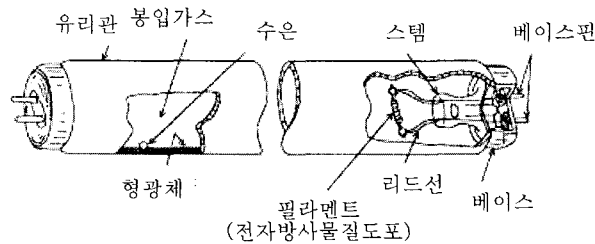


그림 1 형광램프의 구조

2.2 형광램프 주요 구성 재료

2.2.1 유리관

형광램프에 사용되고 있는 재료 중에 중량, 용적이 큰 재료이다. 조성은 일반적인 창유리와 동일한 소다유리이나, 장시간의 점등에 의한 변질을 방지하기 위해 순도가 높은 고품질의 재질을 사용하고 있다.

2.2.2 형광체

종래의 형광체에는 1종류로 백색을 발광하는 안티몬 3가 이온으로 처리한 할로인산 칼슘 형광체를 사용하였다. 최근에는 연색성이 좋고, 효율도 높은 삼파장형 램프에 이용되는 희토류형광체(稀土類螢光體, phosphor using rare earth elements)의 수요가 확대되고 있다. 이 램프는 광의 3원색인 적색, 녹색, 청색에 발광하는 형광체를 혼합하여 도포한 것이다. 현재 많이 이용되고 있는 형광체로서는 적색이 $Y_2O_3:Eu$, 녹색이 $LaPO_4:Ce, Tb, GdMgB_5O_{10}:Ce, Tb$, 청색이 $BaMg_2Al_{16}O_{27}:Eu$ 이다. 이 3색 형광체의 혼합 비율을 변환함으로써 주광색(晝光色), 주백색(晝白色), 전구색(電球色) 등 램프가 만들어진다. 높은 관벽 부하에 견딜 수 있도록, 형광체의 개발에 의해서 램프의 세관화와 콤팩트화가 가능하다고 말할 수 있다.

2.2.3 전극

전극에는 텅스텐의 2중 또는 3중 코일 필라멘트를 사용하고 있다. 필라멘트 표면에는 방전하기 쉽도록 BaO, CaO, SrO, ZrO_2 등 혼합물의 전자 방사물질이 도포되어 있다. 필라멘트는 스템을 관통하는 철 또는 니켈의 도입선에 의해서 지지되고 있다.

2.2.4 봉입가스

일반적으로 질소와 아르곤가스를 봉입하여 사용하고 있으나, 성전력 램프 또는 고출력 램프의 일부에는 아르곤가스에 크립톤가스 또는 네온가스를 혼합한 것도 사용되고 있다.

2.2.5 수은

일반적인 램프에서는 액체의 금속수은이 봉입되어 있으나 콤팩트형 형광램프, 전구형 형광램프에서는 관벽온도가 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 의 최적치를 넘기 때문에 수은의 증발량을 억제하기 위해 Bi, In, Pb, Sn 등 아말감이 사용되고 있다.

2.2.6 베이스

직관형용 베이스의 본체는 알루미늄, 환형용은 PBT(Poly Buthylene Terephthalate) 등의 합성수지이다.

3. 형광램프의 특성

3.1 형광램프의 발광원리

형광램프는 방전등의 일종이다. 형광램프의 발광원리는 그림 2와 같이 전극(필라멘트)에 전류가 흘러 가열되면 전극에서 열전자가 방출된다. 이때 램프 양단의 전극 사이에 전압이 걸리면 개시(램프가 점등)된다. 즉, 전극으로부터 방출된 열전자가 반대측의 전극을 향하여 비산한다. 이때 열전자가 유리관내에서 증발하고 기체원자로 된 수은원자에 충돌한다. 이 충돌로부터 수은원자가 자외선을 발생한다.

이 자외선은 눈에 보이지는 않으나 유리관내에 도포한 형광물질에 자외선이 닿으면 가시광으로 변환이 된다.

이 형광물질의 종류로부터 백색, 주광색 등 여러 가지 종류의 램프가 만들어진다.

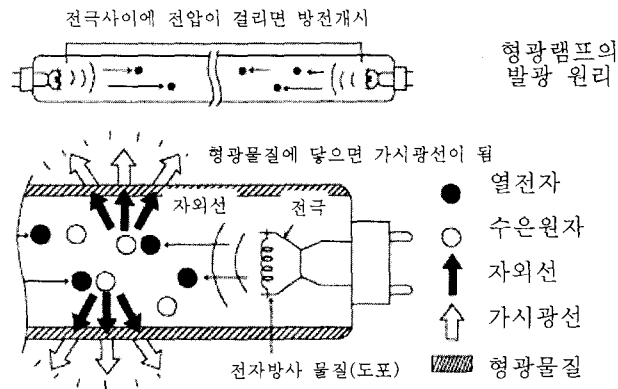


그림 2 형광램프 발광원리

3.2 온도특성

형광램프는 수은의 포화증기압 방전을 이용하고 있기 때문에 램프의 제특성은 주위온도의 영향을 크게 받는다. 즉, 수은의 증기압이 $6 \sim 10 \times 10^{-3}$ mmHg일 때에 형광체를 자극하는 253.7 nm의 자외광이 가장 많이 방출한다. 이 증기압은 램프의 관벽온도가 $38 \sim 40$ °C일 때 얻어지고, 보통의 형광램프는 주위온도가 $20 \sim 25$ °C일 때 최고의 기능을 발휘하도록 설계되어 있다.

4. 형광램프의 수명특성 분석을 위한 통계적 분석

4.1 Weibull 해석의 기초 수리

고장의 패턴을 분류하고, 수명 특성을 분석하기 위해서는 Weibull 분포를 주체로서 Weibull 해석이 잘 이용된다.

Weibull 분포 곡선은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$f(t) = \frac{m}{a} (x - \gamma)^{m-1} e^{-\frac{(t-\gamma)^m}{a}} \quad (1)$$

단, m : 형상 모수, a : 척도 모수, γ : 위치 모수이다. 실제 고장분포의 형태로 Weibull 분포를 적용하기 위해서는 상기의 3 변수가 추정이 되면 그림 3과 같은 와이블분포 형태의 그림을 작성할 수 있다. 그림 4는 Weibull 확률지이다.

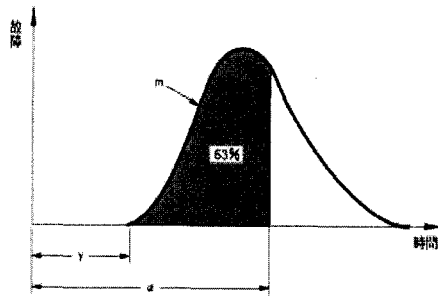


그림 3 Weibull 분포의 확률밀도함수

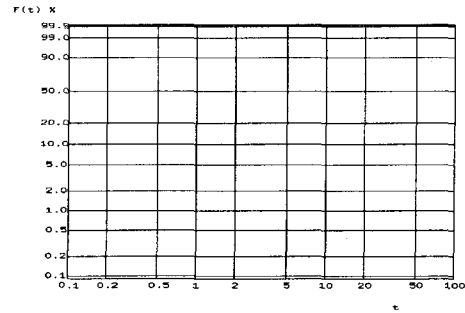


그림 4 Weibull 확률지

Weibull 확률지의 특징은 다음과 같다.

- (1) Weibull 분포가 수명분포에 가장 근사하다
- (2) Weibull 확률지는 취급하기 쉽다
- (3) 여러 가지 형태의 고장이 혼재하고 있어도 형태로서 식별할 수 있다. 즉, Bathtub 곡선과의 관계는 다음과 같다. 형상 파라미터 m 의 값에 따라 각각 다음과 같이 분류된다.
 - (1) $m < 1$ 의 경우 : 고장의 형태는 초기고장형
 - (2) $m = 1$ 의 경우 : 고장의 형태는 우발고장형
 - (3) $m > 1$ 의 경우 : 고장의 형태는 마모고장형이다.

4.2 형광램프의 수명에 영향을 주는 제조조건

4.2.1 전자방사 물질 소멸

형광램프의 전극부는 가느다란 텅스텐 필라멘트에 전자방사 물질(에미터)을 도포한 것으로 형광램프를 점등하면 전자방사 물질이 점차 소모하여 가고, 소멸되면 램프는 점등하지 않게 된다. 즉, 형광램프의 수명은 전자방사 물질의 소모에 의해 결정되고, 전극의 구조, 텅스텐 필라멘트의 설계, 전자방사 물질의 재질 등이 형광램프를 설계상에서 중요한 요소로 된다. 전자 방사 물질의 소멸은 전원 전압의 변화, 주위온도, 점멸 횟수에 따라 변화한다 (그림 5~7 참조).

4.2.2 수은 부족

형광램프는 발광의 원리상 미량의 수은을 사용한다. 필요 최저한도의 수은이 램프관 내에 확보되어 있지 않으면 점등 시에 점차 보라색을 내어 본래의 광속을 유지할 수 없게 되고, 마침내 고갈하여 수명에 이르게 된다. 한편, 필요 최저한도 이상의 수은이 램프관 내에 확보되어 있으면 폐기 시 수은의 유해성 때문에 환경문제에 많은 영향을 미치게 된다

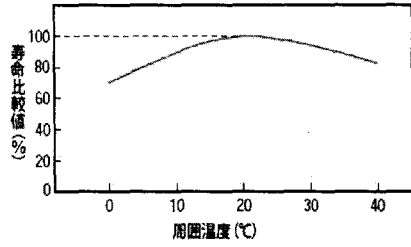


그림 5 주위 온도와 수명

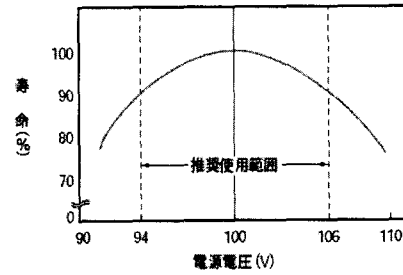


그림 6 전원 전압과 수명

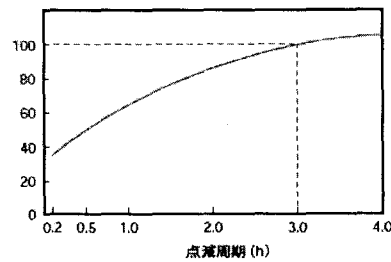


그림 7 점멸주기와 수명

4.3 시험방법 및 시험결과

시험은 주위온도 18~23 °C, 상대습도 30~40 %인 환경에서 국내제품과 선진제품 각각 50개를 대상으로 24시간 연속 점등 상태로 진행했다. 그림 8은 국내 제품의 50개 중 22개가 수은 부족으로 인해 형광램프가 보라색으로 열화가 진행된 일부의 상태이고, 그림 9는 최우추정법을 이용한 와이블분포의 모수를 추정한 결과이다. 형상모수 $m=4.63$, 척도모수 $a=2931$, $MTTF=2680$ 이다.



그림 8 열화가 진행된 형광램프

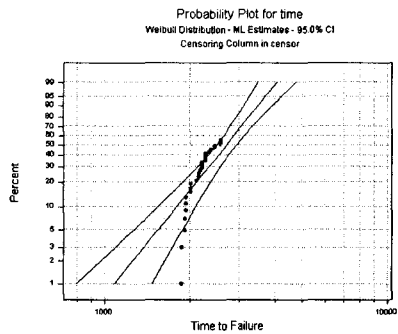


그림 9 최우추정법을 이용한 와이블 분포의 모수 추정

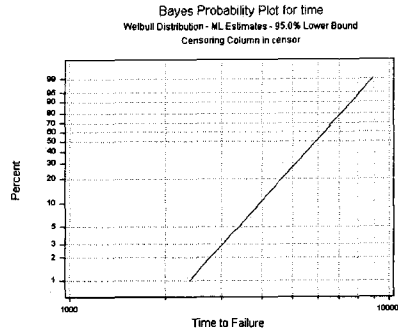


그림 10 선진 제품의 베이즈 분석 시 확률 도시 결과

그림 10은 선진 제품을 상기의 시험조건 하에서 3 500 시간동안 시험했을 때 50개 모두 고장이 하나도 발생하지 않았다. 그 수명분포로서 형상모수를 국내 형광제품과 동일한 $m=4.6327$ 로 가정하여 Minitab의 베이즈분석을 이용하여 B_{10} 수명, MTTF를 추정하여 보았다. 그 결과는 표 1과 같다. 결과로서 선진제품이 국내제품보다 2.2배 정도의 장수명이고, 6 000시간일 때의 신뢰도의 95 % 신뢰하한은 0.48로 추정되었다.

표 1 국내제품과 선진제품의 수명 비교(각각 50개)

제품 시료	B_{10} 수명	MTTF
국내 제품	1 800	2 680
선진 제품	3 252	5 871

5 결론

본 고에서는 직관형 형광램프(FL 20W)에 대해 그 수명특성을 알아보았으며, 더 나아가 선진 제품과의 수명 비교하였다. 실제로 선진 형광램프 생산의 특징은 자동화에 의한 생산이기 때문에 램프마다의 수명특성의 편차는 일정한 경향을 보였고, 더 나아가 형광램프의 고유 특징인 장수명의 경향을 보였다. 따라서 국산제품의 수명을 연장시키기 위한 하나의 대안으로써 자동화 생산을 통해 수명 특성의 편차를 줄이고, 수은양의 조절과 안정기 제조업체에 의한 회로 기술, 발열, 절연기술 등의 개량에 의해 형광램프의 장수명화가 달성되리라고 기대된다.

참고문헌

- [1] 한양대학교 신뢰성분석 연구센터, “고장분석 전문기술 교육 - 수동부품의 고장분석,” *신뢰성분석 연구센터* (2004).
- [2] 신승훈, “와이블 차트와 가속시험”, *과학기술* (2003)
- [3] 박경수, “신뢰성 개론”, *영지문화사* (1998)
- [4] 澤田 清, 三道 弘明, “소프트웨어의 신뢰성 실증 시험방식”, *日本オペレーションリサーチ*, Vol. 44 No 8, pp. 415-419 (1999)
- [5] 이영주, “일반조명시스템의 신뢰성 평가를 위한 고장수명분포 및 보증수명 연구고찰”, *등지*, (2003.12 ~ 2004.02)
- [6] 小原章夫, 램프의 수명(1), *日本照明学会誌*, 80-7, pp. 479-480 (1996)
- [7] 東芝라이텍, *技術解説*, (2005)
- [8] URL : <http://www.iwasaki.co.jp>