

## 무전극형광램프의 고온 신뢰성 연구

정의효<sup>1\*</sup> · 형재필<sup>1</sup> · 임성용<sup>1</sup> · 임홍우<sup>1</sup> · 장중순<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국기계전기전자시험연구원 <sup>2</sup>아주대학교

### High Temperature Reliability Study of Low Frequency In-door Electrodeless Lamp

Ui-Hyo Jeong<sup>1</sup> · Jae-Phil Hyung<sup>1</sup> · Seong-Yong Lim<sup>1</sup> · Hong-Woo Lim<sup>1</sup> · Joong-Soon Jang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Korea Testing Certification, <sup>2</sup>Graduate school of Ajou University

Electrodeless lamp is famous for its long life. But its reliability is dependent not only on electrodes but also on materials and structures. To evaluate end product's reliability, we studied high temperature durability by 60 °C, 75 °C and 90 °C temperature tests, and predicted failure times by an exponential model through regression analysis. However, the test showed that temperature does not affect degradation of electrodeless lamps. Their luminous outputs degrade during the early time of the test (till 250 hours) and then converge to a saturation points. Also, '410nm ~ 530nm' spectrum degrades more than other spectra.

**Keywords:** Electrodeless Lamp, Accelerated Life Test, Weibull Distribution, Fluorescent Lamp

#### 1. 서론

무전극형광램프의 방전 현상은 1884년 Hitroff에 의해 처음 발견되었고 1891년 Nikola Tesla가 비교적 낮은 용량의 결합형 RF주파수에 의한 방전램프를 소개하였다. 1907년 오늘날의 무전극형광램프의 원리인 ICP(inductively Coupled Plasma)를 발견하였고, 1978년에 무전극형광램프가 개발되어 1990년대에는 GE, Osram 등에 의해 상용화가 시작되었다. 현재 LED가 많은 주목을 받고 있지만 무전극형광램프 또한 차세대 광원으로 많은 주목을 받고 있다. 무전극형광램프는 100 W ~ 300 W 또는 수십 kW급까지 커버가 가능하며 LED에 버금가거나 그 이상의 긴 수명으로 주목받고 있음에도 가격 등의 문제로 보급이 지연되고 있으나 시간이 경과함에 따라 LED와 다른 독자적인 영역을 구축할 것으로 기대되고 있다. 이와 같이 무전극형광램프는 긴 수명등으로 주목받고 있음에도 램프 자체의 수명에 대한 실질적인 검증에 대한 연구는 없었다.

William S, Gleason(1971)은 무전극램프의 안정성에 대해서 연구했지만 분광학과 광화학 등에 쓰이는 특수용도의 방전램프에 국한되었으며, 5000시간 내외의 시간에서 변화가 최소화 되는 안정적인 광출력에 대해 연구하였다.

Kazantsev(1998)과 Oyama *et al.*(1974)에 의하면 방전램프의

수명은 출력 과위, 동작온도, 제조환경과 관련 있다고 한다. 하지만, 위 연구는 루비듐 램프에 한정되어 있으며, 무전극형광램프에서는 제품의 전력은 매칭을 통해서 결정되어 지기 때문에 전력을 조절하기가 어려워 출력 과위를 조절하여 형광램프의 수명을 결정하고 가속수명시험을 진행하기 어렵다. 또한 위 연구는 램프 전체가 아닌 물질의 열화에 대해서만 연구하였다. 다만 출력의 증가는 곧 발열과 관계되어 있고, 코일과 같은 다른 램프의 주요 구성품 또한 온도에 따른 열화에 관계되어 있으므로, 본 연구에서는 고온에서의 가속수명 시험을 통하여 무전극형광램프의 제품 단위에서의 고온 신뢰성에 대해 연구하였다.

#### 2. 무전극형광램프의 발광원리 및 특성

##### 2.1 무전극형광램프의 발광원리

Wharmby(1993)에 의하면 무전극형광램프는 3가지 방식의 방전이 가능하다. 첫 번째 방식은 [E방전]이라고 하는 방식으로 가스가 채워진 관에 판이 캐패시터처럼 부착된 방식이다. 한번 break-down이 일어나면 변위전류(Displacement-Current)가 튜브벽을 통해서 흐르게 되면서 발광하는 방식이며, 용량적

\* 교신저자 bnrgb@naver.com

2014년 6월 17일 접수; 2014년 7월 29일 수정본 접수; 2014년 8월 7일 게재 확정.

결합 방전이라고도 한다. 이 방식은 [H방전]에 비해 사용주파수가 높아야 한다는 단점이 있다.

두 번째 방식은 [H방전]이라 불리워지는 방식이다. 구동회로를 통해 고주파가 페라이트코어의 코일에 공급되면 자기장이 형성된다. 형성된 자기장은 페라이트에 의해서 밀집화되며, 이때 자기장의 시간에 대한 변화율은 기전력을 만들고 방전관 내부 전자들은 기전력에 따라 가속된다. 가속된 전자는 중성입자와 충돌하게 되고, 충돌과정에서 에너지가 방출되어 형광체에 흡수된다. 형광체는 여기상태(Excited State)로 에너지 준위가 오르게 되고, 다시 기저상태(ground state)로 되돌아오면서 에너지를 방출하게 되며 이 에너지가 실제로 제품에서 발광하는 가시광이 된다. ICP(Inductively Coupled Plasma)라고도 한다. 현재 대부분의 저주파 및 실내용 무전극형광램프는 이 방식을 따르고 있으므로 이 방식의 램프를 대상 제품으로 정하였으며 <그림 1>과 같은 전구(Bulb) 형태를 가지고 있다.

세 번째 방식은 초고주파 방전 방식으로 고전력(1kW) 이상의 것이 실용화 되어 있다. 정관철(2005)에 의하면 전자레인지에 사용되는 고주파 발전기(Magnetron)를 이용하여 발생된 2.45Ghz의 마이크로 웨이브를 웨이브가이드를 사용하여 무전극형광램프 내의 불활성 가스(S2)에 방사시키면 황 분자가 극도로 이온화된 상태인 플라즈마 상태를 형성 유지하면서 2차적으로 금속 화합물이 연속적인 스펙트럼의 빛을 연속적으로 발산할 수 있는 시스템이다.



<그림 1> 무전극형광램프

## 2.2 무전극형광램프의 특성

황명근 외(2001)에 의하면 무전극 형광램프는 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

첫째, CRI(Color Rendering Index)가 80 이상의 고연색성을 가지고 있다. 이는 LED와 OLED와 같은 신광원들과 비교해서도 높은 수치이다.

둘째, 90 lm/W 이상의 고효율을 가지고 있음에도 면에서 발광하는 구조를 지니고 있으므로 LED와 같이 점광원으로 인한 눈부심 현상이 적다

셋째, 전극이 없으므로 전극의 열화 및 오염으로 인한 수명 저하가 없어, 수명이 매우 높아 6만 시간 이상의 수명을 지니고 있는 것으로 알려져 있다. 일반적인 전극을 가진 형광램프의 수명은 양쪽 극(필라멘트)의 열화와 깊은 관련성을 가지며

이는 필라멘트의 수온이 침착하여 자외선을 내뿜을 수 없게 되어 열화가 진행되는 것이 가장 주된 열화 매커니즘이다. <그림 2>를 보면 그 차이를 볼 수 있다. 형광램프는 필라멘트의 열화로 인해 흑화 현상이 발견되는 반면 무전극 형광램프는 전극이 없는 형태의 형광램프로써 램프 내부에 수은증기를 두고 강력한 자력선에 의해서 수은증기를 전리시켜 자외선을 발생시켜 그 자외선을 가시광선으로 바꾸는 구조를 가지고 있어서 필라멘트에 의한 열화가 없고, 따라서 매우 긴 수명을 지니고 있다.

넷째, 램프를 구동하기 위한 주파수는 수백 kHz에서 수십 MHz이며, 주파수가 높을수록 전력변환효율이 낮아지기 때문에 종합효율은 이러한 손실을 고려하여야 한다

다섯째, 일반 램프의 경우 점멸 시 필라멘트 손상에 의해 흑화 등으로 열화가 많이 일어나지만 무전극 램프의 경우 즉시 점멸되며 점멸에 의한 수명에 영향이 없다.

여섯째, 무전극형광램프는 고주파에 점등하므로 전자파에 의해 타 기기에 영향이 있다. 이러한 고주파 전자파는 노이즈를 발생시키며, 이러한 전자파 노이즈에 대한 대책이 필요하며 노이즈 발진원인에 확실한 접지가 필요하다.



<그림 2> 무전극형광램프와 형광램프의 필라멘트 열화

## 3. 시험 설계

### 3.1 무전극형광램프 고온 수명 시험 설계

#### (1) 스트레스 인자 및 레벨 설계

무전극 램프의 열화를 가속시키기 위한 요인으로 고전류, 온도, 습도 등을 생각할 수 있다. 이 중 첫째로 무전극형광램프는 구동을 위하여 임피던스 매칭이라는 것이 필요하다. 이러한 임피던스 매칭 과정에 의하여 정해진 램프에 정격의 전압과 전류 주파수를 공급하여야 하므로, 정격보다 높은 전력을 인가할 수 없다. 둘째, 무전극형광램프는 내부의 가스를 밀봉하기 위한 밀폐된 구조를 가지고 있으므로 습도의 영향이 적을 것이라고 추측할 수 있다. 셋째, 주요된 고장모드에는 광속열화와 점등 불량인 있으며, 광속 열화는 형광체 열화와 관련 있고, 점등 불량은 인덕션 코일의 단선이 있다. 이러한 주요고장모드는 온도와 밀접한 연관이 있다

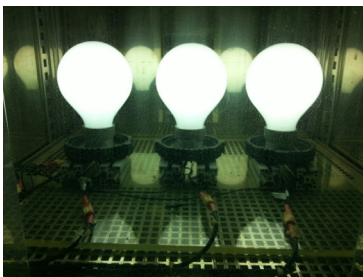
이에 따라, 실내용 무전극형광램프의 주요한 가속스트레스를 온도로 설정하였고, 60°C, 75°C, 90°C의 세 개의 층을 두어 가속성 성립여부를 판단하고 가속성이 성립할 경우 수명을 산출할 수 있도록 설계하였다. 시료는 150 W가량으로 제

품의 발열이 크고, 제품의 측정시간이 약 1시간 30분으로 오래 걸리기 때문에 재현성확보를 위하여 조건별 3개의 시료를 선택하였고, 3개층 총 9개 시료를 선정하였다.

**(2) 시험절차**

시험은 2M 적분구와 Instrument System의 CAS-140 스펙트로메터로 진행하였다. 약 100시간 또는 200시간 간격으로 광속열화를 확인 해 가며 시험을 진행하였으며, 제품에 135kHz의 고주파를 인가해야 하기 때문에 광속구 내부에 전원장치와 램프를 같이 설치하여 열화를 확인하였다. Shaffer and Godyak (1999)에 의하면 무전극 램프의 경우 Run-up 현상에 의해 점등 후 60분까지 지속적으로 광속이 증가하는 현상이 존재한다. 그러므로 약 1시간 30분가량의 에이징 시간을 매 측정마다 두어 재현성을 확보하였다.

시험은 <그림 3>과 같이 외부에 컨버터를 두고 내부에는 램프만 설치하여 구동하였다.



<그림 3> 시험 세팅 사진

**3.2 대상 무전극형광램프**

본 논문에서 사용한 무전극형광램프는 동작주파수 135 kHz, 150 W 가량의 Bulb type의 무전극형광램프이다. 무전극형광램프는 [E방전], [H방전], 초고주파 방전 방식이 있으며 일반적인 실내용 무전극형광램프의 경우 대부분 [H방전]방식을 따르고 있다. 본 논문에 사용된 제품 역시 [H방전]방식을 따르며 전구(Bulb)형태를 지니고 있다.

<표 1> 대상 무전극형광램프의 초기특성 및 사양

주요 사양	Power : 150 W
	Frequency : 135 KHz
	Color temperature : 6000 K
	CRI(Ra) : 80
	System Efficiency : 80 lm/W

**4. 무전극형광램프 고온수명 시험 결과**

**4.1 가속성 검증**

**(1) 수명추정**

시험은 약 1600~2000시간 정시 중단하였으며 광출력이

70% 까지 열화된 지점인 L70을 고장판정 기준으로 삼았을 때 열화가 70%까지 진행되지 않았다. 그러므로 열화추정을 위하여 열화모델을 가정하여야 한다. 선형모델과 지수열화 모델을 가정하여 회귀분석을 수행한 결과 지수열화모델이 더욱 뛰어난 R-square 값을 가졌고 지수열화가 보다 적합한 모델이기 때문에 식 (1)과 같이 지수열화를 가정하여 선형회귀 분석을 하였다. 여기서 y는 초기대디 광속 열화율을 의미하며 t는 시간(hr)를 의미한다. a와 b는 회귀분석에 의해 유도되는 값이다.

$$y = a \times e^{-b \times t} \tag{1}$$

선형회귀분석을 위하여 식 (1)에 log를 적용하면 식 (2)를 얻을 수 있다.

$$\log(y) = \log(a) + b \times t \tag{2}$$

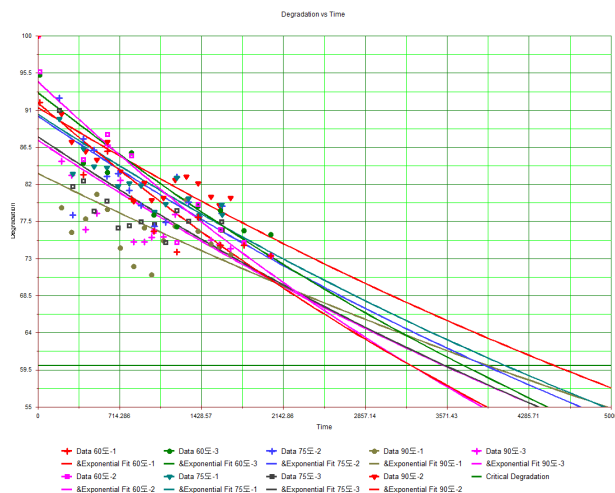
식 (2)에 log(y)와 log(a)를 각각 Y와 A로 치환하면 선형회귀분석 모델인 식 (3)을 얻을 수 있다.

$$Y = A \times x + B \tag{3}$$

식 (3)을 기반으로 회귀분석하여 식 (1)을 토대로 L70으로 추정한 수명은 <표 2>와 같고 얻은 식의 그래프는 <그림 4>와 같다. 프로그램은 Reliasoft의 Weibull++ 6을 이용하였다.

<표 2> 70% 광속 수명 추정

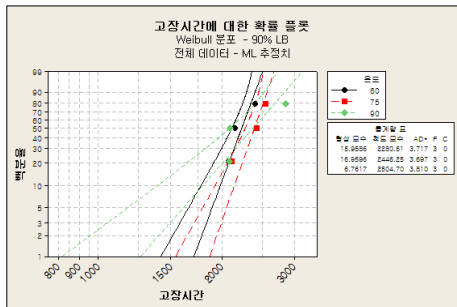
추정 고장시간(hr)	조건	시료
2 074	60 °C	#4
2 147	60 °C	#5
2 409	60 °C	#6
2 550	75 °C	#1
2 430	75 °C	#2
2 114	75 °C	#3
2 085	90 °C	#7
2 854	90 °C	#8
2 089	90 °C	#9



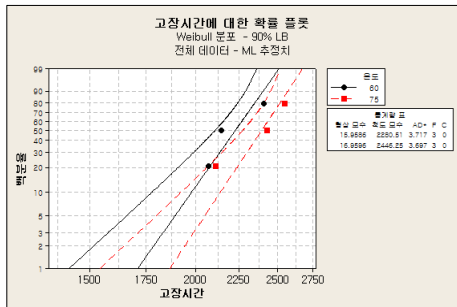
<그림 4> 70% 수명추정 그래프

(2) 가속성 검증

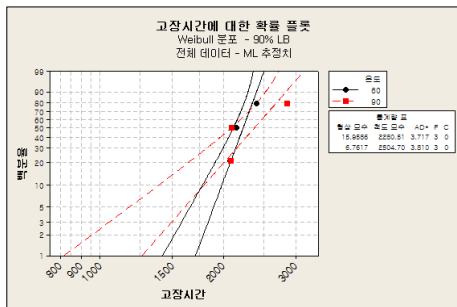
가속성은 Minitab Inc사의 Minitab 14를 이용하여 가속성 성립여부를 판단하였다. 가속성 검증을 위해 Weibull 분포를 사용하였고 형상모수는 같고 척도모수가 다르다면 가속성이 성립한다고 볼 수 있다. 신뢰수준은 90%로 설정하였다.



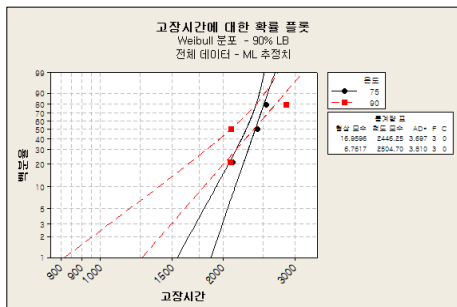
60°C~75°C~90°C에 대한 검증



60°C~75°C에 대한 검증



60°C~90°C에 대한 검증



75°C~90°C에 대한 검증

<그림 5> 70% 고장조건 가속성 검증

<표 3> 가속성 성립 여부

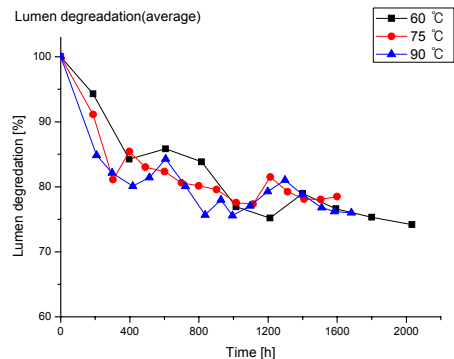
구 분	동일 형상 및 척도모수에 대한 검증	동일 형상 모수에 대한 검증	동일 척도 모수에 대한 검증	가속성 성립여부
기준	$P \leq 0.1$	$P > 0.1$	$P \leq 0.1$	-
60°C~75°C~90°C	0.2	0.275	0.343	미성립
60°C~75°C	0.384	0.927	0.181	미성립
60°C~90°C	0.136	0.171	0.342	미성립
75°C~90°C	0.303	0.165	0.809	미성립

형상모수는 같아야 하므로 신뢰수준 90%에서 p-value가 0.1 이상이여야 하며 4가지 조건에서 이에 성립한다. 이는 조건별로 유사한 형태로 고장이 이루어졌다는 것을 의미한다. 반면 신뢰수준 90%에서 척도모수가 다르다면 척도모수는 p-value가 0.1 이하이어야 하는데 4가지 조건에서 척도모수가 0.1 이상으로 확인되었다. 이는 척도모수가 다르지 않다는 의미이므로 척도모수가 유사할 것이라는 추정을 할 수 있다. 척도모수가 같다는 것의 의미로서 고장시간이 조건별로 크게 다르지 않다는 것을 추정 할 수 있다. 또, 가속성이 성립하려면 형상모수는 같고 척도모수는 달라야 하는데, 척도모수가 같다는 것은 고장시간이 유사하고, 가속성이 성립하지 않는다는 것을 의미하며 이에 따라 온도에 대한 가속성이 성립되지 않음을 알 수 있다. L70고장판정 결과는 <그림 5>와 같으며 이로 분석한 동일 형상모수, 척도모수에 대한 p-value는 < 표 3>과 같다.

4.2 측정 결과의 분석

2000시간 정지 중단한 데이터 분석 결과 <그림 6>과 같이 조건에 관계없이 약 200~300시간 내에 80% 열화수준까지의 급격한 열화를 보이다가 이후 시간에 안정되고 완만히 열화가 나타났다. 이로 인하여 weibull 분포의 척도모수가 조건별로 유사하게 추정되었음을 알 수 있다.

이는 형광체가 온도에 따른 특성의 변화를 보인 뒤 안정되게 되고 그 이후 특성이 유지되는 것으로 추정할 수 있다

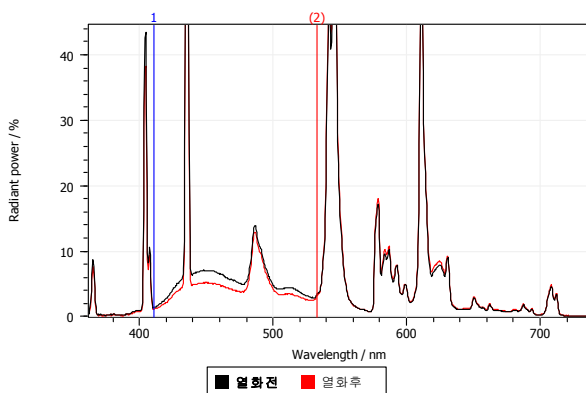


조건별 제품 평균에 대한 광속 열화율

<그림 6> 광속 열화율

### 4.3 스펙트럼 분석

<그림 7>은 열화가 진행된 시료의 스펙트럼을 상대적으로 비교한 값이다. Y축은 최대치를 100으로 둔 값이고 X축은 파장이다. 전체적으로 대부분의 파장 영역에서 일정하게 감소하는 경향을 보여 파장의 분포는 열화전과 열화후가 일치하는 경향을 보였지만 푸른색과 빨간색으로 표시된 '410nm ~ 530 nm' 영역에서 열화가 많이 진행되었다. 60°C, 75°C, 90°C 조건에 관계없이 파장이 열화가 진행된 후의 스펙트럼은 유사한 모습을 보였다. 이는 '410nm ~ 530 nm' 영역에서 사용된 형광체가 특히 많은 열화를 보였다는 것을 의미한다.



<그림 7> 상대 스펙트럼 분석

## 5. 결론

본 논문에서는 실내용 150 W급 무전극램프의 고온신뢰성 특성을 분석하였다. 60°C 75°C 90°C의 층을 두고 약 100~200 시간 간격으로 특성을 관찰하여 수명을 추정하고, 가속성을 검증하였다. 가속성은 보이지 않았으며, 이는 온도에 따른 열화가 아레니우스 모델을 따르면서 열화 되는 것이 아니라는 것으로 확인 되었다. 80%로 열화가 진행되기까지는 300~400시간 내에 온도가 높을수록 빨리 열화가 되었으며 그 이후에는 조건에 관계없이 특성을 유지하는 것으로 나타났다. 전체적으로 열화 후에도 열화전과 유사한 스펙트럼 분포를 보였지만 '410 nm ~ 530 nm' 영역의 단파장 영역에서 더 많은 빛을 잃어 색좌표가 Warm white 쪽으로 이동하는 현상을 발견하였다.

본 연구는 제품 단위로서 고온상태에서의 무전극형광램프의 신뢰성을 평가하고 그 특성을 관찰하였고, 제품 단위의 무전극형광램프의 가속인자로서 고온이 적합하지 않다는 것을 밝혀냈다는 것에 그 의미가 있다.

현재 대부분의 조명제품에 대해서 고온에 대한 신뢰성 시험을 일반적으로 하고 있으나, 무전극 램프의 경우 고온에 따른 가속수명이 적용되지 않기 때문에 다른 관점에서 접근할 필요가 있다. 추후 저온 시험, 진동 시험, 자외선 시험, '410 nm ~ 530 nm'에 해당하는 형광체에 대한 별도의 고온 가속 시험 및 분석 등 다른 환경시험을 시험을 통해 결과를 관찰하여 스펙트럼 분석과 SEM 분석 등의 추가적인 분석이 필요하며, [E방전], 초고주파 방전방식과 같은 다른 방전방식에 대해서도 추가적인 연구가 필요하다.

## 참고문헌

- [1] 정관철 (2005), PLS의 전기자기장해 측정 및 주파수 특성 연구, 인하대학교 대학원 전기공학과 석사학위논문 pp. 4-7.
- [2] 황명근 · 이종찬 · 박대희 (2001), 무전극 램프의 기술동향과 전망, 한국조명-전기설비학회 학술대회 논문집 pp. 23-26.
- [3] Gleason, W. S. and Pertel, R. (1971), High stability Electrodeless Discharge Lamps, *The Review of Scientific Instruments*, Vol. 42, No. 11, pp. 1638-1643.
- [4] Kazantsev, S. and Khutorshchikov, V. I. (1998), *Practical Spectroscopy of High Frequency Discharges*, pp. 11-13.
- [5] Oyamada, H., Takahashi, K., Sato, Y., and Uchida, H. (1974), *A consideration of Rubidium Lamp Stability for Rubidium Frequency Standard*, 28th Annual Symposium on Frequency Control, pp. 340-343.
- [6] Shaffer, J. W. and Godyak, V. A. (1999), The Development of Low frequency, High Output Electrodeless Fluorescent Lamps, *Journal of the Illuminating Engineering Society*, Vol. 28, No. 1, pp. 142-148.
- [7] Wharmby, D. O. (1993), Electrodeless lamps for lighting : a review, *Science, Measurement and Tech*, Vol. 140, No. 6, pp. 465-473.