

## White LED 형광체의 활성화 에너지 정형화

장인혁\* · 김수경\*\* · 한지훈\*\* · 이창훈\*\* · 임홍우\*\*

조선대학교\* · 한국기계전기전자시험연구원\*\*

### Activation energy standardization of White LED Phosphor

In-Hyeok Jang\* · Su-Kyoung Kim\*\* · Ji-Hoon Han\*\* · Chang-Hoon Lee\*\* · Houn-woo Lim\*\*

Chosun University\* · Korea Testing Certification\*\*

#### Abstract

In this paper, we studied the correlation between the activation energy( $E_a$ ) of the raw materials and the structural characteristics of the White LED PKGs. The samples used in the study were composed of low power LED 3type and high power LED 5type. To calculate the activation energy( $E_a$ ) of the White LED PKGs conducted three conditions of high temperature operation test based on the Arrhenius model. The number of samples used in the experiment is 10, respectively. The  $T_j$  of Conditions and target specifics expressed  $T_{j1}$ ,  $T_{j2}$ ,  $T_{j3}$ . The activation energy ( $E_a$ ) of the samples was calculated based on the value of the actually measured lifetime. We investigated the correlation between the activation energy ( $E_a$ ) of the raw materials and the structural characteristics of the White LED PKGs. As a result, White LED PKGs activation energy( $E_a$ ) value was confirmed that the material properties affected more than the structural characteristics of the LED PKGs and we found that activation energy of each LED Model has difference. Normally, The activation energy of phosphor of YAG type was indicated from 0.21 to 0.25[eV] and Silicate type was indicated from 0.12 to 0.16[eV]. According to the results, we confirmed that the activation energy of phosphor of YAG type is higher more than The activation energy of phosphor of Silicate type.

Keywords : Activation energy, Arrhenius model, Silicate, YAG, White LED

## 1. 서론

LED(Light Emitting Diode, 발광다이오드)는 공정기술과 광 기술이 융합된 21세기 새로운 광원으로, 기존 전구의 1/20~1/50 정도의 저전력 소비와 제품 제조에 EU의 RoHS (Restriction of Hazardous Substances)에서 규제하는 6종 물질이 포함되지 않아 에너지 절감 및 환경 친화적 제품의 대표주자라 할 수 있다.(주은철(2011)).

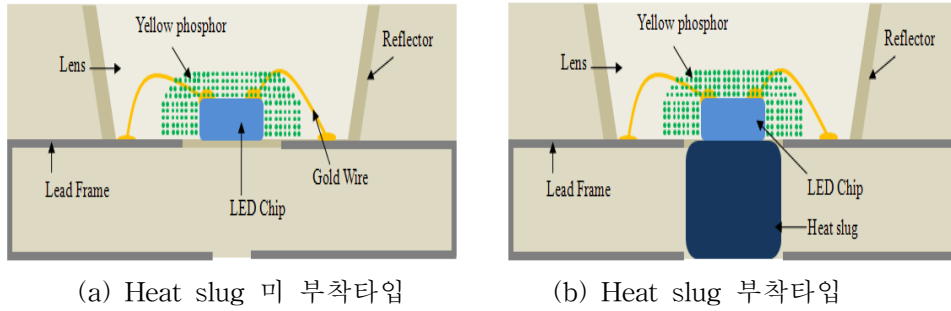
이에 따라 최근 수 년 동안 LED에 대한 연구가 전 세계적으로 진행되어 왔고, 기술적으로 많은 진보가 이루어진 상태이지만 LED의 수명개선을 위하여, LED의 고장모드에 대한 정확한 규명과 가속 수명 시험법등의 핵심요소기술개발이 필요하다.

현재 LED에 대한 가장 큰 이슈는 방열해결에 대한 기술개발이고, 이에 따라 온도와 전류 인자에 대한 연구가 많이 진행 되고 있다. LED는 수명이 온도(열)에 강하게 의존하며 온도가 올라감에 따라 지수 함수적으로 수명이 감소하는 아레니우스 모델을 잘 따르고 있음을 검증해주었다(L. Trevisanello et al.(2009)). 또한 광속 열화의 주원인을 발열에 의한 LED PKG 유기물(충진재 등)의 탄화로 인한 투과율 및 반사율 저하로 규명하였다. 하지만 시험 조건인 주변온도( $T_a$ )230°C 조건은 플라스틱과 실리콘 같은 유기물의 상변화가 일어나는 범위로, 수명 예측의 관점에서는 의미를 찾기 어려운 조건이다. 또한, 온도와 전류 인자에 따른 고장모드 및 수명산출에 대한 연구결과가 발표되었지만(M. Meneghini et al,(2010) J. Liu et al,(2009), Kang(2009) 등, G. Meneghesso et al(2002)), 반도체 칩 중심의 고장모드 분석에 국한을 두었고, 전반적인 LED PKGs의 활성화 에너지( $E_a$ )에 대한 정형화에 대해서는 규명하여주지는 못하였다. 최근 LED의 옥외 사용의 증가에 따라 (C. M. Tan et al.(2009)) 습도를 고려하여 형광체/봉지재 등의 열화 고장모드에 대해 연구보고 되었으나 정작 LED 조명이 옥외 사용시 중요한 PKGs의 원재료와 구조적 특성에 따른 가속수명시험과 고장모드에 대한 연구가 부족하다.

따라서 본 논문에서는 White LED PKGs의 원재료와 구조적 특성에 따른  $E_a$ 의 상관관계에 대하여 연구하였다. 연구에 사용된 대상 시료는 제조사가 다른 저출력급(20~60mA) White LED PKGs 7가지, 고출력급(450~700mA) 3가지 모델을 사용하였다. 시료별  $E_a$  산출을 위하여 아레니우스 모형을 기반으로 세 개 조건의 고온 동작 시험을 진행하였고 각 조건별 대상 시료의 시료 수는 10개씩이며, 조건 및 대상별  $T_j$ 는  $T_{j1}$ ,  $T_{j2}$ ,  $T_{j3}$ 로 표기 하였다. 실측에 따른 수명 값을 바탕으로 대상 시료의  $E_a$ 를 산출하였고, 이 값과 모델별 원재료 및 구조적 특성과의 상관관계를 조사하여 활성화 에너지의 재료별 특성 영향에 대한 정형화에 대하여 분석 하였다. 연구 결과 White LED PKGs의  $E_a$  값을 결정하는 요인으로는 LED PKGs의 구조적인 특성보다는 재료적인 특성이 더 영향을 미침을 확인 할 수 있었고 재료적 특성중 형광체의 종류에 따라 YAG 계열의 경우 활성화 에너지는 0.21 ~ 0.25[eV]로 Silicate 계열의 0.12 ~ 0.16 [eV]보다 다소 높은 경향을 확인할 수 있었다.

## 2. 시험 설계

### 2.1 대상 모델 선정



<그림 1> 일반적인 White LED PKGs 단면도

White LED PKGs는 일반적으로 <그림 1>과 같은 구조를 갖는다. 본 연구에서는 White LED PKGs의 원재료와 구조별 특성에 대한  $E_a$ 의 상관관계를 조사하기 위하여 제조사가 다른 저출력급 7가지, 고출력급 3가지 모델을 <표 1>과 같이 선정하였다.

<표 1> 본 연구에 사용된 대상 시료

구분	제조사	모델	구동 전류 [mA]	패키지 사이즈 [mm]	Heat Slug	열 저항 [K/W]	형광체	봉지재
저출력	L	A	60	3.5(L)×2.8(W)×1.8(T)	×	45	YAG	Silicone
	N	B	30	3.2(L)×2.8(W)×1.9(T)	○	15	YAG	Silicone
	A	C	60	5.4(L)×5(W)×1.05(T)	○	15	Silicate	Silicone
	A	D	20	3.0(L)×2.0(L)×0.9(T)	○	32	Silicate	Silicone
	I	E	60	5.4(L)×5.0(W)×0.9(T)	×	23	Silicate	Silicone
	I	F	60	3.5(L)×2.8(L)×1.0(T)	×	46	Silicate	Silicone
	S	G	60	3.2(L)×2.8(L)×1.9(T)	×	45	Silicate	Silicone
고출력	N	H	700	6.5(L)×4.3(W)×1.35(T)	○	16	YAG	Silicone
	E	I	350	8.0(Φ)×5.1(T)	○	12	YAG	Silicone
	S	J	700	8.0(Φ)×5.1(T)	○	15	Silicate	Silicone

본 연구에 사용된 White LED PKGs는 저출력(1W 미만)과 고출력(1W 이상)으로 구분 짓고 구조적 특성의 주요 인자가 되는 사이즈, 히트 슬러그의 유무, 열저항값을 조사하였고, 이와 더불어 원재료의 분류는 White LED PKGs의 열화에 밀접한 영향을 주는 형광체와 봉지재를 종류별로 분류 하였다.

## 2.2 시험 환경 설계

본 연구의 주목적인 White LED PKGs의  $E_a$  는 아래의 식(1) ~ (4)에서 보여주는 바와 같이 일반적으로 LED의 수명예측에 사용되는 아레니우스 모형을 활용하여 역산하였다.

$$K = A \exp[-E_a/(kT)] \quad (1)$$

$$t \propto \frac{1}{K} = \frac{1}{A} \exp[E_a/(kT)] = A' \exp[E_a/(kT)] \quad (2)$$

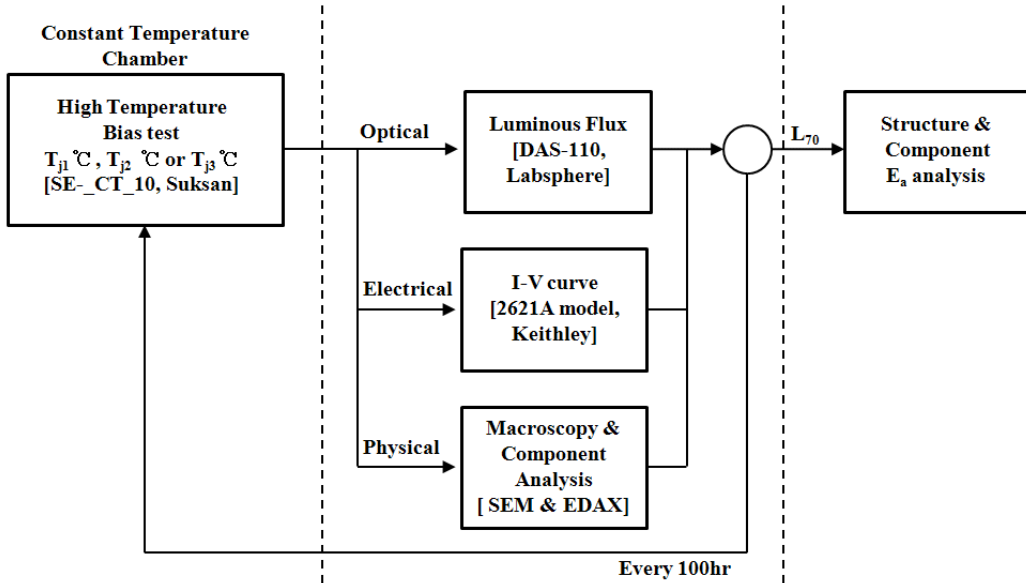
$$\ln(t) = \ln\left(\frac{1}{A}\right) + \frac{E_a}{kT} \quad (3)$$

$$AF = \frac{t_1}{t_2} = \exp\left[\left(\frac{E_a}{k}\right) \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right] \quad (4)$$

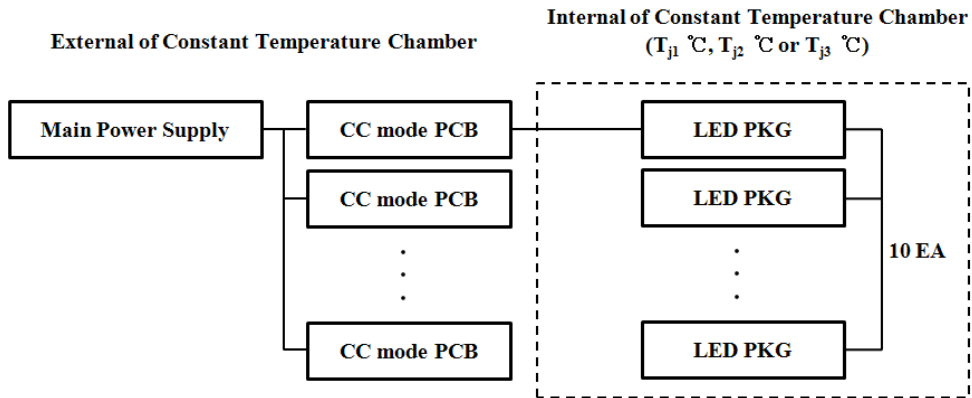
$$E_a = \frac{1}{\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)} \cdot k \cdot \ln(AF) \quad (5)$$

이때의  $K$ 는 화학반응속도,  $E_a$ 는 활성화 에너지,  $T$ 는 절대온도,  $k$ 는 볼츠만상수( $8.617 \times 10^{-5}$  eV/K)를 나타낸다. 식(3)의 수명 식을 일차 방정식으로 치환하면 결국 LED의 수명은 상수  $\ln(1/A)$ 와 절대온도  $T$  그리고 활성화 에너지  $E_a$ 의 값에 의해 결정되어짐을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 LED의 수명을 결정짓는 두 개의 미지수를 구하기 위하여 <그림 2>와 같이 세 개 조건의 온도 동작 시험을 설계하였다. 이때 사용된 조건별  $T_j$ 는 고온환경/ 정격 전류 조건 동작 시 열적 포화 상태를 확인하기 위하여 Cathode( $T_c$ )의 온도를 측정하였고, 측정한  $T_c$ 의 온도, 초기시료의 열저항 값을 식(6)에 대입하여 정선온도( $T_j$ )를 구한 결과를 통하여 고온 환경에서 본 PKG의  $T_j$ 를 선정하였다. 이때 사용된 조건별  $T_j$ 는 실제 조명용 등기구 에 사용되는 LED의 동작 온도조건과 유사한 조건 및 조금 더 강한 조건이되, 동작 한계조건을 넘지 않는 범위에서  $T_{j1}$ ,  $T_{j2}$ ,  $T_{j3}$ 로 선정하였다. 대상 시료들은 매 100시간 마다 광학적, 전기적 특성 측정을 진행하였다. 그리고 온도외의 변수를 최소화하기 위하여 모든 시료들은 <그림 3>에서 보여주는 바와 같이 개별 정전류 보드를 통해 전원을 공급 받도록 설계 하였으며, LED PKGs의 고장 수명 기준인  $L_{70}$  이후의 시료들을 대상으로 구조 및 원재료 에 따른  $E_a$ 의 상관관계를 조사하였다.

$$T_j = T_c + P \cdot R_{th} \quad (6)$$



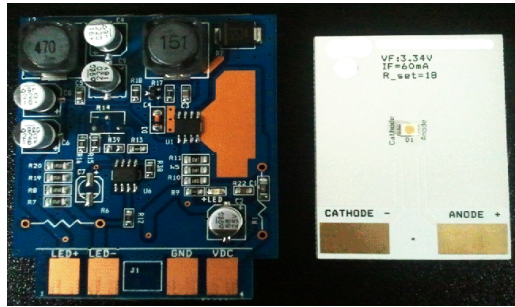
<그림 2> White LED PKGs의  $E_a$  분석을 위한 시험 설계 블록도



<그림 3> 대상시료 전원 공급 설계 블록도

### 3. 구현 및 시험

본 연구에 사용된 White LED PKGs들은 장시간 시험에 따른 반복 측정 오차를 줄이고 재현성을 높이기 위하여 <그림 4>와 같이 동작시 발열이 낮은 저출력급 LED PKGs는 FR4 PCB, 동작시 발열이 높은 고출력 LED PKGs는 Metal PCB에 실장하여 자동화 광속 측정 시스템을 통해 광학적 특성을 조사하였고, 전원에 의한 타 시료의 간섭을 최소화하기 위하여 개별 정전류 보드를 제작하여 실험을 진행하였다.

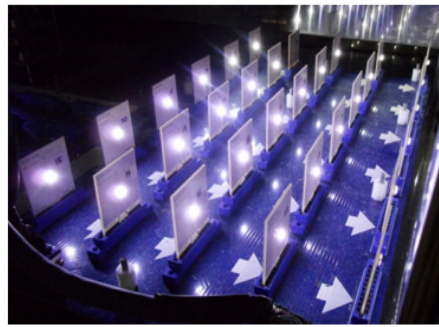


<그림 4> 개별 정전류 보드 제작

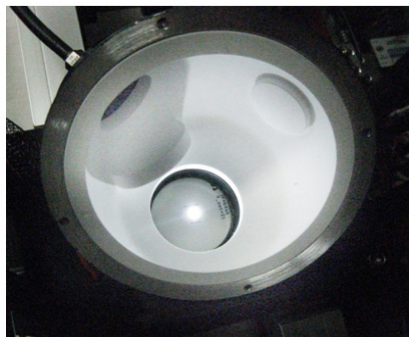
안정적인  $T_{ambient}$  환경을 위하여 세 개의 항온조(SE-CT-10, Suksan)를 사용하여  $T_{j1}$ ,  $T_{j2}$ ,  $T_{j3}$  (25°C, 70°C, 90°C)로 세팅하였다. 그리고 <그림 5>에서 보여주는 바와 같이 LED 발광부는 항온조 내부에 전원공급부는 항온조 외부에 설치하여 시험을 진행하였고, 각 환경조건별 시료 수는 모델당 10개씩 <표 2>와 같이 선정하였다. 대상제품의 광속특성 측정 및  $L_{70}$  데이터를 조사하기 위하여 매 100시간 마다 DAS-110, Labsphere 장비를 활용하여 광속을 측정하였고 자체 제작한 2621A model, Keithley 제품이 장착된 I-V 트레이서를 사용하여 전기적 특성을 모니터링 하였다.



(a) 전원 공급 사진



(b)LED 동작시험 전경



(c) 자동 광속 측정 시스템 사진

<그림 5> 시험 전경 사진

<표 2> 시험조건 및 대상별  $T_j$ 와 시료 수

제조사 / 모델	$T_{j1}(\text{°C}) /$ 샘플수(개)	$T_{j2}(\text{°C}) /$ 샘플수(개)	$T_{j3}(\text{°C}) /$ 샘플수(개)
A	55 / 10	96 / 10	113 / 10
B	36 / 10	75 / 10	97 / 10
C	37 / 10	76 / 10	98 / 10
D	33 / 10	72 / 10	96 / 10
E	39 / 10	84 / 10	104 / 10
F	51 / 10	97 / 10	116 / 10
G	52 / 10	103 / 10	119 / 10
H	61 / 10	109 / 10	126 / 10
I	44 / 10	88 / 10	105 / 10
J	75 / 10	119 / 10	134 / 10

#### 4. 시험 결과

대상제품들을  $T_{j1}$ ,  $T_{j2}$ ,  $T_{j3}$  °C로 셋팅하여 100시간 간격으로 광속특성을 측정하여  $L_{70}$ 을 기준으로 대표 수명값을 본 연구원내에서 제작한 프로그램 툴을 이용하여 <표 3>과 <표 4>와 같이 나타내었다. White LED PKGs의  $E_a$  산출은 LED의 수명예측에 가장 적합한 온도와 수명간의 함수인 아레니우스 모형에 따라 진행하였다. 그 결과 얻어진  $E_a$ 와 모델별 원재료 및 구조적 특성과의 상관관계를 조사해 보았을 때, LED의 구조적인 특성보다는 재료적 특성에 따라  $E_a$ 의 그룹이 나뉘짐을 확인할 수 있었다. 시험에 사용된 대상 모델에 한해서 일반적으로 YAG 계열의 형광체를 사용한 White LED PKGs의  $E_a$  값은 약 0.21~0.25 [eV]를 나타내는 반면, Silicate 계열의 형광체를 사용한 White LED PKGs의  $E_a$  값은 약 0.12~0.167 [eV]가량으로 YAG 계열에 비해 다소 낮은 값을 나타내는 것을 <표 5>를 통해 확인 할 수 있었다.

<표 3> 저출력 LED모델의  $T_j$  구간별 평균수명

Company	Model	Average Life Estimation Time		
		$t_1(\text{hr}) / T_{j1}(\text{°C})$	$t_2(\text{hr}) / T_{j2}(\text{°C})$	$t_3(\text{hr}) / T_{j3}(\text{°C})$
1	A	5243 / 55	1876 / 96	439 / 113
2	B	6924 / 36	6912 / 75	4392 / 97
3	C	10034 / 37	5864 / 76	5562 / 98
4	D	9592 / 33	4840 / 72	3337 / 96
5	E	20215 / 39	9048 / 84	5276 / 104
6	F	13279 / 51	8029 / 97	4724 / 116
7	G	6672 / 52	3524 / 103	1344 / 119

<표 4> 고출력 LED모델의  $T_j$  구간별 평균수명

Company	Model	Average Life Estimation Time		
		$t_1(\text{hr}) / T_{j1}(\text{°C})$	$t_2(\text{hr}) / T_{j2}(\text{°C})$	$t_3(\text{hr}) / T_{j3}(\text{°C})$
1	H	5014 / 61	5264 / 109	4087 / 126
2	I	4743 / 44	1632 / 88	1330 / 105
3	J	8227 / 75	5124 / 119	3427 / 134

<표 5> 각각의 대상모델의 조건별 광속 열화 특성 및  $E_a$

모델	조건별 광속 열화 특성	조건별 $\ln(t)$ Vs $1/T$	$T_j$	$E_a$
A			25~70	0.2504
B			70~90	0.2323
C			25~70	0.1218
D			25~90	0.1556
E			25~70	0.1660



모델	조건별 광속 열화 특성	조건별 $\ln(t)$ Vs $1/T$	$T_j$	$E_a$
F			25-90	0.1367
G			25-90	0.1672
H			70-90	0.2279
I			25-90	0.2167
J			25-90	0.1644

## 5. 결론

본 논문에서는 White LED PKGs의 원재료와 구조적 특성에 따른 활성화 에너지( $E_a$ )의 상관관계에 대하여 연구하였고 연구에 사용된 대상 시료는 제조사가 다른 저출력급 White LED PKGs 7가지, 고출력급 3가지 모델을 사용하였다. 시료별  $E_a$  산출을 위하여 아레니우스 모형을 기반으로 세 개 조건의 고온 동작 시험을 진행하였고, 안정적인  $T_{ambient}$  환경을 위하여 세 개의 항온조(SE-CT-10, Suksan)를 사용하여  $T_{j1}$ ,  $T_{j2}$ ,  $T_{j3}$  °C로 셋팅하였다. LED 발광부는 항온조 내부에 전원공급부는 항온조 외부에 설치하여 시험을 진행하였고, 각 환경 조건별 시료 수는 모델당 10개씩 선정하였다. 대상제품의 광속특성 측정 및  $L_{70}$  데이터를 조사하기 위하여 매 100시간 마다 DAS-110, Labsphere 장비를 활용하여 광속을 측정하였고 자체 제작한 2621A model, Keithley 제품이 장착된 I-V 트레이서를 사용하여 전기적 특성을 모니터링 하였으며, 실험을 통하여 수명값을 산출하였다. 그 결과 얻어진  $E_a$ 와 모델별 원재료 및 구조적 특성과의 상관관계를 조사해 보았을 때, LED의 구조적인 특성보다는 재료적 특성에 따라  $E_a$ 의 그룹이 나뉘짐을 확인할 수 있었다.

시험에 사용된 대상 모델에 한해서 일반적으로 YAG 계열의 형광체를 사용한 White LED PKGs의  $E_a$  값은 약 0.21~0.25[eV]를 나타내는 반면, Silicate 계열의 형광체를 사용한 White LED PKGs의  $E_a$ 값은 약 0.12~0.167 [eV]가량으로 YAG 계열에 비해 다소 낮은 값을 나타내는 것을 <표 5>를 통해 확인할 수 있었다.

본 논문의 연구 결과 White LED PKGs의  $E_a$  값을 결정하는 요인으로는 LED PKGs의 구조적인 특성보다는 재료적인 특성이 더 영향을 미침을 확인할 수 있었고 재료적 특성중 형광체의 종류에 따라 YAG 계열의 경우 0.21~0.25 [eV]로 Silicate 계열의 0.12~0.16[eV]보다 다소 높은 경향을 확인할 수 있었고, 향후 각 계열별 형광체 열화의 검증시험을 통하여 본 논문에서 도출한 결과의 정확도를 높일 계획이다.

## 참고문헌

- [1] 주은철(2011). LED/OLED 최신 산업동향 및 혁신기술 동향분석, BIR.
- [2] L. Trevisanello, M. Meneghini, G. Mura, M. Vanzi, Maura Pavesi, G. Meneghesso, and E. Zanoni(2008), "Accelerated Life Test of High Brightness Light Emitting Diodes," IEEE TRANSACTIONS ON DEVICE AND MATERIALS RELIABILITY., vol. 8, NO. 2.
- [3] M. Meneghini, A. Tazzoli, G. Mura, G. Meneghesso, E. Zanoni, , "A Review on the Physocal Mechanisms That Limit the Reliability if GaN-Based LEDs(2010), " IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES., vol. 57, NO. 1.
- [4] J. Liu, W. S. Tam, H. Wong, and V. Filip(2009), "Temperature-dependent light-emitting characteristics of InGaN/GaN diodes," Microelectronics Reliability., 49,

pp. 38-41.

- [5] J. M. Kang, J. W. Kim, J. H. Choi, D. H. Kim, and H. K. Kwon(2009), "Life-time estimation of high-power blue light-emitting diode chips," *Microelectronics Reliability.*, 49, pp. 1231-1235.
- [6] G. Meneghesso, S. Levada, R. Pierobon, F. Rampazzo, E. Zanoni, A. Cavallini, A. Castaldini, and I. Eliashevich(2002), "Degradation Mechanisms of GaN-Based LEDs after Accelerated DC Current Aging," *Technical Digest-International Electron Devices Meeting*, pp. 103-106.
- [7] C. M. Tan, B. K. E. Chen, G. Xu, and Y. Liu(2009), "Analysis of humidity effects on the degradation of high-power white LEDs," *Microelectronics Reliability*, 49(9-11), pp. 1226-1230.