

고출력 형광체변환 백색 LED 패키지의 가속시험

천성일*·윤양기**·장중순***

전자부품연구원 신뢰성물리연구센터*·한국기계전기전자시험연구원**·아주대학교 산업공학과***

Acceleration Test for Package of High Power Phosphor Converted White Light Emitting Diodes

SungIl Chan*·YangGi Yu**·JoongSoon Jang***

Reliability Physics Research Center, Korea Electronic Technology Institute*

Reliability Center, Korea Testing Certification**

Division of Industrial and Information System Engineering, Ajou University***

Abstract

This study deals with the accelerated life test of high power phosphor converted white Light Emitting Diodes (High power LEDs). Samples were aged at 110 °C/85% RH and 130°C/85% RH up to 900 hours under non-biased condition. The stress induced a luminous flux decay on LEDs in all the conditions. Aged devices exhibited modification of package silicon color from white to yellowish brown. The instability of the package contributes to the overall degradation of optical lens and structural degradations such as generating bubbles. The degradation mechanisms of lumen decay and reduction of spectrum intensity were ascribed to hygro-mechanical stress which results in package instabilities.

Keywords : Accelerated Test, LED, failure mechanism, discoloration

1. 서론

최근 고효율 백색 LED(이하, 고효율 LED)는 150 lm/W 이상의 에너지 효율향상과 높은 신뢰성, 장수명 등으로 차세대 광원으로 각광받고 있다 Dupuis and Krames(2008). 따라서 고효율(구동전류 350 mA 이상) LED의 응용은 실내조명으로 부터 옥외 가로등, 자동차 및 해양, 심해(undersea) 조명 등으로 확장되고 있으며 고효율 LED의 시스템 응용을 위해서서 사용 환경에 적합한 패키지의 신뢰성 시험이 요구되고 있다 Hardy et al(2008). 일례로 홍콩에서 사용되는 도로조명(road lighting system)은 여름철 폭풍우 등과 같은 환경에서 견딜 수 있는 높은 신뢰성이 요구된다 Hui et al(2010).

현재 활용이 높은 고효율 LED 백색 구현은 형광체변환(phosphor converted) 패키징 방법으로 GaN 칩에서 발광되는 청색과 형광체(phosphor)에 의해 변환된 노랑색을 혼합하여 백색을 구현한다 Hsu et al(2008). LED 패키지의 기능은 사용 환경으로부터 LED 칩을 보호하고, 칩에서 발생하는 열을 밖으로 방출하는 역할을 수행한다. 특히 빛의 추출(extraction)은 고효율 LED의 중요한 기능이다 Liu et al(2009). 따라서 고효율 LED의 시스템 응용을 위해서 사용 환경에 적합한 신뢰성시험이 요구된다.

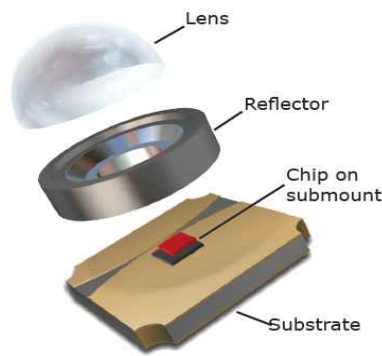
LED의 동작수명에 대한 정의는 반도체조명시스템 기술연합(ASSIST)에서 일반조명과 장식조명으로 구분하여 권고하고 있다. 일반조명은 광속(luminous flux)이 초기치보다 30% 감소 시점을 수명이 다한 것으로 정의하며 L70% 으로 표현한다. 그리고 장식조명은 초기치 대비 50%가 저하되는 시간을 고장으로 판정한다 [6]. LED 제조사에서의 LED 동작수명은 일반조명의 수명기준을 적용하고 있으며 50,000 시간 이상을 보증한다 Calleja et al(2007).

LED의 장 수명과 신뢰성에 대한 물리적 한계는 LED 칩 보다 패키지의 열화 및 고장에 의한 영향이 크다는 것은 Meneghini et al(2010), Trevisanello et al(2009), Kang et al(2009) 등에 의해 연구되었으며 LED 목표수명을 만족하지 못하는 주요 장애요인은 패키지의 열화와 고장이다. 그러나 현재까지 고효율 LED의 신뢰성과 가속수명시험(accelerated life test, ALT)에 대한 연구는 LED 칩 위주의 평가로 패키지 고장 메커니즘기반 신뢰성시험과 가속수명시험에 대한 연구가 많이 진행되지 않고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 고효율 LED 패키지의 고장 메커니즘에 기초한 가속시험을 진행하였다. 가속시험은 습기에 의한 패키지의 고장 메커니즘 규명을 위해 기존 반도체 산업에서 활용 중인 JESD22-A118의 고온-고습(110 °C - 85 %, R.H. 130 °C - 85 % RH)시험을 실시하였다 [11]. 본 시험의 장점은 시험조의 습기를 가속시켜 패키지 내부에 침투하는 시험으로 패키지 신뢰성 평가시간을 단축할 수 있는 시험방법이다. 또한 기존의 가속수명시험과의 고장 메커니즘에 대한 검증(validation) 검토를 위해 LED의 성능검토와 패키지 물성분석을 위해 광학현미경과 적외선분광기(Infrared Spectrometer)등을 이용하여 패키지 열화에 대한 분석을 실시하였다. 본 논문의 구성은 2절에서 시험시료에 대한 정보와 시험절차에 관하여 기술한다. 3절에서는 시험 후의 LED 광 특성 및 전기적 특성 시험결과와 패키지 열화에 대해 정리하였다. 이러한 시험결과를 바탕으로 4절에서는 패키지 고장 메커니즘기반의 가속시험 방법에 대하여 제안하고자 한다.

2. 실험방법

고출력 LED 패키지 가속 열화특성 해석을 위한 가속수명시험에 인가전력 1W급 백색 LED를 사용하였다. 고출력 LED의 구조는 <그림 1>과 같이 LED 칩(chip), 기판(substrate), 고분자 봉지재(encapsulating material), 반사판(reflector) 그리고 플라스틱 렌즈(lens)로 구성되어 있다. 특별히 렌즈장착을 위하여 금속 링(metal ring)을 사용하고 있으며 LED 칩 위에 용매증착(solvent evaporating) 방법을 사용한 형광체가 코팅되어 있다 Liu et al(2009).



<그림 1> 고출력 백색 LED 구조[12]

고출력 백색 LED의 동작수명은 p-n 정선온도 135 ℃이하의 조건에서 50,000시간 이상을 보증하고 있다. 또한 LED 칩 최대 정선온도는 150 ℃이며, 접합에서 솔더 점(solder point)까지의 열 저항(thermal resistance)은 8 ℃/W이다 [12].

전원을 인가하지 않는 가속 습기 내구성시험(accelerated moisture resistance-non-biased HAST, non-biased HAST)은 높은 온도와 고습 시험 조건을 사용하여 밀봉(hermetic)되지 않은 패키지 신뢰성평가에 사용된다. 극한 조건에서 습기는 패키지 자체의 흡습과 리드와 패키지의 사이에 습기침투가 가속되어 금속재료의 부식(corrosion)과 이온 오염(ionic contamination) 등의 원인이 될 수 있다. 이 시험의 장점은 습기에 의한 패키지 고장을 가속시켜 패키지의 평가시간을 단축할 수 있다.

non-biased HAST 시험조건은 <표 1>와 같이 JESD22-A118(2000)에서 권고하는 110 ℃ - 85% RH 조건과 130 ℃-85% RH 조건으로 구분하여 시험시료 모두 고장발생까지 시험하였다. 시험은 가속 반복측정 열화시험(accelerated repeated measure degradation test)으로 진행하였으며 100시간 간격으로 고출력 LED의 성능을 측정하였다. 측정결과에 대한 정확성을 위하여 시험조에서 반출 후 24시간 이내 측정하였다. 고장에 대한 판단기준은 반도체조명 위원회(ASSIST)에서 권고하는 LED 조명 사용기준을 적용하여 초기 광속(luminance flux)의 70% 이하를 고장으로 판단하였다 [6].

광 특성과 전기적 특성측정에 대한 측정 각각 LED 측정시스템(광전자정밀(주))와 반도체 특성측정시스템(Keithley 4200)을 사용하였다.

<표 1> 가속시험조건과 고장기준

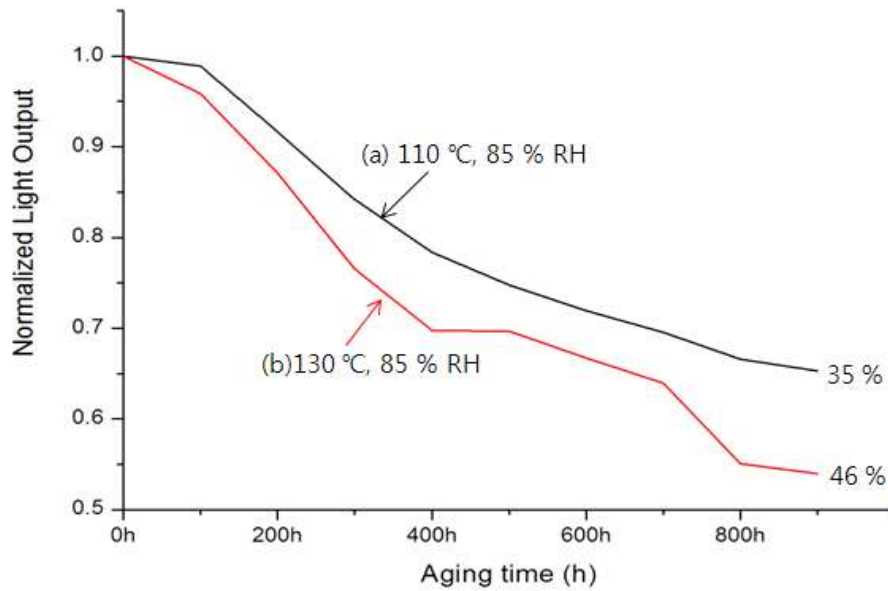
구분	시험조건		고장기준
시료 수(개)	10	10	초기광속의 30% 감소 (L70%)
온도(℃)	110 ± 2	130 ± 2	
습도(%)	85 ± 5	85 ± 5	
전류(mA)	-	-	
수증기압(atm)	1.2	2.3	
시험시간(h)	시험시료 고장시간 까지		

3. 결과 및 고찰

이 절에서는 non-biased HAST 시험에 대한 광학 및 전기적 특성 등에 대한 결과를 정리하고 분석하였다. 또한 광학현미경과 이차전자주사현미경 등을 사용한 패키지의 열화에 대한 내용을 정리 하였다.

3.1 광속 열화

non-biased HAST 시험에 의한 광속의 감소는 <그림 3>과 같이 매우 빠르게 열화 되었다. 광속에 대한 측정은 350 mA 고정전류를 인가하였으며 초기 측정값과 시험 후의 광속의 비율로 표현하였다. 25 ℃, 50% RH 시험조건에서 2,900시간까지 0.7% 광속변화가 발생하여 정상 조건에서의 거의 변화하지 않았다. 그리고 패키지의 외관 검사결과 렌즈 등과 같은 패키지 외관의 변화는 발생하지 않았다. 시험조건 110 ℃, 85% RH는 700시간 후 평균 광속의 감소가 30% 발생하였으며 900시간 후 35%의 감소를 확인할 수 있었다. 130 ℃ 85% RH에서는 시험 후 400시간 후 30%의 평균 광속열화를 확인 할 수 있었다. 가속수명시험 후 가속시험조건 모두에서 패키지의 황갈색(yellowish brown)이 발생하였다.



<그림 2> 시험조건별 광속의 열화 : (a) 110 °C, 85 % RH에서의 수명열화와 (b) 130 °C, 85 % RH에서의 수명열화

Barton and Osinski(1998)의 연구결과 의하면 백색 LED의 고장 메커니즘은 칩 발광파장과 열에 의한 패키지 열화이다. Narendran et al(2004)은 광 출력의 빠른 열화 메커니즘으로 p-n 정션(junction)의 열과 짧은 파장(short wave)의 발광에 의한 봉지재(encapsulating material)의 황변(yellowing)으로 규정하였다. Yang et al(2010)의 고온/전류(85 °C/0.7 A) 시험에서는 누설전류(leakage current) 증가와 렌즈의 황변 그리고 크랙(crack)이 발생을 확인하였다. 고온에서의 장시간(80 °C, 6000 h) 스트레스에서의 플라스틱 렌즈열화와 LED 칩 정션 열에 의한 LED 칩 접합재료의 열화에 대한 내용은 Hsu et al(2008)이 보고 하였다.

Tan et al(2009)은 고온, 고습(85 °C, 85 % RH 515 h)동작 시험결과 습기 가속에 의한 LED 칩 고장과 형광체 열화를 볼 수 있었다. 고장분석 결과 패키지로 흡습된 수분의 기화(vaporize) 스트레스 누적에 의한 칩 가장자리의 크랙을 확인 하였다. 또한 형광체 열화 및 용해(dissolution)에 의한 광 출력의 감소를 볼 수 있었다. Luo et al(2010)은 고온 침수시험에 대한 연구에서 습기의 패키지 내습에 의한 광 출력의 감소와 패키지 기포(bubble)를 볼 수 있었다. 패키지 열화에 의한 광속의 감소에 대한 보다 자세한 고장해석은 3.4 패키지 재료의 열화에서 나타내었다.

3.2 스펙트럼 강도 열화

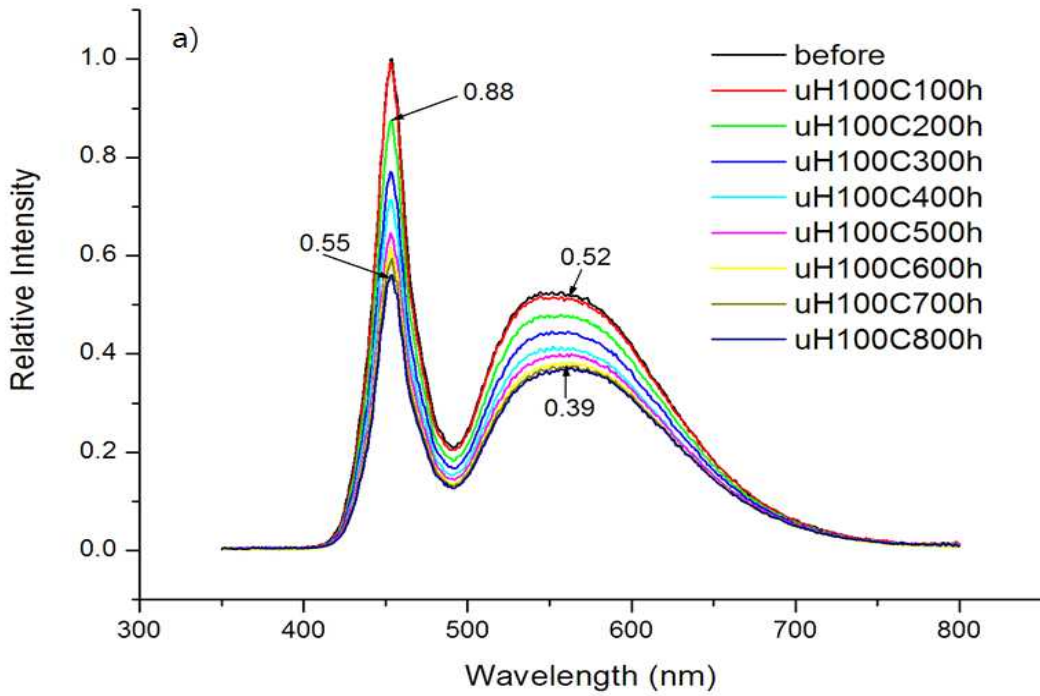
일반적인 고효율 백색 LED 제조방법은 청색 단일 칩 위에 형광물질을 도포하여 백색의 발광 빛을 얻는 방법이다. 형광 물질은 외부로부터 에너지를 흡수하여 고유의 가시광선을 발생하는 물질로 합성된 발광 물질로써, 모재와 그 안에 혼입된 활성제로 구성되어 있으며, 활성제가 발광과정에 관여하는 에너지 준위들을 결정하여 서로 다른 빛을 방출 하게 한다MKE(2008).

LED 칩의 중심 파장은 455 nm이며 청색의 빛을 변환하는 형광체의 노랑파장 500 - 700 nm 이다. Trevisanello et al(2008)의 연구에 의하면 광 출력의 주요한 열화는 청색 발광효율의 감소보다 청색 빛이 노랑 빛으로의 변환 효율이 떨어지는 것이다. 형광체 변환효율의 감소 원인은 형광체 효율의 열화, 렌즈의 변색 그리고 패키지의 열화 등에 의해 발생한다. Tsai et al(2009)의 시험에서 형광체변환 백색 LED 발광 스펙트럼의 열화 원인은 고온에서의 높은 농도의 형광체이다. 고온 스트레스에서 봉지재인 실리콘의 열화가 발생하지만 실리콘의 두께가 아주 두껍지 않으면 그 영향이 크지 않다.

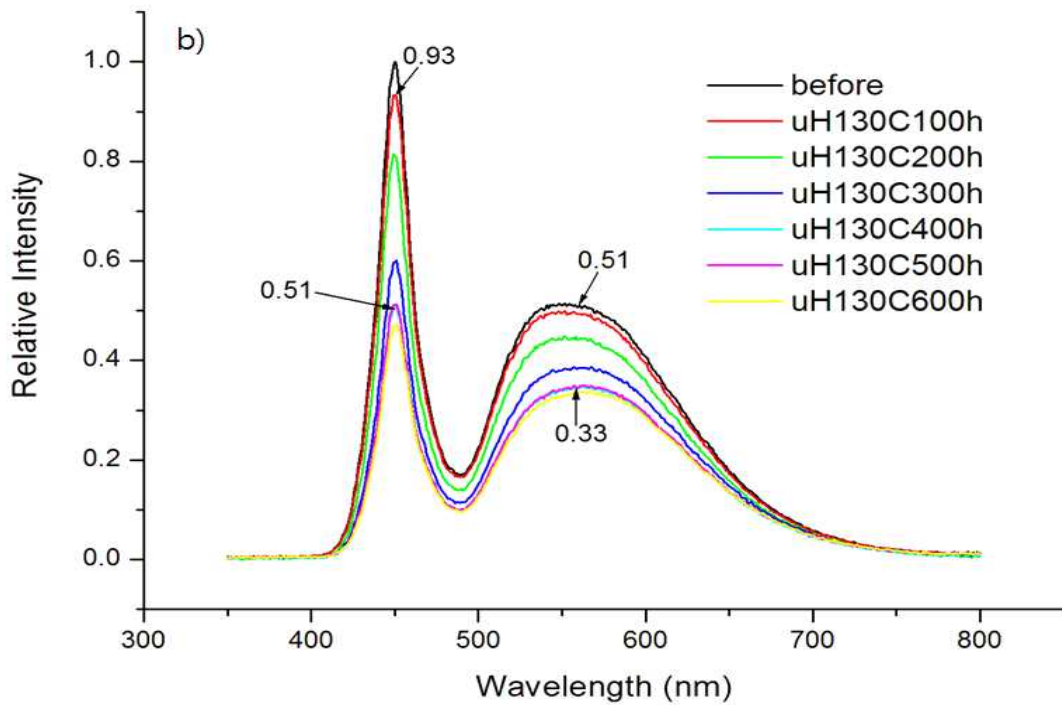
<표 2>는 가속수명시험 시간대별 고휘력 LED의 스펙트럼 강도변화를 측정된 결과이다. 100 °C, 85% RH 시험에서 800시간 시험 후 모든 시험시료의 고장이 발생하였으며 청색 파장과 노랑색 파장의 최고치의 감소가 각각 48%, 33% 발생하였다. 130 °C 85% RH 시험 결과 400시간 진행 후 청색파장 최고치는 51%, 노랑 파장의 최고치는 29% 떨어졌다. 그리고 이 시점에서 시험시료의 60%가 고장 발생되었다. <그림 3>, <그림 4>는 시험조건별 시험 시간에 따른 스펙트럼의 세기변화를 나타내고 있다. Meneghini et al(2007)의 연구결과 광속의 손실(loss)는 형광체파장변환 노랑파장의 감소와 강한 상관관계를 갖는다. Tan et al(2009)의 실험결과 청색파장의 감소가 형광체변환 파장의 손실보다 큰 경우 LED 칩 관련 고장으로 확인되었다. 따라서 non-biased HAST 시험이 형광체와 LED 칩의 열화에 영향을 미친 것으로 추론된다. LED 칩 열화에 의한 스펙트럼의 변화에 대한 보다 자세한 내용은 3.3 고 출력 LED의 I-V 특성변화에서 설명하였다.

<표 2> 가속수명시험 시간별 최대파장의 감소율

시험조건	중심 파장	100 h	200 h	300 h	400 h	500 h	600 h	700 h	800 h
110 °C 85% RH	455 nm	0.00	0.12	0.23	0.29	0.37	0.40	0.43	0.48
	560 nm	0.01	0.08	0.15	0.21	0.25	0.27	0.30	0.33
130 °C 85% RH	455 nm	0.11	0.24	0.44	0.51	0.55	0.57	-	-
	560 nm	0.04	0.12	0.22	0.29	0.29	0.32	-	-



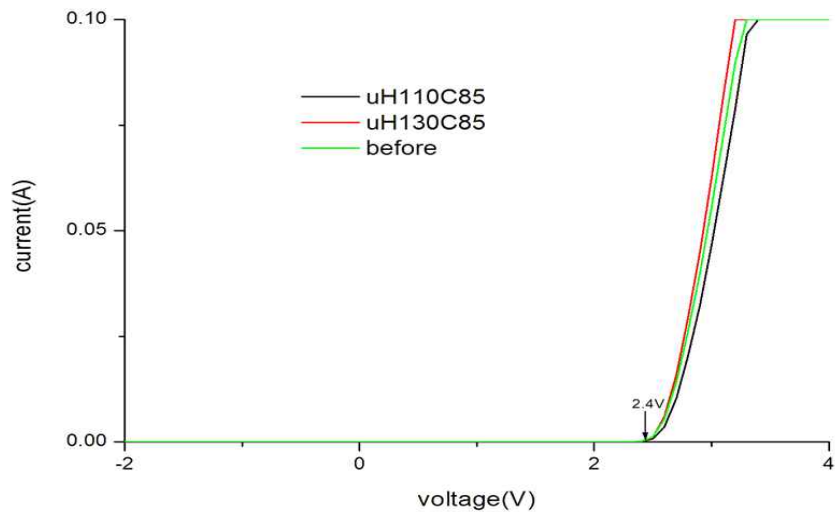
<그림 3> 110 °C, 85% RH 가속시험 중의 스펙트럼 세기변화



<그림 4> 130 °C 85% RH 가속시험 중의 스펙트럼 세기변화

3.3 고출력 LED의 I-V 특성변화

LED의 다이오드 특성곡선(이하 I-V 특성)의 변화는 LED 칩의 열화를 의미한다 Nogueira et al(2009). 누설전류(leakage current)의 증가는 다중 양자우물(multi-quantum well, MQW)의 터널링(tunnelling) 전류로 판단할 수 있다. 이러한 현상은 LED 칩 내부의 전위(dislocation) 등과 같은 결함에 의해 발생한다 Yang et al(2010). I-V 특성변화에 대한 연구결과로 Buso et al[24]의 전류가속시험에서 등가직렬저항(equivalent series resistance)의 감소를 확인하였다. 그리고 Meneghini et al(2009)의 고온저장(200 °C, 100 h)시험에서 저항의 증가를 관찰할 수 있었다. 저항 증가의 원인으로 LED 칩 또는 리드 와이어의 접촉특성 열화에 의해 발생되는 것으로 확인 할 수 있었다. <그림 5>은 non-biased HAST시험 후의 I-V 특성을 나타내고 있다. 광속의 높은 감소가 발생하였는데도 불구하고 가속수명시험 후 동작전압의 변화가 없는 것은 LED 칩의 안정적 특성으로 확인할 수 있다. 또한 non-biased HAST 시험 스트레스가 LED 칩에 영향을 주지 못한 것으로 추정된다.



<그림 5> 110 °C, 85 % RH와 130 °C, 85 % RH 가속시험 후 I-V 특성변화 그래프

3.4 패키지 재료의 열화

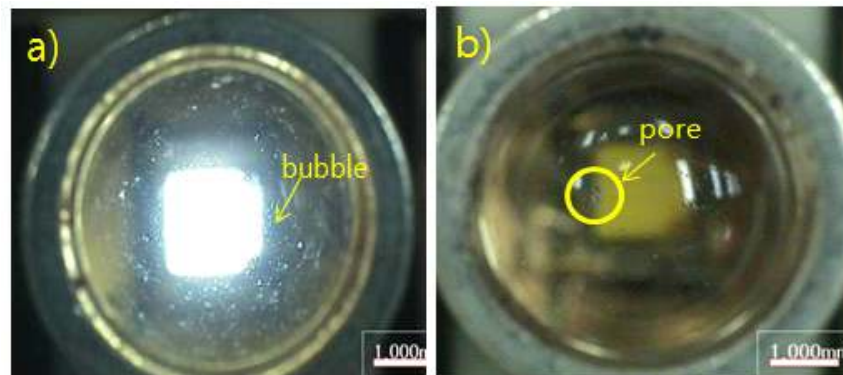
광 출력 감소는 LED 칩의 열화와 패키지의 열화에 의해 발생한다. 3.3 고출력 LED의 I-V 특성검토 결과 LED 칩의 열화는 발생하지 않은 것으로 판단된다.

LED의 광 출력 특성과 신뢰성은 LED 칩의 성능에 많이 의존되지만 형광체, 봉지재 그리고 반사판 등과 같은 패키지의 요소 또한 고 신뢰성의 중요한 역할을 수행한다. LED의 봉지재로 사용되는 실리콘의 재료는 일반적으로 젤(gel), 합성고무(elastomer) 그리고 수지(resin) 등으로 구분된다. 실리콘 젤은 LED 칩의 밀봉(sealing)과 내부 봉지재료 적합하며 페닐

(phenyl)과 메틸(methyl) 등의 성분이 사용된다. 페닐기 함량이 많은 실리콘의 장점은 높은 굴절율과 산화 및 열적 안정성이 뛰어나다. 합성고무와 수지는 고경도의 봉지재와 렌즈의 재료로 활용된다. 패키지에서의 형광체는 LED 칩에서 발광하는 청색 빛을 흡수하여 노랑 빛으로의 변환 및 빛의 산란(scattering) 등이 발생한다. 형광체에서의 빛의 산란은 빛의 전파경로의 혼선을 가져올 수 있다. 또한 패키지 구성요소인 렌즈의 굴절과 반사판의 빛의 반사 등에 의해 빛의 방향이 중심각으로 수렴(convergence)하거나 다른 각도로 변환될 수 있다 Liu et al(2009).

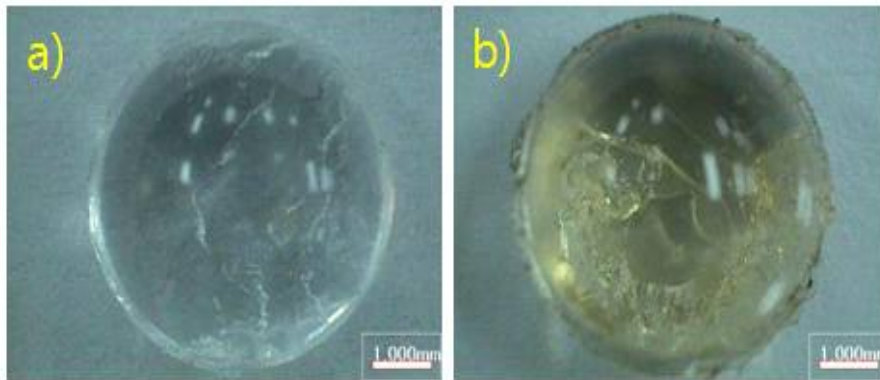
Tsai et al(2009)의 연구결과 고온 가속시험 후의 고출력 LED의 광 출력 감소의 메커니즘은 실리콘 봉지재에 혼입된 형광체의 높은 농도와 강한 상관관계가 있다. Luo et al(2010)의 연구 시험결과 침수 조건에서 고출력 LED 모듈 패키지의 습기확산에 의한 광 출력의 감소와 잠재적 LED 칩의 전기적 특성고장에 대하여 확인하였다. 또한 고장에 대한 물리적 분석결과 렌즈의 기포(bubble) 등을 볼 수 있었다.

non-biased HAST 고장시료에 대한 광학현미경 검사결과 <그림 6>과 같이 패키지의 흡습과 팽창(hydro-mechanical stress)에 의한 미세 기포(bubble), 렌즈표면 작은 구멍 그리고 봉지재의 황갈색(yellowish brown) 변색이 발생한 것을 관찰할 수 있었다.



<그림 6> (a) non-biased HAST 시험 후의 패키지 기포와 (b) 렌즈 표면의 작은 구멍

패키지 변색은 패키지 칩의 열화보다는 칩의 발열 또는 외부의 높은 온도와 습기 등에 의해 형광체나 봉지재와 같은 패키지 재료의 열화에 의해 발생한다. 또한 이러한 변색은 고출력 LED의 광속 열화에 영향을 미친다. <그림 7>은 고장 LED에 대한 개봉(decapsulation) 후 고장부위에 대한 분석결과이다. non-biased HAST 실험에 의한 실리콘 젤과 렌즈의 색깔의 변색을 확인할 수 있었다. 따라서 고출력 LED 패키지의 변색은 실리콘 젤의 변색에 의해 발생한 것으로 추론할 수 있었다. 적외선 분광기(infrared spectrometer)를 사용한 변색 실리콘 젤에 대한 화학성분기 분석결과 페닐기 실리콘이 사용된 것으로 분석되었다. 페닐기 실리콘은 정선의 높은 열과 빛의 발광 등에 안정적인 장점이 있지만 메틸기에 비해 습기에 취약하다.



<그림 7> non-biased HAST 시험 후 실리콘 젤 열화 분석결과 사진 :
(a) 양품 패키지로부터 분리된 젤과 렌즈, (b) 열화 시험 후 패키지로 부터 분리된 젤과 렌즈

4. 결론

본 논문에서는 고출력 LED의 패키지 고장에 기초한 가속시험 후의 고장 메커니즘 분석 결과에 대하여 논술했다. 시험은 JESD22-A118의 전원을 인가하지 않는 가속 습기 내구성시험 (110 °C-85 % RH, 130°C-85 % RH)을 실시하였으며 1 W 고출력 LED를 사용하였다. 시험 결과는 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. non-biased HAST 시험에서 패키지 열화에 의한 광속 감소를 확인할 수 있었다. 또한 LED 칩 발광 스펙트럼(455 nm)의 감소가 형광체 변환 스펙트럼(560 nm) 감소보다 높은 것을 알 수 있었다.
2. 고출력 LED 광속의 급격한 열화는 패키지 내의 실리콘 젤 변색과 렌즈의 기포 등과 같은 패키지 고장에 의해 발생하였다.
3. 패키지 변색과 광 출력의 감소에 대한 고장분석결과 패키지의 흡습과 팽창(hygro-mechanical stress)에 의한 실리콘 젤의 변색과 렌즈의 미세 기포(bubble), 작은 구멍(pore)등을 확인할 수 있었다.

따라서 전원을 인가하지 않은 습기 가속시험은 패키지 고장 메커니즘에 기초한 가속수명 시험방법으로 활용이 가능하다고 판단된다. 향후 패키지 고장에 기초한 고출력 LED의 가속 수명시험에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] Dupuis, R. D. and Krames, M. R.(2008), "History, Development, and Applications of High-Brightness Visible Light-Emitting Diodes", *J. Lightwave Technol.*, 26(9), pp.1154-1171.
- [2] Hardy, K. R., Olsson, M. S., Lakin, B. P., Steeves, K. A., Sanderson, J. R., Simmons, J. E., Weber, P.A.(2008), "Advances in High Brightness Light Emitting Diodes in Underwater Application", *Oceans*, pp.1-5.
- [3] Hui, S. Y. R., Li, S. N., Tao, X. H., Chen, W., Ng, W. M.(2010), "A Novel Passive Off-line Light-Emitting Diode(LED) Driver with Life Time", 25th IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), pp.594-600.
- [4] Hsu, Y. C., Lin, Y. K., Chen, M. M., Tsai, C. C., Kuang, J. H., Husng S. S., Hu, H. L., Su, Y. I., Cheng, W. H.(2008), "Failure Mechanism Associated With Lens Shape of High Power LED Modules in Aging Test", *IEEE T. Electron Dev.* 55(2), pp.689-694.
- [5] Liu, Z., Liu, S., Wang, K., Luo, X.(2009), "Optical Analysis of Phosphor's Location for High-Power Light-Emitting Diodes", *IEEE T. Device Mat. Re.*, 9(1), pp.65-73.
- [6] Alliance for Solid-State Illumination System and Technologies of Lighting Research Center(2006), "LED Life for General Lighting", Lighting Research Center, New York.
- [7] Calleja, A.J., Torres, A., Garcia, J., Secades, M.R., Ribas, J., Martinez, J.A.(2007), "Evaluation of Power LEDs Drivers with Supercapacitors and Digital Control", 42nd IEEE Industry Applications Conference, pp.1129-1134.
- [8] Meneghini, M., Tazzoli, A., Mura, G., Meneghesso, G., Zanoni, E.(2010), "A Review on the Physical Mechanisms That Limit the Reliability of GaN-Based LEDs", *IEEE T. Electron Dev.*, 57(1), pp 108-118.
- [9] Trevisanello, L., De Zuani, F., Meneghini, M., Trivellin, N., Zanoni, E., Meneghesso, G.(2009), "Thermally Activated Degradation and Package Instabilities of Low Flux LEDs", *IEEE International Reliability Physics Symposium Proceedings*, 5173231, pp.98-103.
- [10] Kang, J.M., Kim, J.W., Choi, J.H., Kim, D.H., Kwon, H.K.(2009), "Life-Time Estimation of High-Power Blue Light-Emitting Diode Chips", *Microelectron. Reliab.*, 49(9-11), pp.1231-1235.
- [11] JEDEC Standard EIA/JESD51-1, 22-A118(2000), Accelerated Moisture Resistance-non-biased HAST, EIA.
- [12] Cree Inc., XLamp XR-E LED Data Sheet, USA from <http://www.cree.com/xlamp>.
- [13] Barton, D.L. and Osinski, M.(1998), "Life Tests and Failure Mechanisms of GaN-AlGaIn-InGaIn Light Emitting Diodes", *Conference Proceeding Lasers and electro-optical Society(LEOS)*, 2, pp.440-441.
- [14] Narendran, N., Gu, Y., Freyssonier, H. Y., Deng, L.(2004), "Solid-State Lighting : Failure

- Analysis of White LEDs", *J. Cryst. Growth.* 268(3-4), pp.449-456.
- [15] Yang, S. C., Lin, P., Wang, C. P., Huang, S. B., Chen, C. L., Chiang, P. F., Lee, A. T. Chu, M. T.(2010), "Failure and Degradation Mechanisms of High-Power White Light Emitting Diodes", *Microelectron. Reliab.* 50(7), pp.959 - 964.
- [16] Hsu, Y. C., Lin, Y. K., Chen, M. H., Tsai, C. C., Kuang, J. H., Huang, S. B., Hu, H. L., Su, Y. I., Cheng, W. H.(2008), "Failure Mechanisms Associated with Lens Shape of High-Power LED Modules in Aging Test", *IEEE T. Electron Dev.*, 55(2), pp.689-694.
- [17] Tan, C.M., Eric Chen, B.K., Xu, G., Liu, Y.(2009), "Analysis of Humidity Effects on The Degradation of High-Power White LEDs", *Microelectron. Reliab.*, 49(9-11), pp.1226-1230.
- [18] Luo, X., Wu, B., Liu, S.(2010), "Effects of Moist Environments on LED Module Reliability", *IEEE T. Device Mat. Re.*, 10(2), pp. 182-186.
- [19] Ministry of Knowledge Economy(MKE)(2008), "Development of High Efficiency Lighting Technology for Optical Semiconductor"(in Korean), pp.72-86, MKE, Seoul.
- [20] Trevisanello, L., Meneghini, M., Mura, G., Vanzi, M., Pavesi, M.(2008), "Accelerated Life Test of High Brightness Light Emitting Diodes", *IEEE T. Device Mat. Re.*, 8(2) pp.304-311.
- [21] Tsai, C.C., Wang, J., Chen, M. H., Hsu, Y. C., Lin, Y. J., Lee, C. W., Huang, S. B., Hu, H. L., Cheng, W. H.(2009), "Investigation of Ce:YAG Doping Effect on Thermal Aging for High-Power Phosphor-Converted White-Light-Emitting Diodes, *IEEE T. Device Mat. Re.*, 9(3), pp.367-371.
- [22] Meneghini, M., Trevisanello, L., Sanna, C., Mura, G., Vanzi, M., Meneghesso, G., Zanoni, E.(2007), "High Temperature Electro-Optical Degradation of InGaN/GaN HBLEDs", *Microelectron. Reliab.*, 47(9-11), 1625.
- [23] Nogueira, E., Vázquez, M., Núñez, N.(2009), "Evaluation of AlGaInP LEDs Reliability based on Accelerated Tests", *Microelectron. Reliab.*, 49(9-11), pp.1240-1243.
- [24] Buso, S., Spiazzi, G., Meneghini, M., Meneghesso, G.(2008), "Performance Degradation of High Brightness Light Emitting Diodes Under DC and Pulsed Bias", *IEEE Trans. Device Mater. Re.*, 8(2), pp.312-322.
- [25] Meneghini, M., Trevisanello, L.-R., De Zuani, F., Trivellin, N., Meneghesso, G., Zanoni, E.(2009), "Extensive Analysis of the Degradation of Phosphor-Converted LEDs", *The International Society for Optical Engineering*, 7422.