

# 고온-광 복합 시험이 LED 패키지용 실리콘 충전재에 미치는 영향

김제민\*, 윤동원\*\*

## The Effect of a Combined High-temperature and Light Test on Silicone Encapsulant of LED Package

Jemin Kim\*, Dongweon Yoon\*\*

### 요약

본 논문에서는 LED(Light Emitting Diode) 패키지에 사용되는 실리콘 충전재에 대해서 실제 사용 환경과 유사한 복합 스트레스 환경을 고온-광 복합 시험으로 설계하고 실시한다. 고온-광 복합 시험의 유효성을 입증하기 위해 실리콘 충전재 샘플에 대한 고온 시험을 85°C와 120°C에서 수행한다. 그리고, 실리콘 충전재에 대한 고온-광 복합 시험을 고온 시험과 동일한 85°C와 120°C에서, LED 패키지의 광출력이 실리콘 충전재 샘플로 유도되도록 제안한 시험 지그를 이용하여 수행한다. 시험 후, 각각 실리콘 충전재의 투과율을 측정하고, 실리콘 충전재에 대한 Raman 분석을 통해 고온 시험과 고온-광 복합 시험에서 나타난 투과율의 차이가 발생한 원인을 추론한다.

### Abstract

In this paper, a combined stresses environment similar to the actual use environment of silicone encapsulant used in light emitting diode(LED) packages is designed as a combined high-temperature and light test(HTLT). High-temperature tests are conducted on silicone encapsulant samples at 85°C and 120°C to demonstrate the effectiveness of the combined HTLT on silicone encapsulant used in LED packages. In addition, a combined HTLT for a silicone encapsulant is performed using a test jig proposed to induce the light output of the LED package to the silicone encapsulant sample at 85°C and 120°C, the same as the high-temperature test. After the test, the transmittance of the silicone encapsulant is measured, and the Raman analysis of the silicone encapsulant is used to infer the cause of the difference in the transmittance shown in the high-temperature test and the combined HTLT.

### Keywords

combined test, silicone encapsulant, LED package, combined high-temperature and light test, transmittance

---

\* 한양대학교 융합전자공학과/한국전자기술연구원 · Received: Jun. 05, 2023, Revised: Oct. 19, 2023, Accepted: Oct. 22, 2023  
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7982-2482> · Corresponding Author : Dongweon Yoon  
\*\* 한양대학교 융합전자공학과 교수(교신저자) Dept. of Electronic Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Korea  
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9631-3500> Tel.: +82-2-2220-2183, Email: [dwyoon@hanyang.ac.kr](mailto:dwyoon@hanyang.ac.kr)

## 1. 서 론

전자부품용 소재의 신뢰성 연구에서 복합 스트레스 환경을 구현한 복합 시험은 일반적으로 2가지 이유에서 수행되어 왔다[1]. 첫째, 제품의 실제 사용 환경과 유사한 환경에서 시험하여, 실제 사용 환경에서 발생할 수 있는 보다 정확한 특성이나 물성 변화와 함께 신뢰성 문제를 확인하기 위함이다. 둘째, 복합 스트레스의 시너지 효과로 단일 스트레스에 의한 시험보다 고장이 발생하는데 걸리는 기간이 감소되어, 전체 시험시간을 단축할 수 있기 때문이다. 이에 반해, 단일 스트레스 환경을 구현한 시험은 단일 스트레스에 의한 소재의 변화를 모델링하고 학문적으로 연구하는데 필요하지만, 장시간의 시험이 요구되고, 실제 사용 환경을 반영하지 못하는 한계가 존재한다.

최근까지 복합 시험으로는 계절별 기후 변화를 고려한 고온-UV(Ultra Violet)-전압-인장-강우 복합 시험[2], 야외 환경을 반영한 고온-UV 복합 시험[3][4], 고온-고습 복합 시험[5], 습도-진동 복합 시험[6]과 온도변화-진동 복합 시험[6][7], 동작 상태를 구현한 고온-전류 복합 시험[8] 등이 설계되어 수행되어 왔다. 이외에도 모바일 기기, 자동차, 항공우주 등 전자부품의 사용환경이 확대됨에 따라, 복합 시험의 종류는 증가하고 있다. 이러한 복합 시험들로 배전시스템용 전자부품에 사용되는 폴리머 절연체(Polymer insulator)[2], LED 패키지 [3]나 태양전지 [4] 같은 광전소자에 사용되는 실리콘(Silicone) 소재, 반도체 패키지에 사용되는 보호소재(Mold compound)[5], 폴리머 충전제[6], 솔더 [6][7]와 AI 와이어[8] 등 전자부품용 소재들에 대한 신뢰성이 연구되어 왔다.

그러나, 위의 연구들은 주로 복합 스트레스 환경에서 단순히 전자부품용 소재의 사용 가능 여부를 확인하거나 일부 특성이나 물성 변화를 관찰할 목적으로 수행되어 왔다[2]-[5]. 특히, 광전소자에 사용되는 실리콘 충전제에 대한 고온-UV 복합 시험으로는 소재 자체의 특성 변화[3][4] 위주라는 한계가 있다. 또한, 복합 시험을 통한 신뢰성을 분석한 연구들[6]-[8]에 대해서도 향후 여러 종류의 소재들과

다양한 구성과 조건의 복합 시험들에 대한 필요성이 요구된다.

본 논문에서는 LED 패키지에 사용되는 실리콘 충전제에 대해 기존의 고온-UV 복합 시험이 반영하지 못한 실제 사용 환경과 유사한 복합 스트레스 환경을 고온-광 복합 시험으로 설계하고 실시한다. 먼저, 고온-광 복합 시험의 유효성을 입증하기 위해 실리콘 충전제 샘플에 대한 고온 시험을 85°C와 120°C에서 수행한다. 그리고, 실리콘 충전제에 대한 고온-광 복합 시험을 고온 시험과 동일한 85°C와 120°C에서, LED 패키지의 광출력이 연속적으로 실리콘 충전제 샘플로 유도되도록 제안한 시험 지그를 이용하여 수행한다. 시험 후, 각각 실리콘 충전제의 투과율을 측정하고, 실리콘 충전제에 대한 Raman 분석을 통해 고온 시험과 고온-광 복합 시험에서 나타난 투과율의 차이가 발생한 원인을 추론한다.

본 논문의 구성을 다음과 같다. 2장은 연구 배경인 LED 패키지에 사용되는 실리콘 충전제에 대해 설명한다. 3장에서는 일반적인 고온 시험과 본 논문에서 제안하는 고온-광 복합 시험에 대해 자세하게 기술하며, 분석 결과에 대해 논한다. 4장에서는 실리콘 충전제를 적용한 LED 패키지의 고온 동작 시험에 대해 제시한다. 마지막으로 5장에서는 결론과 본 연구가 갖는 한계점 및 향후 연구에 대하여 기술한다.

## II. 연구 배경

### 2.1 LED 패키지용 실리콘 충전제

LED는 교통 신호등, 디스플레이, 조명과 같은 분야에서 저전력, 작은 크기, 긴 수명 등의 장점으로 널리 사용되고 있다. 최근 마이크로 LED와 같이 크기는 작으면서 고출력이 요구되면서, 동시에 야외 환경 등 사용 분야가 확장됨에 따라 고온과 UV와 같은 열악한 환경에 노출되고 있다. 이에 따라 산업계에서 LED를 선택하기 위한 여러 가지 고려 사항 중 방열 설계[10]와 수명 등 LED의 신뢰성에 관한 사항의 중요성이 증가하게 되었다.

그림 1은 LED의 신뢰성에 영향을 미치는 LED 패키지의 구조와 구성 물질의 일반적인 사례를 보여준다. 먼저, 세라믹 또는 플라스틱 패키지 안에 LED 칩을 접착하고 Wire와 연결 후, 높은 결합 에너지를 갖는 Silicon(Si)과 Oxygen(O)의 Siloxane 결합으로 구성된 실리콘 소재의 충전재가 LED 칩 주위에 채워진다 [3]. 이후, 외부의 전원을 연결하기 위한 전극이 형성된 금속 PCB(Printed Circuit Board) 위에 접착되는 형태로 LED 패키지가 제작된다. LED 패키지의 구성 물질 중 LED 칩과 Wire를 둘러싼 실리콘 충전재는 먼저, 충격 등 외부 요인으로부터 LED 칩과 Wire를 보호하고, 일반적으로 형광체와 함께 사용되어 LED 칩으로부터 생성된 광의 파장 변환 및 방출을 위해 광학적으로 높은 투과율이 요구된다. 그러나, 실리콘 충전재를 LED 패키지에 적용한 상태로는 실리콘 충전재 자체의 투과율 측정이 불가능하므로, 소재 자체를 투과율 측정이 가능한 형태의 샘플로 제작하여 시험할 필요가 있다.

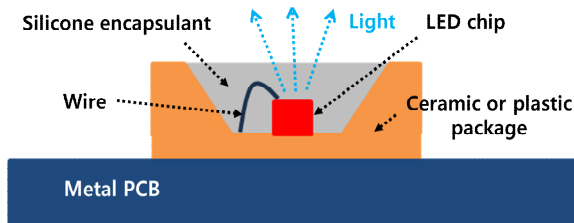


그림 1. LED 패키지의 구조와 구성 물질  
Fig. 1. Structure and materials of LED package

## 2.2 기존 연구 사례

LED 패키지의 신뢰성 확보를 위해서는 여러 가지 신뢰성 시험에도 실리콘 충전재의 투과율이 일정하게 유지되어야 하므로, 실리콘 충전재의 신뢰성은 주로 투과율을 변화시킬 수 있는 고온 시험이나 UV 노출 시험 등의 신뢰성 시험을 통해 평가된다 [3]. 참고문헌 [3]에서는 충전재로 사용되는 3가지 소재, 에폭시, 고굴절률(RI, Refractive Index) 실리콘, 그리고 저자가 개발한 고성능 실리콘을 2mm 막대 형태의 샘플로 제작하여 각각 480 시간동안 120°C 고온 시험, UV 노출 시험, 120°C 고온-UV 복합 시험을 수행하고 투과율의 변화를 관찰하였으며, 충전

재를 LED 패키지에 적용하여 상온에서 350mA, 1,500시간의 동작 시험을 통해 LED 패키지의 광출력 변화를 분석하였다. 그림 2는 각각 3가지 소재의 충전재에 대한 120°C 고온-UV 복합 시험 수행 중 상대적인 투과율 손실을 보여준다. 그림 2의 X축은 고온-UV 복합 시험의 시험시간, Y축은 460nm에서 충전재의 초기 투과율 대비 상대적인 손실을 %로 나타낸다. 저자가 개발한 고성능 실리콘의 경우, 투과율 손실이 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 그러나, 그림 2에서는 충전재 샘플들의 투과율을 460nm에서만 측정하였고, 투과율 손실의 원인을 분석하지 않았다. 그리고, 고온-UV 복합 시험도 LED 패키지에서 나오는 광이 아닌 (300~400)nm 대역의 UV 램프를 사용한 한계가 있다. 그러므로, 이러한 한계를 개선한 복합 시험이 요구된다.

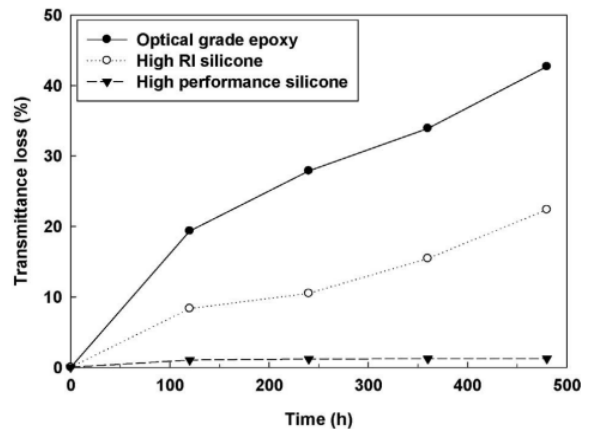


그림 2. 상대적인 투과율 손실 사례[3]  
Fig. 2. Example of relative transmittance loss[3]

또한, LED 패키지의 수명에 고온뿐만 아니라 LED 패키지 자체의 광출력도 영향을 주는 것으로 판단되는 상용 제품의 신뢰성 자료가 발표되었다 [9]. 그림 3은 참고문헌 [9]에서 LED 패키지의 동작 전류(Forward current)에 따른 LED 칩의 접합 온도(Junction temperature)에서의 수명을 보여준다. 접합 온도에 따라 LED 패키지의 수명에 차이가 나타나는데, 임의의 접합 온도에서는 동작 전류가 높을수록 수명이 감소하는 경향을 보여준다. 일반적으로 동작 전류가 증가하면, LED 패키지의 광출력도 증가하므로, LED 패키지의 광출력이 LED 패키지의 수명에 영향을 주는 것으로 판단된다.

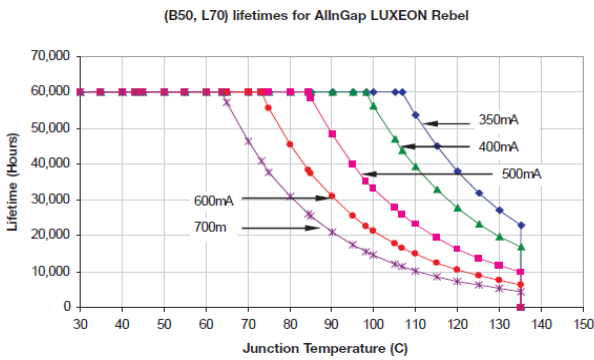


그림 3. LED 패키지의 수명 사례[9]  
Fig. 3. Example of lifetime of LED package[9]

### 2.3 샘플 제작

본 논문에서는 참고문헌 [3]의 한계를 극복하고 고온 환경과 LED 패키지의 광출력이 실리콘 충진재와 LED 패키지의 신뢰성에 주는 영향을 파악하기 위해, 투과율 측정이 가능하도록 직경 30mm인 원통 형태의 실리콘 충진재 샘플을 제작하여, 고온 시험과 고온-광 복합 시험을 수행한다. 표 1은 선택된 실리콘 충진재의 물성을 나타낸다. 그림 4는 제작된 실리콘 충진재 샘플을 보여준다.

표 1. 실리콘 충진재의 물성  
Table 1. Properties of silicone encapsulant

Refractive index	Viscosity [mPa*s]
1.54	7,000

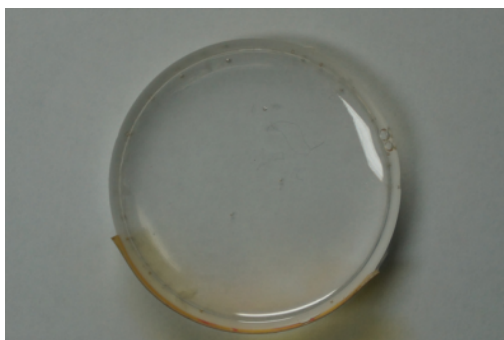


그림 4. 실리콘 충진재 샘플  
Fig. 4. Silicone encapsulant sample

추가로, 그림 5는 고온-광 복합 시험을 위해 제작된 LED 패키지를 보여준다. LED 패키지는 고온-광 복합 시험과 실리콘 충진재 유무에 따른 광출력

의 비교를 위해, 그림 1과 같이 실리콘 충진재가 적용된 것과 그림 6과 같이 실리콘 충진재가 없는 것을 함께 제작한다. 그림 7은 X축은 파장, Y축은 광출력의 상대적인 세기로 제작된 LED 패키지의 광스펙트럼을 나타내며, 중심파장은 445nm이다.



그림 5. LED 패키지 샘플  
Fig. 5. LED package sample

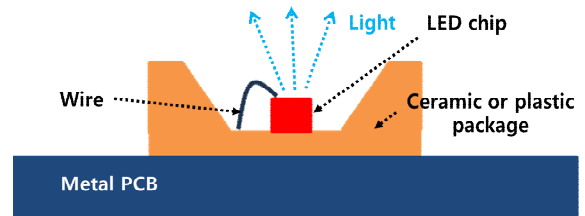


그림 6. 실리콘 충진재가 없는 LED 패키지  
Fig. 6. LED package without silicone encapsulant

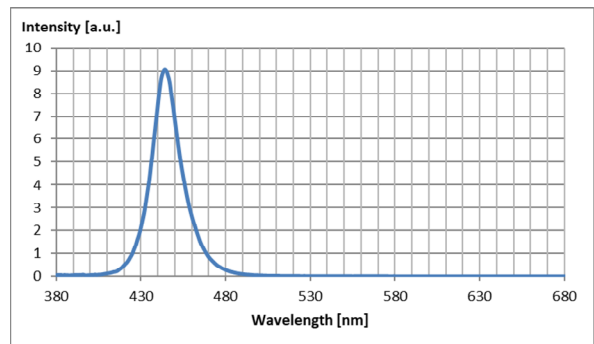


그림 7. LED 패키지의 광스펙트럼  
Fig. 7. Optical spectrum of LED package

### III. 고온 시험과 고온-광 복합 시험

본 장에서는 먼저 고온 시험과 고온-광 복합 시험을 위해 본 논문에서 제안된 시험 지그에 대해 설명한다.

그리고, 고온-광 복합 시험의 유효성을 입증하기 위한 고온 시험을 먼저 수행한 결과와 고온-광 복합 시험 방법과 결과에 대해 논의한다. 이후, 고온 시험과 고온-광 복합 시험의 결과로 나타난 투과율의 변화 원인을 Raman 분석 등을 통해 살펴보고, 실리콘 충전재 유무에 따른 LED 패키지의 시험 결과를 논의한다.

### 3.1 고온 시험

본 논문에서는 실리콘 충전재와 LED 패키지에 대한 고온 시험과 고온-광 복합 시험에 필요한 시험 지그를 제안한다. 그림 8은 제안한 시험 지그의 개념을 나타낸다. 시험 지그는 LED 패키지에 350mA의 동작 전류를 인가할 수 있고, LED 패키지에서 나온 광이 실리콘 충전재에 도달할 수 있도록 설계한다.

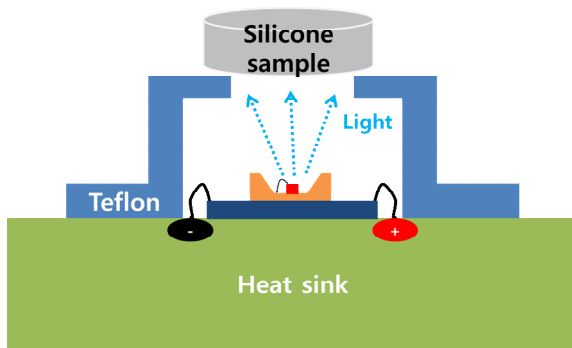
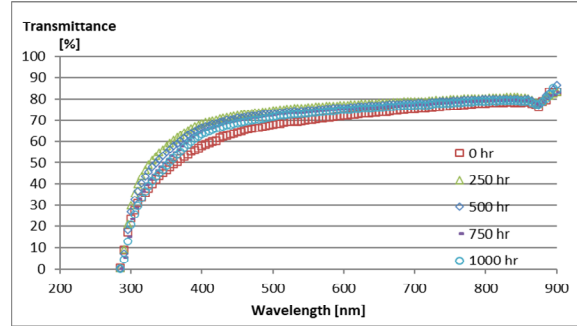


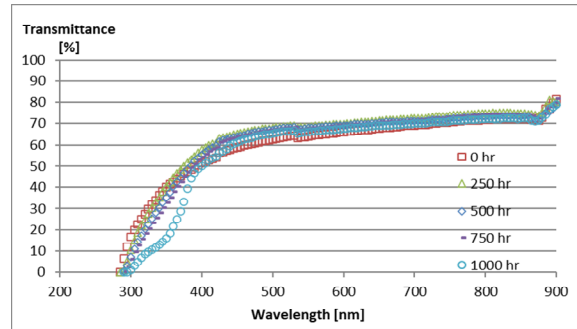
그림 8. 제안한 시험 지그  
Fig. 8. Proposed test jig

고온-광 복합 시험의 유효성을 입증하기 위한 일반적인 고온 시험을 먼저 수행한다. 실리콘 충전재에 대한 고온 시험을 85°C 와 120°C에서 총 1,000 시간 수행한다. 고온 시험 중 250시간마다 시험을 일시 중단하고 실리콘 충전재의 투과율을 측정한다.

그림 9는 고온 시험 중 실리콘 충전재의 투과율 측정 결과로 X축은 파장, Y축은 투과율을 나타낸다. 그림 9(a)인 85°C 시험보다 그림 9(b)인 120°C 시험에서 (300-400)nm 대역의 투과율이 감소한다. 이는 85°C 정도의 고온에는 실리콘 충전재가 안정되나, 120°C 이상의 고온에 1,000시간 이상 노출되면 실리콘 충전재에서 열화가 진행되는 것으로 판단된다.



(a) 85 °C



(b) 120 °C

그림 9. 고온 시험 중 투과율 측정 결과  
Fig. 9. Transmittance in high-temperature test

### 3.2 고온-광 복합 시험

실리콘 충전재에 대한 고온-광 복합 시험을 고온 시험과 동일하게 85°C 와 120°C에서 총 1,000시간 수행한다. 그림 10은 고온-광 복합 시험의 모습으로 고온을 유지할 수 있는 항온 Chamber 안에 위치한 시험 지그에서 LED 패키지의 청색광이 실리콘 충전재 샘플 밑에서 방출되는 모습을 보여준다. 고온-광 복합 시험 중 250시간마다 시험을 일시 중단하고 UV-VIS 분광기로 실리콘 충전재의 투과율 측정한다.

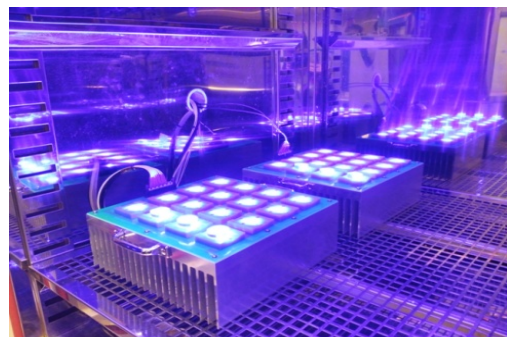
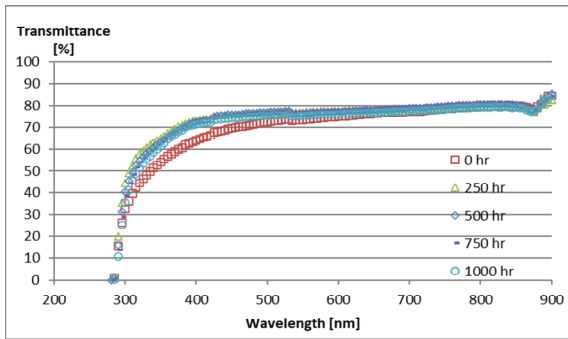
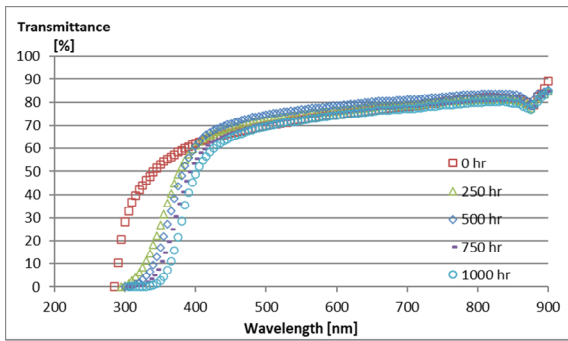


그림 10. 고온-광 복합 시험 모습  
Fig. 10. Picture of combined HTLT

그림 11은 고온-광 복합 시험 중 실리콘 증진재의 투과율 측정 결과로 X축은 파장, Y축은 투과율을 나타낸다. 측정 결과, 그림 11(a)인 85°C 시험보다 그림 11(b)인 120°C 시험에서 (300~400)nm 대역의 투과율이 초기 대비 현저히 감소한다. 이는 120°C 이상의 고온 환경에서 LED 패키지에서 방출되는 광이 (300~400)nm 대역의 투과율의 열화를 촉진하는 것으로 추론된다. 이와 같이 투과율 스펙트럼 측정 방법은 참고문헌 [3]에서 그림 2와 같이 460nm에서만 측정한 투과율의 변화에서는 관찰되지 않은 한계를 개선한 방법으로 본 논문에서 제시한다.



(a) 85 °C



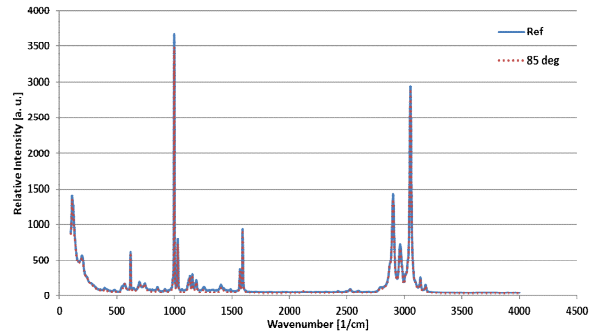
(b) 120 °C

그림 11. 고온-광 복합 시험 중 투과율 측정 결과  
Fig. 11. Transmittance in combined HTLT

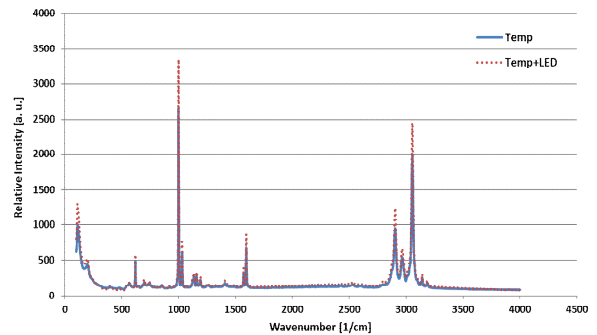
실리콘 증진재에 대한 고온 시험과 고온-광 복합 시험의 결과를 재료적으로 분석하고자 Raman 분석을 수행한다. Raman 분석은 Wavenumber에 따른 진동수를 나타내는 Raman 스펙트럼을 통해 분자의 결합 강도를 측정할 수 있다.

그림 12는 Raman 분석 결과인 Raman 스펙트럼으로 X축은 Wavenumber, Y축은 상대적인 결합 강도를 보여준다. 그림 12(a)는 85°C 고온 시험에서

실리콘 증진재의 초기 샘플과 시험 종료 후의 샘플의 Raman 스펙트럼을 비교한 것으로, 시험 전과 후에 CC결합이나 C-H 결합의 결합 강도에 차이가 거의 없다. 이는 그림 9(a)에서와 같이 투과율의 변화가 거의 없는 결과와 일치한다. 그림 12(b)는 120°C 고온 시험과 120°C 고온-광 복합 시험에서 각각 시험 종료 후 실리콘 증진재 샘플들의 Raman 스펙트럼을 비교한 것으로, 그림 12(a)에 비해 CC결합이나 C-H 결합의 결합 강도가 급격히 증가한다. 고온에 의해서는 거의 변하지 않았던 CC결합이나 C-H 결합의 결합 강도가, 고온-광 복합 시험으로 급격히 증가한 것은 LED 패키지에서 방출되는 광에 의한 영향으로 판단된다. 또한, 고온-광 복합 시험에서 CC결합이나 C-H 결합의 결합 강도가 증가한 것이 실리콘 증진재에서 광의 투과를 방해하게 되어, 그림 11(b)에서와 같이 (300~400)nm 대역의 투과율이 급격히 감소하는 결과로 나타난 것으로 추론된다.



(a) 85 °C 고온 시험 전과 후  
(a) Ref. vs. high temperature test at 85 °C



(b) 120 °C 고온과 고온-광 복합 시험  
(b) High temperature test vs. combined HTLT at 120 °C

그림 12. 라만 분석 결과  
Fig. 12. Results of Raman analysis

본 논문에서는 LED 패키지에 사용되는 실리콘 충전재에 대해, 실제 사용 환경과 유사한 복합 스트레스 환경으로 고온-광 복합 시험을 제안하여, 효과적인 가속시험법으로 제시한다.

#### IV. LED 패키지의 고온 동작 시험

제작한 LED 패키지는 그림 1과 같이 실리콘 충전재가 있는 샘플과, 그림 6과 같이 실리콘 충전재가 없는 샘플로 구분된다. 실리콘 충전재에 대한 고온-광 복합 시험을 위해 시험 지그에 LED 패키지가 장착되어 고온 환경에서 연속적으로 동작함으로써, LED 패키지에 대한 고온 동작 시험이 실리콘 충전재에 대한 고온-광 복합 시험과 동시에 수행된다. 그림 13은 실리콘 충전재가 있는 LED 패키지가 시험 지그에 장착된 모습을 보여준다. 실리콘 충전재가 없는 LED 패키지는 앞의 그림 8과 같이 고온-광 복합 시험에 활용되어 동시에 고온 동작 시험을 수행한다.

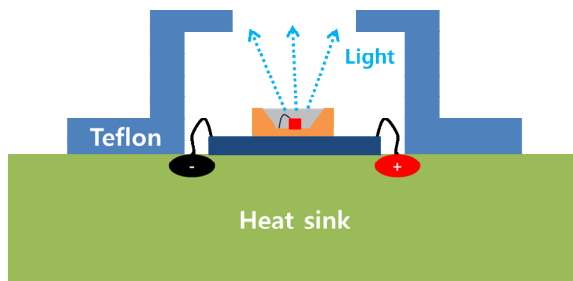
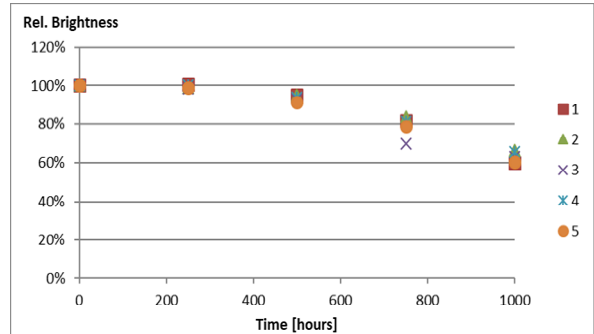


그림 13. 실리콘 충전재가 있는 LED 패키지의 지그 장착 모습

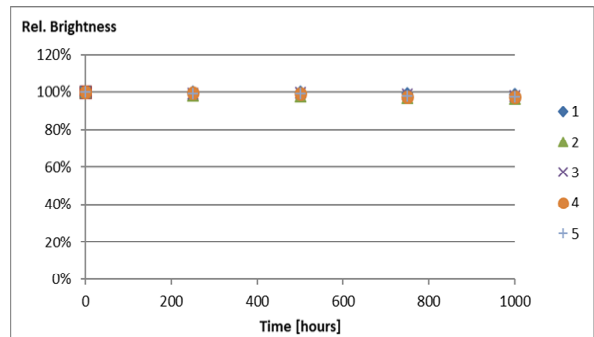
Fig. 13. LED package with silicone encapsulant mounted on test jig

실리콘 충전재의 120°C 고온-광 복합 시험에서 LED 패키지도 250시간마다 적분구에서 광출력을 측정한다. 그림 14는 120°C 시험에서 실리콘 충전재 유무에 따른 LED 패키지의 광출력 변화로, X축은 시간, Y축은 초기 대비 광출력의 변화를 나타낸다. LED 패키지의 광출력이 실리콘 충전재가 적용된 경우 1,000시간 동안 30% 이상 급격히 감소하고, 실리콘 충전재가 적용되지 않은 경우는 거의 감소하지 않은 것으로 측정된다. 이를 통해 120°C 고온에서 LED 패키지의 광출력 감소에는 실리콘 충전재의 영

향이 큰 것을 확인할 수 있고, 이는 실리콘 충전재의 (300~400)nm 대역의 투과율이 급격히 감소한 120°C 고온-광 복합 시험의 결과에 부합한다.



(a) 실리콘 충전재가 있는 경우  
(a) With silicone encapsulant



(b) 실리콘 충전재가 없는 경우  
(b) Without silicone encapsulant

그림 14. 120 °C 시험 중 LED 패키지의 상대적인 광출력 변화

Fig. 14. Relative optical power of LED packages in 120 °C test

#### V. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 LED 패키지에 사용되는 실리콘 충전재에 대해 실제 사용 환경과 유사한 복합 스트레스 환경을 고온-광 복합 시험으로 설계하고 실시하였다.

먼저, LED 패키지의 신뢰성에서 실리콘 충전재의 영향을 평가하기 위해 실리콘 충전재 샘플과 함께 실리콘 충전재가 없는 LED 패키지와 동일한 실리콘 충전재를 적용한 LED 패키지를 제작했다. 고온-광 복합 시험의 유효성을 입증하기 위해 실리콘 충전재 샘플에 대한 고온 시험을 85°C와 120°C에서 수행했다. 그리고, 실리콘 충전재에 대한 고온-광 복합 시험을 고온 시험과 동일한 85°C와 120°C에

서, LED 패키지의 광출력이 연속적으로 실리콘 충전제 샘플로 유도되도록 제안한 시험 지그를 이용하여 수행했다. 실리콘 충전제의 투과율과 LED 패키지의 광출력이 250시간마다 분광계와 적분구로 각각 측정되었으며, 총 1,000시간 시험한 결과, 120°C에서 고온 시험보다 고온-광 복합 시험에서 실리콘 충전제 샘플의 (300~400) nm 대역 투과율의 급격한 감소가 관찰되었다. 원인 분석을 위해 실리콘 충전제 샘플에 대한 Raman 분석을 실시하였고, 특정 분자들의 결합강도에 차이가 발생한 것이 투과율 감소의 원인으로 추론된다. 추가적으로, 120°C에서 1,000시간 시험 후 실리콘 충전제가 있는 LED 패키지의 광출력이 실리콘 충전제가 없는 LED 패키지의 광출력보다 약 30% 더 감소했다. 이는 LED 패키지에 적용된 실리콘 충전제의 투과율 감소에 기인한 것으로 판단된다.

본 논문에서는 실제 사용 환경과 유사한 복합 스트레스 환경을 복합 시험으로 설계하고, 적합한 조건의 복합 시험 실시 및 신뢰성 결과를 분석하여, 산업계에서 LED 패키지에 사용되는 실리콘 충전제의 신뢰성을 시험하는 방법으로 효과적인 가속시험법(Accelerated test method)을 제시하였다. 본 논문의 결과를 바탕으로 앞으로, 보다 많은 수의 샘플들과 다양한 조건들의 복합 시험이 요구되며, 추가적으로 효과적인 재료 분석 방법과 함께 복합 시험에서 각 스트레스별 영향에 대한 평가도 필요할 것이다.

## References

- [1] M. Bazu, L. Galateanu, and V. Ilian, "About using combined stresses for reliability testing of microsystems", 2009 International Semiconductor Conference, Sinaia, Romania, pp. 233-236, Oct. 2009. <https://doi.org/10.1109/SMICND.2009.5336561>.
- [2] J. H. Han, B. S. Lee, and D. M. Kim, "Reliability assessment of polymeric insulators by the combined aging test", Conference Record of the the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Boston, MA, USA, pp. 224-227, Apr. 2002. <https://doi.org/10.1109/ELINSL.2002.995918>.
- [3] Y. H. Lin, J. P. You, Y. C. Lin, N. T. Tran, and F. G. Shi, "Development of High-Performance optical silicone for the packaging of high-power LEDs", IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Vol. 33, No. 4, pp. 761-766, Dec. 2010. <https://doi.org/10.1109/TCAPT.2010.2046488>.
- [4] C. Cai, D. C. Miller, I. A. Tappan, and R. H. Dauskardt, "Degradation of silicone encapsulants in CPV optics", 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference, Portland, OR, USA, pp. 196-199, Jun. 2016. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2016.7749577>.
- [5] H. Liu, S. Yang, and G. Li, "Effects of combining hygro-thermal stress on reliability of plastic QFN package", 2010 11th International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging, Xi'an, China, pp. 1059-1063, Aug. 2010. <https://doi.org/10.1109/ICEPT.2010.5582720>.
- [6] O. Wittler, J. Jaeschke, O. Bochow-Ness, A. Middendorf, and K. D. Lang, "Combined reliability testing: An approach to assure reliability under complex loading conditions", 2012 7th International Conference on Integrated Power Electronics Systems, Nuremberg, Germany, pp. 1-7, Mar. 2012.
- [7] H. Qi, M. Osterman, and M. Pecht, "Modeling of combined temperature cycling and vibration loading on PBGA solder joints using an incremental damage superposition approach", IEEE Transactions on Advanced Packaging, Vol. 31, No. 3, pp. 463-472, Aug. 2008. <https://doi.org/10.1109/TADVP.2008.927847>.
- [8] W. Vinson, A. Iradukunda, D. Huitink, J. P. Lee, M. Kwon, and C. Y. Oh, "Combined electromigration and strain accelerated failure development for Al wire bonds and reliability analysis of grid-tied solar inverter", 2021 20th IEEE Intersociety Conference on Thermal and



Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (iTherm), San Diego, CA, USA, pp. 772-779, Jun. 2021. <https://doi.org/10.1109/ITherm.51669.2021.9503165>.

[9] Reliability Datasheet RD07, "LUXEON® Rebel Reliability Data", Philips Lumileds, 2007. <https://www.luxeonstar.com/assets/downloads/rd07.pdf> [accessed: Jan. 5, 2016]

[10] J. W. Lee and J. R. Ryu, "Improving Performance of the Heat-sink in LED Application System", Journal of KIIT, Vol. 12, No. 3, pp. 31-37, Mar. 2014. <https://doi.org/10.14801/kiitr.2014.12.3.31>.

## 저자소개

김 제 민 (Jemin Kim)



1999년 2월 : 한양대학교  
전자전자통신전파공학과(공학사)  
2001년 2월 : 한양대학교  
전자통신공학과(공학석사)  
2023년 8월 : 한양대학교  
전자컴퓨터통신공학(공학박사)  
2001년 ~ 현재 :

한국전자기술연구원 책임연구원

관심분야 : 정보기기 신뢰성, 가속시험, 복합시험

윤 동 원 (Dongweon Yoon)



1989년 2월 : 한양대학교  
전자통신공학과(공학사)  
1992년 2월: 한양대학교  
전자통신공학과(공학석사)  
1995년 8월 : 한양대학교  
전자통신공학과(공학박사)  
1995년 3월 ~ 1997년 8월

동서대학교 정보통신공학과 조교수

1997년 9월 ~ 2004년 2월 대전대학교 정보통신공학과  
부교수

2004년 3월 ~ 현재 : 한양대학교 융합전자공학부 교수

관심분야 : 추정 및 검출, 무선통신, 위성 및 우주통신