

다파장 IR과 NIR 모듈의 평균 수명 예측에 관한 연구

김동표^{ID}, 김경섭

여주대학교 반도체시스템과

Study on the MTTF of Multi Wave Lengths IR and NIR LEDs Module

Dong Pyo Kim and Kyung Seob Kim

Department of Semiconductor System, Yeju Institute of Technology, Yeju 12652, Korea

(Received November 2, 2020; Revised November 7, 2020; Accepted November 9, 2020)

Abstract: Recently, infrared (IR) and near-infrared (NIR) light-emitting diodes (LEDs) were widely used for home medical applications owing to its low output power and wide exposed area for curing. For deep penetration of the light under the skin, multiple LEDs with wavelengths of 700~10,000 nm were located on a flexible printed circuit board. When multiple wavelengths of LEDs were soldered on a circuit board, the lifetime of LED module highly depends on LEDs with a short lifetime. The mean time to failure (MTTF) was able to calculate with the experimental results under high temperature and the Arrhenius model. The results of this study could help companies to approve the warranty of LED modules and its product.

Keywords: IR, NIR, LED therapy, Multi wave length module

1. 서론

인간의 수명이 늘어나면서 건강한 삶에 대한 관심이 높아져서 IT 기술을 접목된 개인용 의료기기의 수요가 증가되고 있으며, 저출력 레이저 또는 LED를 이용한 광원 의료기기는 다양한 질병에 효과가 있어 연구 개발이 활발하게 진행되고 있다. LED 치료기기는 저출력 레이저보다 치료 시간이 길다는 단점을 가지고 있으나, 레이저보다는 LED의 출력이 낮아 안전하고, 넓은 면적의 부위를 효과적으로 치료가 가능하고, 전문 교육 없이 장소와 시간에 상관없이 사용할 수 있는 장점을 가지고 있다 [1-5].

최근 피부 아래 세포 내로 깊이 침투할 수 있는 적

외선(infrared, IR) 또는 근적외선(near infrared, NIR) LED (light emitting diode)를 광원으로 많이 사용되고 있다. 세포 내로 침투한 광은 세포 조직 내 색소포나 광 수용기를 자극시켜 생화학적 반응을 촉진시킨다. 그 결과 세포의 대사 활동이 활성화되어 세포의 재생이 활발하게 된다 [6]. 피부 노화 방지, 상처 치료, 염증 치료, 통증 완화 및 치매 치료에 대한 다양한 형태의 개인용 의료기기가 상용화되었다 [7-9].

특히 근적외선을 이용한 피부 미용 기기의 보급이 활발하게 되면서, 관련 시장이 급속하게 성장하고 있으나, 제품의 품질이 소비자의 요구에 미치지 못하는 경우가 많다. 근적외선 LED는 열선을 방출하므로 일반 LED와 비교하여 수명이 짧을 수밖에 없는데, 근적외선 LED 패키지 또는 근적외선 LED를 이용한 모듈의 수명에 관한 연구는 진행되어 있지 않다. LED 패키지 또는 LED 조명의 수명 또는 예측을 위한 가속 시험법으로는 전압 전류 변동 시험, 광속 유지율 시험, 환경시험 등이 있다. 주로 LED의 수명은 고온 챔버에서 동작을 하면서 광속 유지율을 관찰하였고, 초기 광속의 70%가

✉ Dong Pyo Kim; dpkim487@yit.ac.kr



Fig. 1. NIR LED care products.

되었을 때를 고장 또는 수명으로 설정하였다 [10-12].

본 논문에서는 피부 아래에 깊이 침투할 수 있는 IR LED (640 nm)와 NIR LED (830 nm, 880 nm, 956 nm)를 사용하여 다파장 LED 모듈을 제작하였다. 다파장 LED를 사용하는 경우 LED 모듈의 수명을 결정하는 LED를 찾기 위하여 고온 동작 시험과 광속을 측정하였다. LED의 수명 예측 모델인 아레니우스 열화 모델을 이용한 각 파장 LED의 60°C 고온에서의 수명을 산출하였고, 이 산출된 수명을 이용하여 40°C 사용 환경에서의 평균 수명을 산출하였다. 고온 시험은 60°C 고온 챔버에서 840 시간 동작을 시켰다. 매 168시간마다 다파장 LED 모듈에 있는 LED를 분리하여, LED의 광속을 측정하였다.

2. 실험 방법

2.1 LED 사양

본 실험에 사용된 LED는 뉴라이트 반도체의 IR (650 nm)과 NIR LED (830 nm, 880 nm, 956 nm)를

Table 1. Specification of LED.

Classification	Unit	IR		NIR	
Peak wave length	nm	650	830	880	956
FWHM	nm	16	35	40	50
Luminous intensity	mcd	130	-	-	-
Radiant intensity	mW/Sr	-	7	5	5
Forward voltage	V	1.87	1.46	1.37	1.32
Forward current	mA	30	100	100	100

사용하였다. 칩 크기는 2.835 cm를 사용하였고, 칩의 높이는 1.9 cm이었다. 각 파장별 칩의 사양은 표 1에 정리하여 나타내었다.

2.2 다파장 LED 모듈

그림 2는 본 실험에 사용된 다파장 LED 모듈을 나타내고 있다. PCB의 크기는 20 cm × 10 cm이고, 다파장 모듈의 광 출력 밀도는 37.5 mW/cm²이다. 양면 플렉시블 PCB 기판의 한 면에 5 직렬 × 24 병렬로 총 120개의 IR LED (640 nm)와 NIR LED (830 nm, 880 nm, 956 nm)가 배열되었다. 각 파장별로 30개의 LED가 사용하였고, 각 파장별로 사용된 LED의 V_f 값이 다르므로, V_f 값의 편차에 따른 각 파장의 LED에 흐르는 전류의 쏠림 현상을 방지하기 위하여 저항을 병렬회로의 가장자리에 배치하였다.

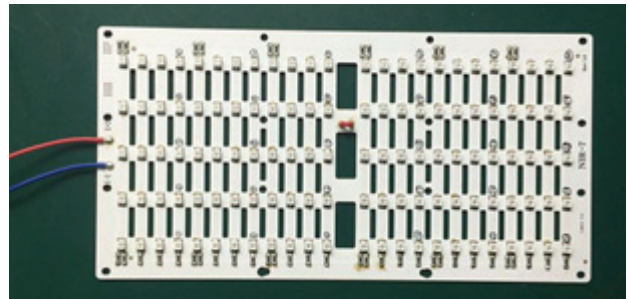


Fig. 2. Multi wave length LED module.

2.3 고온 동작 실험

그림 3은 다파장 LED 모듈의 고온 동작 시험 장치와 시험 조건을 표시하고 있다. 근적외선 LED 기기는 사용 환경에 따라서 표면 온도가 바뀐다. 대기 중 LED

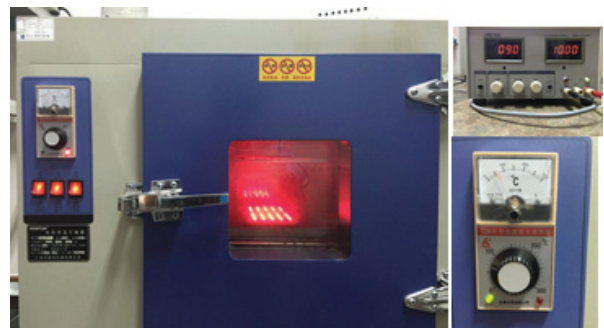


Fig. 3. Hot temperature experiment setup.

모듈의 표면 온도는 40°C일 경우, 두꺼운 옷감으로 덮으면 표면 온도가 약 60°C까지 상승할 수 있다. 고온 챔버의 온도는 LED 모듈의 표면 최대 온도인 60°C로 설정하였다. 다파장 근적외선 LED 모듈에 DC 전원 장치를 통하여 10 V, 0.9 A를 공급하였고, 다파장 LED 모듈의 각 회로에는 37.5 mA의 전류가 공급되었고, 840시간 동작을 시켰다.

2.4 광 출력 측정 실험

그림 4는 840시간 동안 60°C 온도에서 동작시킨 LED 모듈을 매 168시간마다 고온 챔버에서 꺼낸 후 다파장 LED 모듈에서 각 파장별 LED를 분리한 후 OPI-100 LEOS (광전자정밀)의 측정 장비를 사용하였다. 그림 4의 광 출력 측정기와 지그에 LED를 넣고 광 출력(광도와 복사강도)을 측정하였다. IR과 NIR LED 광 출력 측정을 위하여, IR LED에는 20 mA의 전류를 공급하였고, NIR LED에는 50 mA를 공급하였다. 광 출력 측정이 끝난 후 분리된 LED는 다시 플렉시블 PCB에 실장되었고, 고온 챔버에서 동작 시험을 계속 수행하였다.

(a)



(b)



Fig. 4. Optical experiment setup.

2.5 열화평가 모델

본 연구의 주목적인 IR LED와 NIR LED 수명 예측은 일반적으로 LED의 수명 예측에 사용되는 아레니우스 모델을 이용하여 역산을 하였다.

$$A_F = H_T \times \exp\left[\frac{E_a}{\kappa} \cdot \left(\frac{1}{T_U} - \frac{1}{T_S}\right)\right] \quad (1)$$

H_T : 고온 환경 조건에서의 총 사용시간

A_F : 가속 상수

E_a : 활성화 에너지

κ : 볼츠만 상수(8.62×10^{-5} eV/K)

T_U : 정격사용 절대온도(K)

T_S : 고온 환경 시험 절대온도(K)

열화율 α 는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. $I(t)$ 는 시간 t 에서의 광 출력, I_0 는 초기 광 출력이고, α 는 광 출력 열화율을 나타내고 있다. 840시간 지난 후 광 출력은

$$\frac{I(t)}{I_0} = \exp(-\alpha \cdot t) \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{1}{840} \ln\left(\frac{I_t}{I_0}\right) \quad (3)$$

광속유지율이 초기의 70%가 되는 수명시간 L_{70} 은 식 (4)에 제시되었다.

$$L_{70} = \frac{\ln(0.7)}{-\alpha} [hr] \quad (4)$$

40°C에서의 평균 수명시간(L'_{70})은 식 (1)과 식 (4)를 이용하여 식 (5)에 제시되었다.

$$L'_{70} = L_{70} \times \exp\left[\frac{0.65}{k} \cdot \left(\frac{1}{313} - \frac{1}{333}\right)\right] [hr] \quad (5)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 650 nm IR LED의 열화 데이터

그림 5는 650 nm IR LED의 광 출력과 광 출력 저하율을 나타내고 있다. 매 168시간마다 650 nm IR

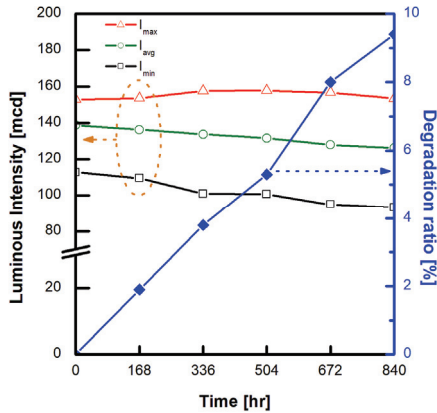


Fig. 5. Luminous intensity of 650 nm LED as a function of time at 60°C for 840 hours.

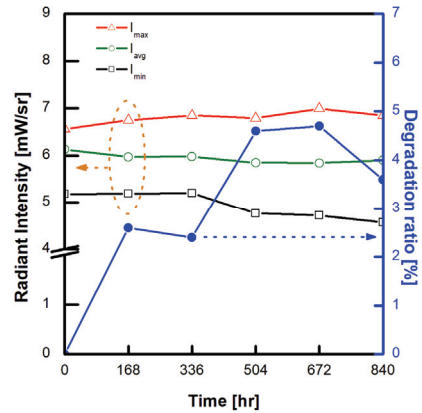


Fig. 6. Radiant intensity of 830 nm LED as a function of time at 60°C for 840 hours.

LED에는 20 mA의 전류를 공급하면서 광 출력(광도)을 측정하였다. 광 출력 저하율(degradation ratio)은 측정된 시점에서의 광 출력의 감소를 초기 광 출력으로 나눈 값으로, 광 출력 저하율이 큰 것은 광 출력이 많이 감소하였다는 것을 의미한다. 초기 광 출력 최고는 152.9 mcd이었고, 최소는 112.9 mcd이었다. 초기 광 출력 평균은 138.8 mcd이었다. 60°C에서 840시간 on 동작 후, 광 출력 최고는 153.4 mcd이었고, 광 출력 최소는 93.2 mcd이었다. 840시간 후 평균 광 출력은 127.9 mcd로 감소하였다. 이때 광 출력 저하율은 약 9.4%로 증가하였다. 이는 640 nm LED의 광 출력이 평균적으로 감소하였다는 것을 의미한다.

평균 광도 열화 데이터와 아레니우스 열화 모델 식 (3)에서 640 nm IR LED의 α 는 1.133×10^{-4} 이다. 식 (4)에 광 출력 열화율을 대입하면 60°C에서의 수명은 2,682시간이다. 식 (5)를 이용하여 40°C에서의 L'_{70} 을 구하면,

$$L'_{70} = 2,682 \times \exp \left[\frac{0.65}{8.62 \times 10^{-5}} \cdot \left(\frac{1}{313} - \frac{1}{333} \right) \right] = 11,398 [hr] \quad (6)$$

위 계산식을 통하여 40°C를 기준으로 하여 640 nm IR LED의 평균 수명 시간은 11,398시간이다.

3.2 830 nm NIR LED의 열화 데이터

그림 6은 830 nm IR LED의 열화 데이터를 나타내고 있다. 매 168시간마다 830 nm NIR LED에는 50 mA의 전류를 공급하면서 광 출력(복사광도)을 측정하

였다. 초기 광 출력 최고는 6.56 mW/sr이었고, 최소는 5.18 mW/sr이었다. 초기 평균 광 출력은 61.3 mW/sr이었다. 60°C에서 840시간 on 동작 후 광 출력 최고는 6.85 mW/sr이었고, 광 출력 최소는 4.57 mW/sr이었다. 840시간 후 평균 광 출력은 5.90 mW/sr로 감소하였고, 이때 광 출력 저하율은 약 3.8%로 증가하였다. 이는 830 nm LED의 광 출력이 평균적으로 감소하였다는 것을 의미한다.

평균 광 출력 열화 데이터와 아레니우스 열화 모델 식 (3)에서 830 nm NIR LED의 α 는 4.553×10^{-5} 이다. 식 (4)에 광 출력 열화율을 대입하면 60°C에서의 수명은 7,834시간이다. 식 (5)를 이용하여 40°C에서의 L'_{70} 을 구하면,

$$L'_{70} = 7,834 \times \exp \left[\frac{0.65}{8.62 \times 10^{-5}} \cdot \left(\frac{1}{313} - \frac{1}{333} \right) \right] = 33,295 [hr] \quad (7)$$

위 계산식을 통하여 40°C를 기준으로 하여 830 nm NIR LED의 평균 수명 시간은 33,295시간이다.

3.3 880 nm NIR LED의 열화 데이터

그림 7은 880 nm IR LED의 열화 데이터를 나타내고 있다. 매 168시간마다 880 nm NIR LED에는 50 mA의 전류를 공급하면서 광 출력(복사광도)을 측정하였다. 초기 광 출력 최고는 5.42 mW/sr이었고, 최소는 4.42 mW/sr이었다. 초기 평균 광 출력은 4.89 mW/sr이었다. 60°C에서 840시간 on 동작 후 광 출력 최고는 5.28 mW/sr이었고, 최소는 4.18 mW/sr이

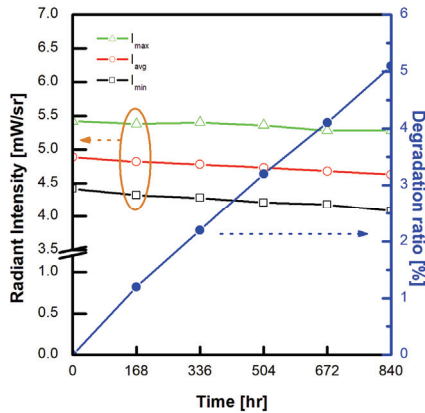


Fig. 7. Radiant intensity of 880 nm LED as a function of time at 60°C for 840 hours.

었다. 840시간 후 평균 광 출력은 4.63 mW/sr로 감소하였고, 이때 초기 값 대비 광 출력 평균은 약 5.1% 감소하였다. 이는 880 nm LED의 광 출력이 평균적으로 감소하였다는 것을 의미한다.

평균 광 출력 열화 데이터와 아레니우스 열화 모델 식 (3)에서 880 nm NIR LED의 α 는 6.504×10^{-5} 이다. 식 (4)에 광 출력 열화를 대입하면 60°C에서의 수명은 5,484시간이다. 식 (5)를 이용하여 40°C에서의 L'_{70} 을 구하면,

$$L'_{70} = 5,484 \times \exp \left[\frac{0.65}{8.62 \times 10^{-5}} \cdot \left(\frac{1}{313} - \frac{1}{333} \right) \right] \quad (8)$$

$$= 23,307 [hr]$$

위 계산식을 통하여 40°C를 기준으로 하여 880 nm NIR LED의 평균 수명 시간은 23,307시간이다.

3.4 956 nm NIR LED의 열화 데이터

그림 8은 956 nm NIR LED의 열화 데이터를 나타내고 있다. 매 168시간마다 956 nm NIR LED에는 50 mA의 전류를 공급하면서 광 출력(복사광도)을 측정하였다. 초기 광 출력 최고는 4.74 mW/sr이었고, 최소는 4.13 mW/sr이었다. 초기 광 출력 평균은 4.74 mW/sr이었다. 60°C에서 840시간 on 동작 후, 광 출력 최고는 4.59 mW/sr이었고, 최소는 3.35 mW/sr이었다. 840 시간 후 광 출력 평균은 4.03 mW/sr로 감소하였고, 이때 초기 값 대비 광 출력 평균은 약 10.8% 감소하였다. 이는 956 nm LED의 광 출력이 평균적으로 감소하였다는 것을 의미한다.

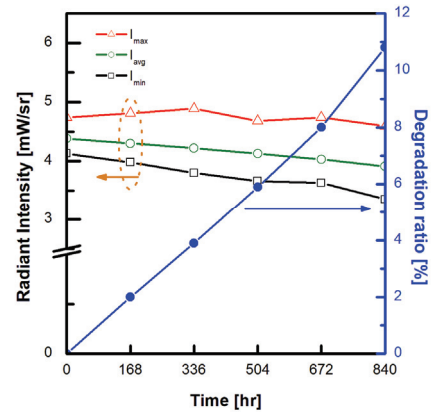


Fig. 8. Radiant intensity of 956 nm LED as a function of time at 60°C for 840 hours.

평균 광 출력 열화 데이터와 아레니우스 열화 모델 식 (3)에서 956 nm NIR LED의 α 는 7.134×10^{-5} 이다. 식 (4)에 광 출력 열화를 대입하면 60°C에서의 수명은 5,000시간이다. 식 (5)를 이용하여 40°C에서의 L'_{70} 을 구하면,

$$L'_{70} = 5,000 \times \exp \left[\frac{0.65}{8.62 \times 10^{-5}} \cdot \left(\frac{1}{313} - \frac{1}{333} \right) \right] \quad (9)$$

$$= 21,250 [hr]$$

위 계산식을 통하여 40°C를 기준으로 하여 956 nm NIR LED의 평균 수명 시간은 21,250시간이다.

4. 결론

본 논문에서는 다파장 LED 모듈을 사용하는 LED 치료기에서 수명을 예측하기 위하여 IR LED (650 nm)와 NIR LED (830 nm, 880 nm, 956 nm)를 사용하여 플렉시블 LED 모듈을 제작하였다. 아레니우스 열화 모델의 광 출력 열화를 산출을 위하여 LED 치료기기의 최대 사용 온도 조건인 60°C에서 고온 동작 시험을 진행하였다. 매 168시간마다 각 LED의 광 출력을 측정하였고, 실험 결과를 통하여 60°C에서의 수명 값을 산출하였고, 이때 산출된 수명 값을 이용하여 실제 사용 환경인 40°C에서의 LED들의 평균 수명 값을 산출하였다. 그 결과 40°C에서의 640 nm IR LED와 830 nm, 880 nm와 956 nm NIR LED의 평균 수명 시간은 각각 11,398시간, 33,295시간, 23,307시간과 21,250시간이었고, IR LED가 전체 LED 모듈의 수명

을 결정한다는 것을 확인할 수 있었다.

본 논문을 통하여 IR과 NIR 파장을 가지는 다파장 LED 광 모듈을 제작하는 경우, 모듈의 수명은 IR LED에 의하여 결정된다는 것을 고온 동작 시험과 수명 예측 모델을 활용하여 확인할 수 있었다. 향후 전압 및 전류의 변동 및 기계적 스트레스가 다파장 LED 모듈에 미치는 영향을 연구할 예정이다.

ORCID

Dong Pyo Kim

<https://orcid.org/0000-0003-3860-7003>

REFERENCES

- [1] M. E. de Abreu Chaves, A. R. Araújo, S. F. Santos, M. Pinotti, and L. S. Oliverira, *Photomed. Laser Surg.*, **30**, 172 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1089/pho.2011.3119>]
- [2] K. D. Desmet, D. A. Paz, J. J. Corry, J. T. Eells, M.T.T. Wong-Riley, M. M. Henry, E. V. Buchmann, M. P. Connelly, J. V. Dovi, H. L. Liang, D. S. Henshel, R. L. Yeager, D. S. Millsap, J. Lim, L. J. Gould, R. Das, M. Jett, B. D. Hodgson, D. Margolis, and H. T. Whelan, *Photomed. Laser Surg.*, **24**, 121 (2006). [DOI: <http://doi.org/10.1089/pho.2006.24.121>]
- [3] C.C.S. Martignago, C. R. Tim, L. Assis, V. R. Da Silva, E.C.B.D. Santos, F. N. Vieira, N. A. Parizotto, and R. E. Liebano, *Lasers Med. Sci.*, **35**, 157 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s10103-019-02812-6>]
- [4] C. E. Black, E. Zhou, C. M. DeAngelo, I. Asante, S. G. Louie, N. A. Petasis, and M. S. Humayun, *Front. Chem.*, **8**, 769 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00769>]
- [5] O. Ibe, E. L. Morency, P. Sosa, and L. Burkow-Heikkinen, *Healthy Aging Res.*, **4**, 1 (2015).
- [6] J. T. Kim, S. B. Bae, and D. H. Youn, *Electron. Telecom. Trends*, **25**, 59 (2010).
- [7] B. A. Russel, N. Kellett, and L. R. Reily, *J. Cosmet. Laser Ther.*, **7**, 196 (2005). [DOI: <https://doi.org/10.1080/14764170500370059>]
- [8] A.P.C. De Sousa, J. N. Santos, J. A. dos Reis, T. A. Ramos, J. de Souza, M.C.T. Cangussú, and A.L.B. Pinheiro, *Photomed. Laser Surg.*, **28**, 547 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1089/pho.2009.2605>]
- [9] I. H. Park, *J. Biomed. Eng. Res.*, **40**, 125 (2019).
- [10] Y. W. Kim, C. H. Kim, and W. S. Choi, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **33**, 418 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2020.33.5.418>]
- [11] S. I. Park, G. S. Kim, and C. H. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **31**, 122 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2018.31.2.122>]
- [12] S. H. Kim, D. Y. Lee, W. S. Kim, and N. Jang, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **28**, 57 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2015.28.1.57>]