

이중 음전극을 갖는 나노 셀 OLED의 열 분포 해석

장경욱 

가천대학교 전기공학과

Thermal Distribution Analysis of Nano Cell OLED with Double Cathode

Kyung-Uk Jang

Department of Electrical Engineering, Gachon University, Seongnam 13120, Korea

(Received February 13, 2025; Revised February 16, 2025; Accepted February 18, 2025)

Abstract: The thermal management issue in OLED (organic light emitting diode) devices has a significant impact on the efficiency, reliability, and life time of the device. In particular, in OLED systems with multipolar or double cathode electrodes, it is important to accurately interpret the effect of heat generated by current flow between electrodes on the emitting layer. In this study, the governing equation was established based on the heat conduction equation to mathematically model and analyze this heat distribution, and the heat distribution analysis was performed using the COMSOL program. It was confirmed that the temperature generated in the OLED with the double cathode structure reached a maximum of 343.157 K centered on the emitting layer. The heat distribution generated in the proposed OLED structure with the double cathode electrodes was confirmed to be highly distributed in the center toward the double cathode electrodes, which is believed to be because the arrangement of the double cathode electrodes improves the symmetrical distribution of temperature while reducing power consumption.

Keywords: Double cathode, OLED, Emission layer, Thermal distribution, COMSOL

1. 서론

유기 발광다이오드(OLED)는 뛰어난 화질과 얇은 디자인 등으로 다양한 전자기기에서 널리 사용되고 있다. OLED 디스플레이는 각 픽셀이 개별적으로 발광하는 특성 덕분에 뛰어난 색 재현력과 고대비를 제공하지만, 그럼에도 불구하고 발열로 인한 성능 저하 및 수명 단축이 중요한 문제로 대두되고 있다. OLED의 주요 발열 원인은 전력 소모와 관련이 있으며, 이는 유기 재료의 특성과 직접적인 연관이 있다 [1,2].

본 연구에서는 기판위에 이중 음극 전극층, 전자 주입층, 전도층, 발광층, 정공 전도층 및 양극 전극층으로 구성된 OLED의 발광층에서 발생하는 발열에 의한 열화 현상의 원인과 그로 인한 성능 저하를 분석하고, 이를 해결하기 위해서 이상적인 OLED 구조를 제시하고 제시된 OLED에 대해서 유한요소법 기반의 COMSOL 프로그램에 의한 열 분포 해석을 진행하여 열화기구를 살펴보았다.

특히, 고휘도를 실현하면서 소비전력이 작은 이중 음극 구조의 OLED(유기 발광 다이오드) 소자에서의 열 관리 문제는 소자의 효율성, 신뢰성 및 수명에 큰 영향을 미친다. 특히, 다중극 또는 이중 음전극을 갖는 OLED 시스템에서는 전극 간의 전류 흐름에 의해 발생하는 열이 발광층에 미치는 영향을 정확히 해석하는 것이 중요하다.

본 연구는 이러한 열 분포를 수학적으로 모델링하고 분석하기 위해 열전도 방정식을 기반으로 지배 방정식을 제

✉ Kyung-Uk Jang; kujang@gachon.ac.kr

Copyright ©2025 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

안하고 COMSOL 프로그램을 이용하여 열 분포 해석을 진행하였다.

2. 실험 방법

2.1 OLED의 모델링 및 열전도 지배 방정식

그림 1은 가로, 세로 각각 100 nm 크기의 이중 음전극 구조를 갖는 OLED 구조를 보이고 있다. 표 1에는 OLED 모델에 적용된 각 층의 재료 및 각 층의 두께를 보이고 있다.

2.2 열전도 지배 방정식

이중 음전극을 갖는 OLED 발광층에서의 열분포는 기본적으로 푸리에 법칙(Fourier's Law)에 의해 설명될 수 있

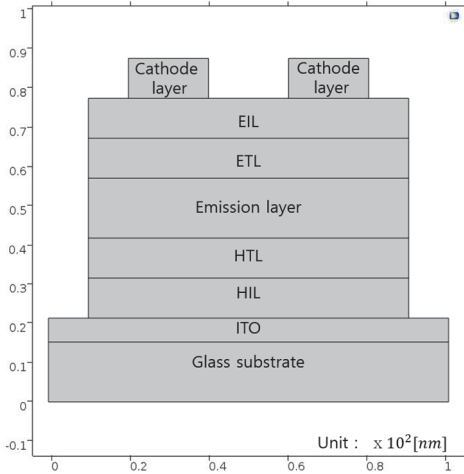


Fig. 1. Diagram of OLED with double cathode.

Table 1. Materials using in OLED layers with double cathode.

Layer	Material	Thickness [nm]
Cathode	Al	10
EIL	Alq ₃	10
ETL	BCP	10
Emission layer	PVK	15
HTL	TPD	10
HIL	CuPc	10
Anode	ITO	5

다 [3]. 이 법칙은 물질 내에서 열의 전달을 공간적 변화에 따른 온도의 변화로 정의하며, 이는 다음과 같은 열전도 방정식으로 나타낼 수 있다 [4].

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \tag{1}$$

여기서 T(x, y, z, t)는 온도 함수, α는 열 확산 계수, ∇² T는 온도의 라플라시안(공간에 따른 온도의 변화)을 나타낸다. OLED 시스템에서 열은 주로 발광층을 따라 전도되며, 이 방정식은 시간에 따른 온도의 변화를 기술한다. 다중극 또는 이중 음전극을 갖는 OLED의 경우, 전극 간 전위차에 의해 발생하는 전류 흐름에 의해 열이 발생한다. 전류는 전극의 전기 저항을 지나면서 일부가 열로 변환된다. 이 과정에서 발생하는 열 발산량 Q는 Joule 열로 표현되며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = \sigma J^2 \tag{2}$$

여기서 σ는 전극 재료의 전기 전도도, J는 전류 밀도이다. 열 발생량은 전류 밀도에 비례하며, 이 열은 전극과 발광층 간의 경계를 통해 발광층으로 전달된다. 전극에서 발생한 열은 발광층에 전달되어 해당 영역의 온도를 증가시키며, 이는 발광 효율과 장치의 성능에 영향을 미친다 [5].

이렇게 발생한 열이 OLED 내에서 어떻게 분포하는지 해석하기 위해서 COMSOL 5.2 프로그램을 통하여 다음 식 (2)로 표현되는 지배 방정식과 일반 경계 조건을 이용하여 해석을 진행하였다 [6,7].

$$e_a \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (-c \nabla u - \alpha u + \gamma) + \beta \cdot \nabla u + \alpha u = f \tag{3}$$

$$\therefore \nabla = \left[\frac{\partial}{\partial r}, \frac{\partial}{\partial z} \right]$$

열 분포 해석에서 경계 조건이 중요한 역할을 한다. OLED 소자의 발광층과 전극 간의 경계에서는 열이 전도되며, 열 방출의 방식에 따라 경계 조건을 설정할 수 있다. 논문에서는 다음의 고정 온도 경계조건 식 (3)과 열 방출 조건 식 (4)를 고려하였다 [7].

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \tag{4}$$

여기서 k는 재료의 열전도도, n은 경계에서의 법선 방향이다. 이 조건은 열 흐름이 특정 경계에서 고정된 온도로 유지되는 경우에 적용된다.

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_{\infty}) \quad (5)$$

여기서 h 는 대류 열전달 계수, T_{∞} 는 외부 환경의 온도이다. 이 조건은 발광층에서 외부로의 열 방출을 고려한 것이다.

2.3 실험 결과 및 검토

그림 2는 설계된 이중 음극 OLED에 대해서 유한 요소법을 이용하기 위해서 요소로 분할된 매쉬 해석 결과를 보

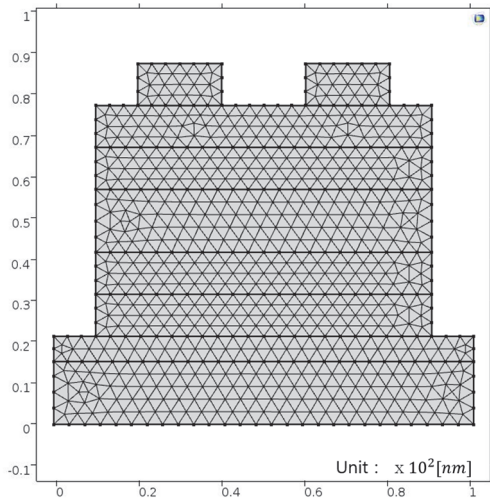


Fig. 2. Mesh analysis of OLED with double cathode.

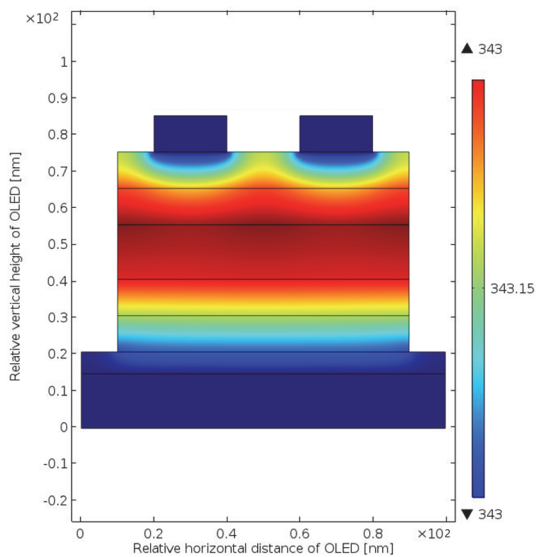


Fig. 3. Thermal distribution of OLED with double cathode.

이고 있다.

그림 3에는 요소 분할된 구조에 대해서 지배 방정식과 경계조건을 적용하여 COMSOL로 해석된 이중 음극을 갖는 OLED의 열분포를 보이고 있다. 최고 온도는 343 K 정도에 이르는 것을 확인할 수 있었다.

그림 4는 이중 음극 구조의 OLED에서 한쪽 음극 중심부에서 절단된 단면의 열 분포를 보이고 있으며, 최고 온도는 343.15 K까지 이르는 것을 확인할 수 있었다.

그림 5는 이중 음극 구조 OLED의 중심부를 절단한 단면에서 열 분포 곡선을 보이고 있으며, 최고 온도 343.157 K 부근까지 이르는 것을 알 수 있었다. 그림 5에서 알 수 있는 바와 같이 이중 음극을 갖는 OLED의 경우 열분포가 좌우 대칭성이 벗어나기 때문에 좌우 대칭 열 분포 관계가 되도록 다중 전극을 설계할 때 열분포가 대칭이 되도록 전극의 기하학적 위치를 정밀하게 조정하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

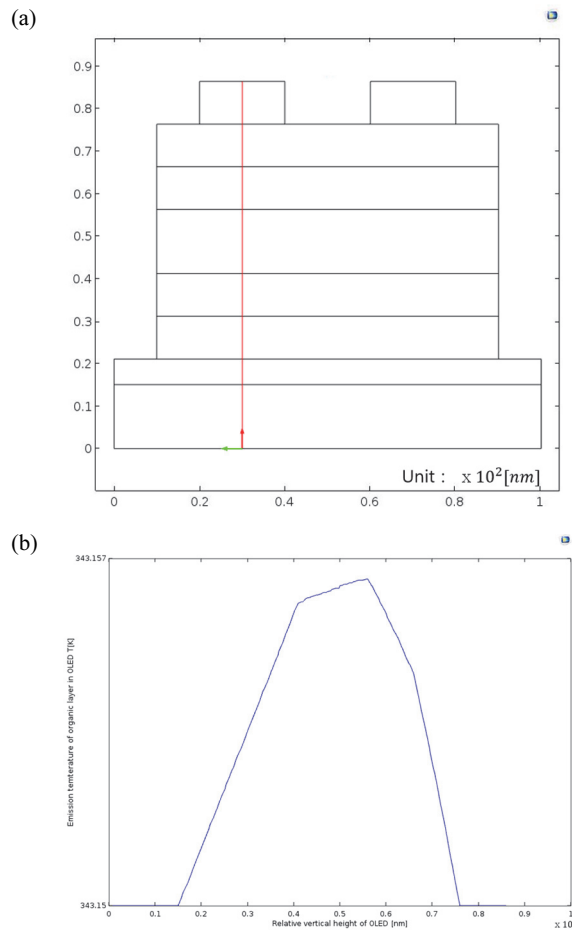


Fig. 4. Emission temperature of OLED center section. (a) Cross section position and (b) thermal distribution.

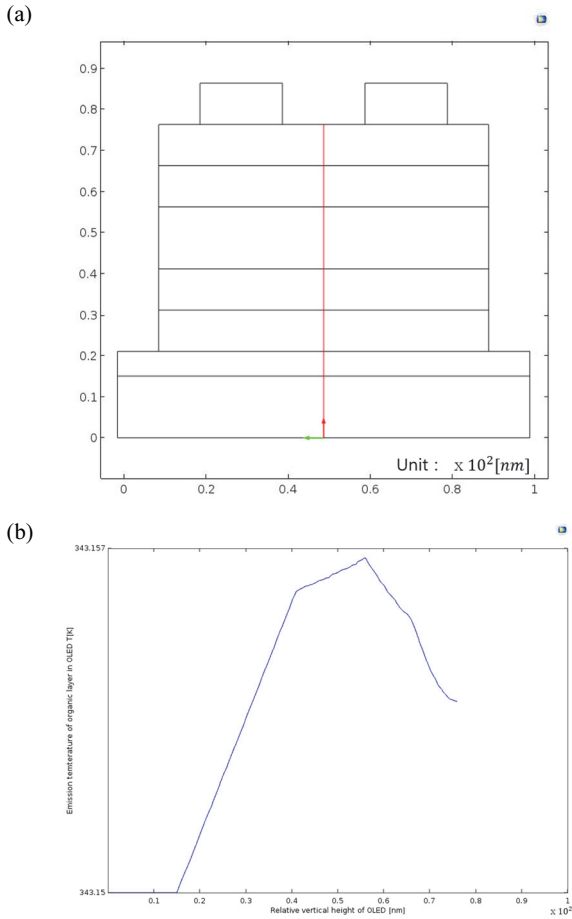


Fig. 5. Thermal distribution of organic layer. (a) Cross section position and (b) thermal distribution.

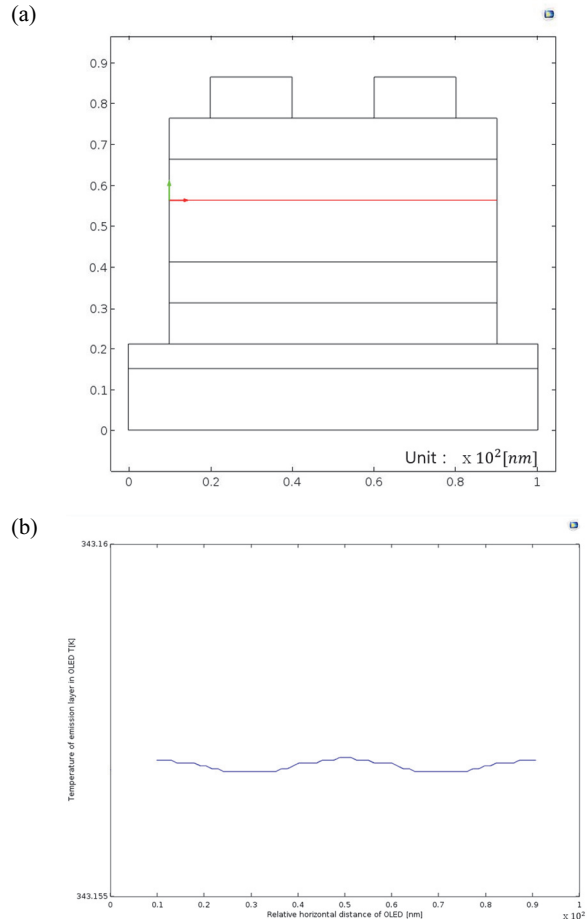


Fig. 6. Thermal distribution of emission layer. (a) Cross section position and (b) thermal distribution.

그림 6은 이중 음극 구조를 갖는 OLED의 발광층에서의 발산되는 열을 보이고 있는데, 그림에서 알 수 있는 바와 같이 전극이 분포된 위치에 따라서 열 집중 현상이 나타나서 열의 분포 균질성을 떨어뜨려서 열분포의 진폭이 보이는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 다중 음전극 설계시에 음전극 배치 위치를 최적으로 설계하지 않으면 열진폭이 존재하여 열화가 크게 진행될 것으로 판단된다.

3. 결론

본 연구에서는 고휘도를 실현하면서 소비전력이 작은 이중 음전극 구조를 갖는 OLED의 발광층에서의 열분포를 해석하기 위한 수학적 지배 방정식 모델을 제시하고, 이를 통해 이중 음전극 OLED 소자의 최적화 설계 가능성을 COMSOL로 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 이중 음전극 구조를 갖는 OLED에서 발생된 온도는 발광층을 중심으로 최고 343.157 K까지 이르는 것을 확인할 수 있었다.
- 2) 제시된 이중 음전극을 갖는 OLED 구조에서 발생된 열 분포는 이중 음전극 쪽으로 온도 분포가 중심에서 높게 분포하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 이중 음전극의 배치를 최적으로 하면 소비전력은 작게 하면서 고휘도의 발광 효율은 유지하고 온도의 대칭분포를 향상시켜서 수명을 길게 할 수 있을 것으로 판단된다.

위의 결과를 바탕으로 다중 음전극을 갖는 OLED를 설계할 때 가능한 온도 분포가 대칭으로 균일하게 나타나게 음전극을 배치하면 낮은 소비전력으로 휘도가 균일하게 유지되면서 장수명의 OLED를 실현할 수 있을 것으로 판단된다.

ORCID

Kyung-Uk Jang

<https://orcid.org/0000-0002-0599-8370>

REFERENCES

- [1] C. Wu, K. Shi, S. Li, J. Yan, Z. Q. Feng, K. N. Tong, S. W. Zhang, Y. Zhang, D. Zhang, L. S. Liao, Y. Chi, G. Wei, and F. Kang, *EnergyChem*, **6**, 100120 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.enchem.2024.100120>
- [2] A. Alvarez-Quesada, G. González-García, G. Ramos-Ortiz, J. C. Carrillo-Sendejas, and J. L. Maldonado, *Opt. Mater.*, **159**, 116572 (2025).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.116572>
- [3] D. K. Almutairi, *Heliyon*, **10**, e24353 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24353>
- [4] P. Boregowda and G. R. Liu, *Eng. Anal. Bound. Elem.*, **155**, 652 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2023.07.011>
- [5] L. Pohl, Z. Kohári, and A. Poppe, *Microelectron. Reliab.*, **85**, 198 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2018.05.002>
- [6] K. U. Jang, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **37**, 309 (2024).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2024.37.3.11>
- [7] Altsoft, *Comsol Multiphysics Guide* (2023).
doi: [https://doi.org/10.1016/S1350-4789\(10\)70335-4](https://doi.org/10.1016/S1350-4789(10)70335-4)