

교류전원 구동방식에 의한 형광 OLED의 발광 특성

서정현¹, 김지현¹, 주성후^{1,a}

¹ 대전대학교 신소재공학과

Emission Characteristics of Fluorescent OLED with Alternating Current Power Source Driving Method

Jung-Hyun Seo¹, Ji-Hyun Kim¹, and Sung-Hoo Ju^{1,a}

¹ Department of Advanced Materials Science & Engineering, Daejin University, Pocheon 487-711, Korea

(Received November 25, 2013; Accepted January 10, 2014)

Abstract: To operate organic light emitting device (OLED) with alternating current (AC) power source without AC/DC(direct current) converter, we fabricated the fluorescent OLED and measured the emission characteristics with AC and DC. The OLED operated by AC showed higher maximum current efficiency of 8.2 cd/A and maximum power efficiency of 8.3 lm/W. But current efficiency and power efficiency of AC driven OLED showed worse than DC driven OLED at high voltage above 10 V. This result can be explained by the peak voltage of AC was $\sqrt{2}$ times than DC, In case of low driving voltage the emission characteristics were improved by the peak voltage of AC, but in case of high driving voltage the emission efficiencies were decreased by the roll off phenomena. Finally, serial OLED arrays using twelve OLEDs driven by AC 110 V showed average voltage of 9.17 V, voltage uniformity of 99.0%, average luminance of 1,175 cd/m², luminance uniformity of 94.4%.

Keywords: AC (alternating current), DC (direct current), OLED, Peak voltage

1. 서론

OLED (organic light emitting device)는 백열등, 형광등, LED (light emitting diode) 광원 등의 점 혹은 선 광원 형태의 조명들과 달리 별도의 광학설계 없이 광원자체로 평면형태의 조명 구현이 가능하고, 발광 색의 자유도가 매우 우수하여 태양광에 가까운 풍부한 가시광선 영역을 가지고 있는 고연색성의 조명 구현이 가능할 뿐만 아니라 디자인 자유도가 매우

우수하여 다양한 용도와 다양한 형태의 조명으로 사용이 가능하다 [1].

전원공급 방식에 있어서 OLED는 일반적으로 직류 (direct current, DC) 전원을 사용하기 때문에 일반 가정환경에서 OLED를 조명으로 사용하기 위해서는 반드시 교류 (alternating current, AC) 전원을 직류전원으로 변환하여 사용하여야 한다. LED 조명의 경우 LED 소자를 직렬로 배열하는 방법으로 AC / DC 변환기 없이 교류전원에서 구동하는 연구들이 진행되고 있다 [2]. OLED 조명에서도 AC / DC 변환기 없이 교류전원에 직접 연결하는 방법으로 구동이 가능한 OLED 소자를 제작할 수 있다면 OLED 조명의 구동부가 단순해져 제조단가를 낮출 수 있고, 전원 공급장치가 소비하는 전력만큼 전력절감이 가능하며,

a. Corresponding author: sunghooju@daejin.ac.kr

OLED 조명의 최대 장점인 디자인 자유도를 극대화할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 AC/DC 변환기 없이 교류전원에 직접 연결하여 동작하는 OLED를 구현하기 위하여 형광 OLED를 제작하고, 제작된 OLED에 교류 전원과 직류 전원을 연결하여 OLED를 구동하였다. 교류 전원과 직류 전원을 인가하여 구동한 OLED의 특성을 비교 분석하기 위하여 전류-전압-휘도 (I-V-L), 발광 효율, 발광 스펙트럼 및 색 좌표를 측정하였다.

2. 실험 방법

OLED를 제작하기 위하여 면저항 10 Ω/□의 ITO (indium tin oxide)가 증착된 유리 기판을 사용하여 1.0×10^{-6} torr 이하의 고진공에서 열 기상증착 방식을 사용하여 유기물 1.5 Å/s, LiF 0.5 Å/s, Al 2 Å/s의 증착 속도로 유기물 및 금속 박막을 증착하였다.

그림 1은 본 실험에 적용한 형광 OLED의 구조를 나타낸 것이다. 소자 구조는 ITO / 2-TNATA (4,4,4-tris(2-naphthylphenyl)-aminotriphenylamine) / NPB (N,N'-bis-(1-naphyl)-N,N'-diphenyl-1,1'-biphenyl-4,4'-diamine) / Alq₃ (tris(quinolin-8-olato) aluminum) : 1 vol.% Rubrene (5,6,11,12-tetraphenyl-naphthacene) / Alq₃ / LiF / Al으로 구성되어 형광 OLED를 제작하였다.

그림 2는 OLED에 교류전원을 인가하여 I-V-L을 측정하기 위한 측정 장치의 개략도를 나타낸 것이다. 교류전원 공급부의 경우 함수발생기와 변압기를 사용하여 60 Hz 주파수를 갖는 교류 전원을 0.5 V씩 단계적으로 증가시켜가며 전압을 인가하였다. 교류전원 인가 시 과전압 인가에 따른 OLED의 손상을 방지하기 위하여 OLED의 한쪽 단에 스위치를 달아 입력 전압을 디지털 멀티미터 (Hioki, 3280-10)로 측정하여 조정된 후에 전원을 인가하였다. OLED에 인가되는 교류 전류를 측정하기 위하여 교류 전류 측정이 가능한 디지털 멀티미터 (Yokogawa, TY520)를 전원 공급 장치와 OLED 사이에 직렬로 연결하였고, 전압은 전류측정 장치를 경유하는 과정에서 발생하는 전압 손실로 인한 오차를 최소화하기 위하여 OLED 부하 단에 디지털멀티미터 (Hioki, 3280-10)를 직접 연결하여 측정하였다. OLED 소자에 인가되는 교류 전압 파형 및 피크 전압은 디지털 오실로스코프 (Agilent, DSO-X-2012A)를 부하 단에 연결하여 측정하였다.

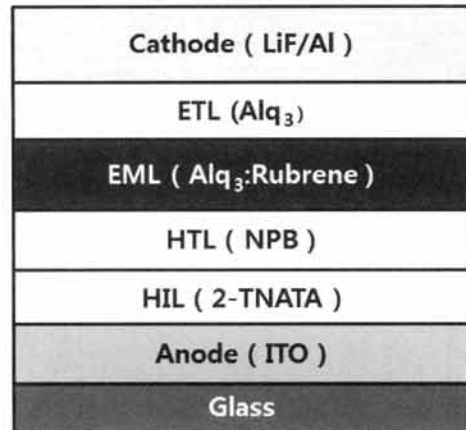


Fig. 1. Structure of fluorescent OLED.

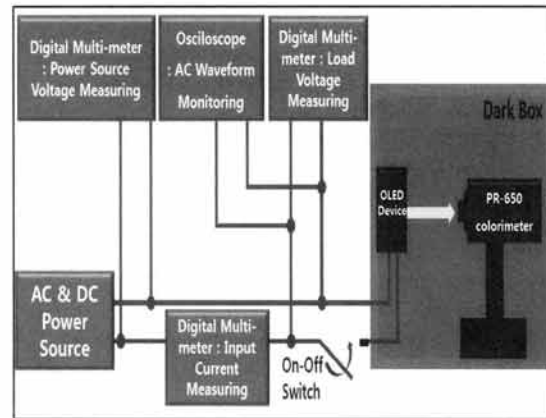


Fig. 2. Schematic diagram of I-V-L measurement system with alternating current power source.

직류 구동 방식과 교류 구동 방식의 OLED 휘도, 발광 스펙트럼은 Photo Research사의 PR-650 Spectrascan을 사용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 3(a)는 교류전원의 실효전압 (V_{rms})을 나타낸 것이고, 그림 3(b)는 교류전원을 인가한 OLED의 구동특성에 대한 것이다. 통상적인 교류전압은 첨두치 전압 (V_{pk})을 의미하는 것이 아니라 실효전압을 표현하는 것이다. 사용하는 교류전원은 60 Hz의 주파수와 임의의 첨두치 전압을 갖는 사인파이기 때문에 교류

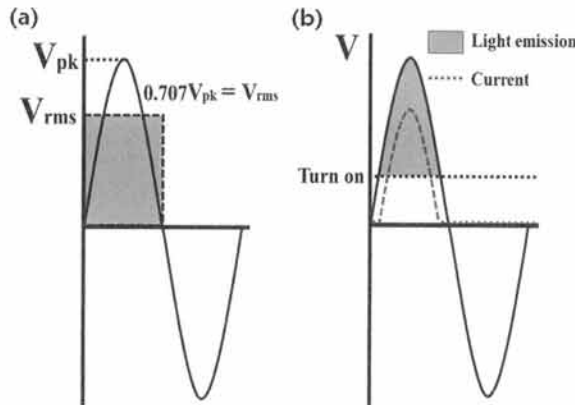


Fig. 3. (a) Effective values of AC voltage (V_{rms}) and (b) driving mechanism of OLED with AC power source.

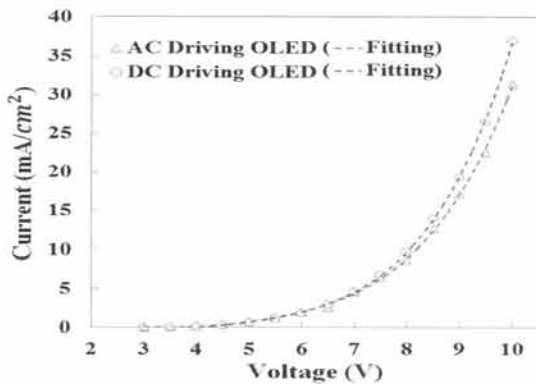


Fig. 4. Current density vs. applied voltage characteristics of fluorescent OLED with AC and DC power source.

파형의 1/4 주기에 대하여 식 (1)을 사용하여 적분함으로써 계산할 수 있다 [3].

$$V_s = \sqrt{\frac{1}{\pi/2} \int_0^{\pi/2} (V_{pk} \sin\theta)^2 \cdot d\theta} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot V_{pk} \quad (1)$$

식 (1)에서 V_s 는 교류전원의 실효 전압이며, V_{pk} 는 최대 전압을 의미한다. 식 (1)을 통해 교류전원에 대한 실효전압 값은 교류전원 최대 전압의 $1/\sqrt{2}$ 배이고, 교류전원의 첨두치 전압은 실효전압의 $\sqrt{2}$ 배이다. 따라서 직류전압과 이에 대응하는 교류전원의 실효전압을 형광 OLED에 인가하였다.

그림 3(b)는 교류전원인가에 따른 OLED 소자의 발광 영역과 전류 특성을 나타낸 것이다. OLED를 교

Table 1. Voltage - current - current increasing rate characteristics of OLED with DC power source.

V_{dc} (V)	I_{Vdc} (mA/cm^2)	$\frac{I_{Vdc}}{I_{(Vdc-1)}}$ (Times)
3	0.01	-
4	0.11	11
5	0.59	5.36
6	1.86	3.15
7	4.57	2.46
8	9.69	2.12
9	19.30	1.99
10	36.96	1.92

류 전원에서 구동시킬 경우 역방향 교류 전원 구간에서는 전류가 흐르지 않아 발광하지 않고, 순방향 교류 전원 구간에서만 전류가 흘러 문턱전압 이상에서 발광하기 때문에 전체 전원인가 영역 중 발광에 기여하는 구간은 50% 이하가 된다.

그림 4는 직류구동과 교류구동 OLED의 전압-전류 특성을 나타낸 것이다. 인가전압 6 V 이하 구간에서의 전류밀도는 교류구동 OLED가 더 높은 전류 밀도를 나타내었으나 인가전압 6 V 초과 구간에서는 직류구동 OLED가 더 높은 전류 밀도를 나타내었다. 이 결과에서부터 4차 다항함수의 적합식 (fitting function) 인 식 (2)와 식 (3)을 유추하였다.

$$I_{ac} = 0.0228 V_{ac}^4 - 0.4176 V_{ac}^3 + 3.1155 V_{ac}^2 - 10.336 V_{ac} + 12.505 \quad (2)$$

$$I_{dc} = 0.0313 V_{dc}^4 - 0.5883 V_{dc}^3 + 4.4251 V_{dc}^2 - 14.81 V_{dc} + 18.081 \quad (3)$$

식 2와 식 3은 각각 교류구동과 직류구동 OLED의 인가전압에 대한 전류밀도의 적합식으로, I_{dc} , I_{ac} , V_{dc} , V_{ac} 는 각각 직류구동과 교류구동 OLED의 전류밀도와 인가전압이다. 적합식에서 최고차항의 상수 값은 전압 증가에 따른 전류밀도의 기울기를 결정하는 값이므로 최고차항 상수가 0.0313인 직류구동 OLED가 0.0228인 교류구동 OLED보다 인가전압에 따른 전류밀도 증가율이 크다.

표 1은 직류전원을 인가한 OLED의 전류밀도 변화를 나타낸 것이다. 직류구동 OLED의 경우 3 V에서 4 V로 인가전압이 증가하면, 전류밀도는 $0.01 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 에서 $0.11 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 으로 약 11배가 증가하게 된다. 3 V의 교류전압을 인가한 경우의 전류밀도는 $0.22 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 로

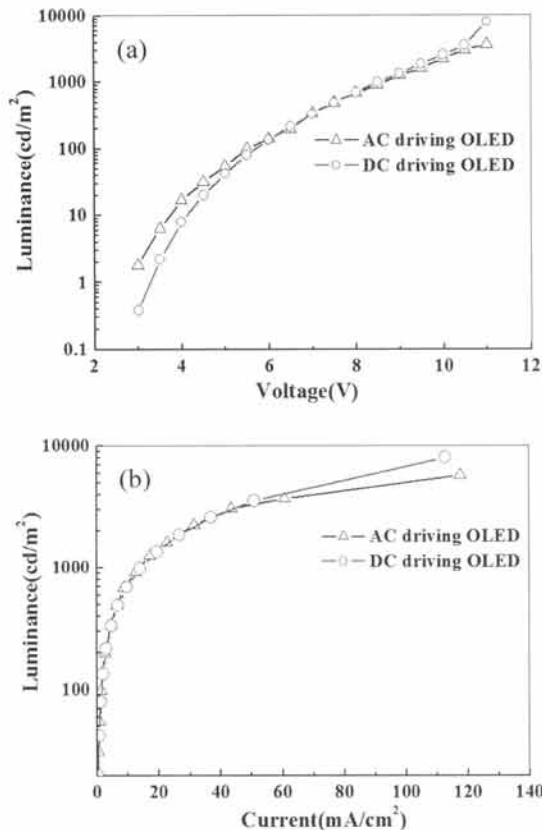


Fig. 5. Luminance characteristics of fluorescent OLED with AC and DC power source. (a) luminance vs. voltage and (b) luminance vs. current.

직류와 비교하여 22배의 전류가 흐르는 현상이 관측되었다. 이 현상은 3 V 교류전압의 최대 피크 전압은 $\sqrt{2}$ 배인 약 4.24 V로 실제 소자에는 최대 4.24 V가 인가되어 나타난 현상으로 설명할 수 있다. 그러나 인가전압이 증가함에 따라 흐르는 전류의 증가폭은 급격히 감소하는 경향을 나타내고, 교류전원이 인가되는 경우 소자에 전류가 흐르는 것은 순방향의 전원이 인가될 경우에만 전류가 흐르게 되어 50% 이하의 전류만이 소자를 통하여 흐르게 된다. 따라서 저전압 구간에서는 교류 전원의 첨두치 전압이 교류구동 OLED의 비발광 영역에 의한 전류밀도 특성을 충분히 보상해 주지만, 전압 상승에 따라 첨두치 전압에 의한 전류밀도 보상은 점차 낮아지게 되어 일정 이상의 전압에서는 비발광 영역에 의한 영향이 커지게 되어 직류구동 OLED에 비해 교류구동 OLED가 낮은 전류 밀도를 나타내게 된다. 실험 결과에서는 6.1 ~ 6.2 V

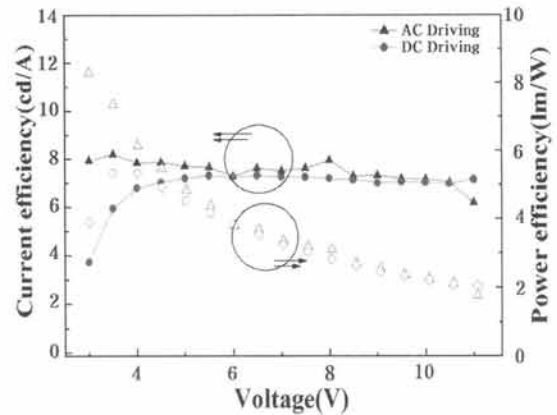


Fig. 6. Efficiency vs. applied voltage characteristics of fluorescent OLED with AC and DC power source.

구간에서 직류구동과 교류구동 OLED의 전류밀도가 거의 같아져 이를 기준으로 낮은 전압 구간에서는 최대 피크전압의 영향이 지배적인 구간이고, 높은 전압 구간은 비발광 구간의 영향이 지배적인 구간으로 구분할 수 있다. 적합식에서 직류구동과 교류 구동 OLED의 전압이 같아지는 구간은 식 2와 3을 같은 값이라 놓고 4차 다항식의 해를 구하여 계산할 수 있다. 적합식을 통해 얻어낸 교류구동과 직류구동 OLED의 전류 밀도가 같아지는 구간은 약 6.15 V를 나타내었다.

그림 5는 직류구동과 교류구동 OLED의 발광휘도를 나타낸 것이다. 그림 5(a)에서 인가전압 6 V 이하에서는 교류구동 OLED의 발광휘도가 직류구동 OLED보다 높은 값을 나타내었으나, 보다 높은 인가전압에서는 낮은 발광휘도를 나타내었다. 그림 5(b)의 전류밀도에 대하여는 낮은 전류밀도에서는 직류구동과 교류구동 OLED의 발광휘도가 유사한 값을 나타내었으나, 50 mA/cm² 이상의 전류밀도에서 교류구동 OLED의 휘도가 감소하는 현상이 나타났다.

그림 6은 직류구동과 교류구동 OLED의 전류발광 효율과 전력발광효율을 나타낸 것이다. 교류구동 OLED는 최대 8.2 cd/A, 8.3 lm/W의 발광효율을 나타내어 직류구동 OLED의 7.3 cd/A와 5.3 lm/W에 비해 각각 12.1%, 55.4%의 효율이 개선된 결과를 나타내었다. 이러한 현상은 저전압에서 최대 피크 전압에 의한 개선에 의한 것으로 설명할 수 있다. 그러나 인가전압이 증가함에 따라 교류 구동에 의한 효율의 증가는 줄어들어 10 V 이상의 고전압에서는 역전되는 현상이 나타났다. 10 V 이상의 인가전압에서 교류 구

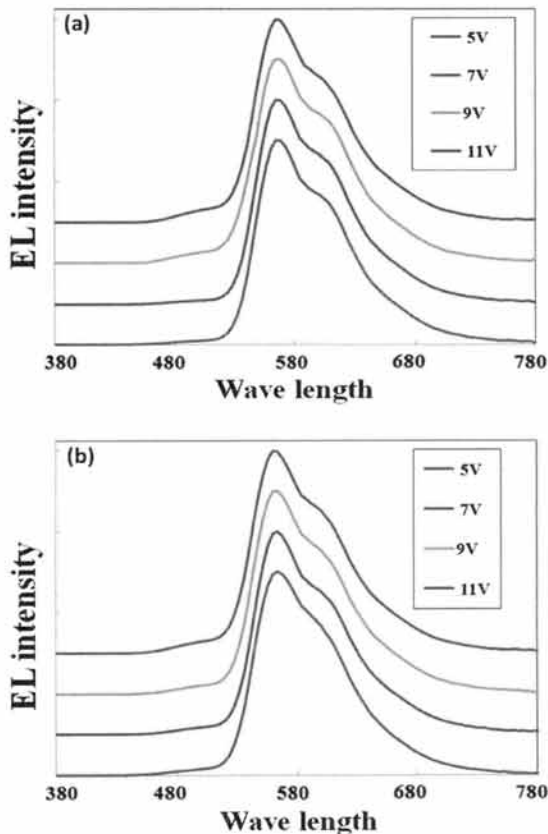


Fig. 7. EL spectra of fluorescent OLED with (a) DC power source, and (b) AC power source.

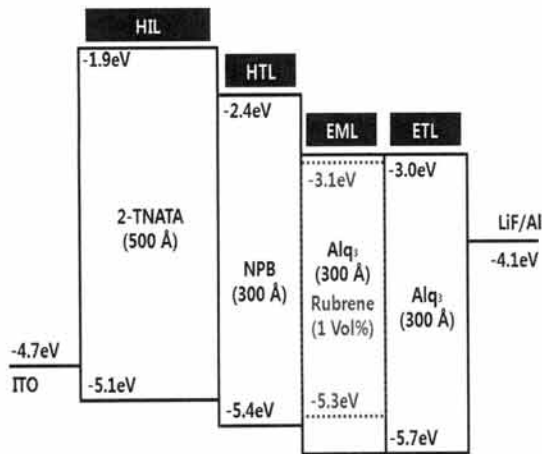


Fig. 8. Energy band diagram of fluorescent OLED.

동의 휘도와 효율이 감소하는 현상은 직류구동 보다 상대적으로 $\sqrt{2}$ 배 높은 최대 피크 전압으로 운송자의

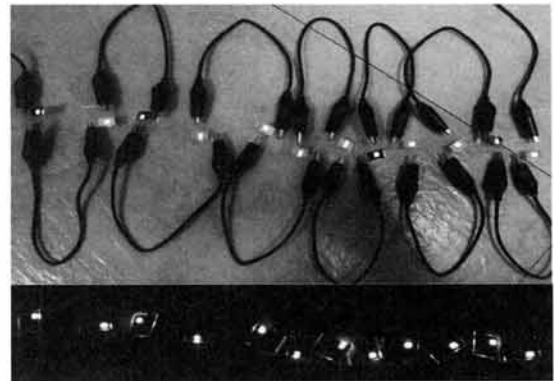


Fig. 9. OLED with 110 V AC power source.

과잉 주입을 유발하여 발생하는 roll-off 현상에 의한 특성 저하로 설명할 수 있다. 따라서 교류구동 OLED의 최대피크전압은 저전압 저전류, 저휘도 영역에서는 발광효율 개선에 유리하게 작용하였다. 그러나 고전압, 고전류, 고휘도 영역에서는 직류구동 OLED가 보다 우수한 특성을 나타내었다.

그림 7은 직류구동과 교류구동 방식 OLED의 전압에 따른 발광스펙트럼 변화를 나타낸 것이다. 두 OLED 소자 모두 전압 증가에 따라 520 nm 피크 대역의 발광기여도가 증가함을 알 수 있다. 해당 녹색 영역의 발광은 Alq₃에 의한 발광이다. OLED 소자구조에서 전자 수송층의 발광이 전압상승에 따라 점차적으로 커짐을 확인할 수 있다 [4,5]. 그 결과, 색 좌표도 인가전압이 증가함에 따라 점차 녹색 영역으로 이동하였다. 발광스펙트럼 및 색 좌표의 이동은 형광 OLED의 에너지띠 구조로 설명할 수 있다.

그림 8은 실험에 적용된 형광 OLED 소자의 에너지띠를 나타낸 것이다. 소자 구조에서 2-TNATA / NPB를 통과하여 정공이 주입되는 HOMO (highest occupied molecular orbital) 준위의 에너지 차이는 각각 0.3 eV이고, Alq₃를 통하여 전자가 주입되는 LUMO (lowest unoccupied molecular orbital) 준위의 차이가 0.7 eV인 NPB와 Alq₃ : Rubrene 계면에서 전자와 정공의 재결합에 의하여 여기자를 형성하여 발광하게 된다. 이때 전압이 증가함에 따라 HOMO 준위의 정공은 NPB와 Alq₃ : Rubrene 계면에서 갖는 0.3 eV의 에너지 장벽을 뛰어넘을 수 있는 에너지를 갖게 되어 발광층 물질과 동일한 물질로 구성된 전자 수송층 (Alq₃)까지 도달하여 전자와 재결합을 일으킬 수 있어 녹색발광이 나타날 수 있으며 전압이 증가함

Table 2. Voltage and luminance characteristic of fluorescent OLED with 110 V AC power.

OLED	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Average	Uniformity
Voltage (V)	9.1	9.2	9.1	9.2	9.1	9.2	9.2	9.1	9.2	9.2	9.2	9.2	9.17	99.0%
Luminance (cd/m ²)	1,157	1,205	1,131	1,188	1,122	1,161	1,204	1,171	1,228	1,183	1,206	1,144	1,175	94.4%

에 따라 그 기여도가 점차 증가할 수 있다.

발광 스펙트럼 및 색 좌표 이동의 또 다른 원인으로는 형광 모체에 의한 녹색 발광이다. 인가전압이 증가하면 여기자가 증가하게 되어 형광 모체인 Alq₃ 내에 활성제로 사용한 Rubrene의 첨가량이 낮아 형광 모체인 Alq₃에 의한 녹색 발광이 나타날 수 있다 [5].

그림 9는 총 12개의 OLED 소자를 직렬로 연결하여 110 V의 교류전원을 인가하여 점등시킨 사진이다. 110 V로 구동되는 각각의 OLED 소자에 걸리는 전압과 휘도를 측정하여 표 3에 나타내었다. 각 소자에 인가되는 평균전압은 9.17 V, 평균휘도는 1,175 cd/m²로 이에 대한 균일도는 각각 99.0%, 94.4%의 우수한 특성을 나타내었다, 이상의 결과로부터 OLED의 경우에서도 교류전원 구동방식에 의한 구동 가능성을 확인하였다.

4. 결론

OLED를 AC/DC 변환기 없이 교류전원에 직접 연결하여 동작하는 OLED를 구현하기 위하여 형광 OLED를 제작하고, 제작된 OLED에 교류 전원과 직류 전원을 연결하여 OLED의 특성을 비교하였다.

전압-전류 특성은 인가전압 6 V 이하 구간에서의 전류밀도는 교류구동 OLED가 더 높은 전류 밀도를 나타내었으나 인가전압 6 V 초과 구간에서는 직류구동 OLED가 더 높은 전류 밀도를 나타내었다. 이 현상은 저전압 구간에서 교류 전원의 침투 전압이 교류구동 OLED의 비발광 영역에 의한 전류밀도 특성을 충분히 보상해 주지만, 전압 상승에 따라 침투 전압에 의한 전류밀도 보상이 점차 낮아지게 되어 일정 전압 이상에서는 비발광 영역에 의한 영향이 커지게 되어 나타난 결과이다. 직류구동과 교류구동 OLED의 발광휘도는 인가전압 전류 밀도와 유사하게 6 V 이하에서는 교류구동 OLED의 발광휘도가 직류구동

OLED보다 높은 값을 나타내었으나, 6 V 초과 인가 전압에서는 낮은 발광휘도를 나타내었다.

전류발광효율과 전력발광효율은 교류구동 OLED에서 최대 8.2 cd/A, 8.3 lm/W의 발광효율을 나타내어 각각 12.1%, 55.4%의 효율이 개선된 결과를 나타내었다. 그러나 인가전압이 증가함에 따라 교류구동에 의한 효율의 증가는 줄어들어 10 V 이상의 고전압에서는 역전되는 현상이 나타났다. 10 V 이상의 인가전압에서 교류구동의 휘도와 효율이 감소하는 현상은 직류구동보다 상대적으로 $\sqrt{2}$ 배 높은 최대 피크 전압으로 운송자의 과잉주입을 유발하여 발생하는 roll-off 현상에 의한 특성 저하로 설명하였다.

총 12개의 OLED 소자를 직렬로 연결하여 110 V의 교류전원을 인가하여 점등시킨 결과 각 소자에 걸리는 평균전압은 9.17 V, 평균휘도는 1,175 cd/m², 균일도는 각각 99.0%, 94.4%의 우수한 특성을 나타내었다, 이상의 결과로부터 OLED의 경우에서도 교류전원에 의한 구동 가능성을 확인하였다.

감사의 글

본 논문은 경기도 기술개발사업의 사업비지원 (과제번호 C131302)에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] H. D. Chun, H. S. Na, and S. H. Ju, *J. KIEEME*, 26, 451 (2013).
- [2] T. Tamura, T. Setomoto, and T. Taguchi, *Journal of Luminescence*, 87, 1180 (2000).
- [3] J. D. Irwin and R. Mark Nelms, *Basic Engineering Circuit Analysis* (2006).
- [4] A. Uddin, C. B. Lee, and J. Wong, *Journal of Luminescence*, 131, 1037 (2011).
- [5] T. Li, W. Li, X. Li, L. Han, B. Chu, M. Li, Z. Hu, and Z. Zhang, *Solid-state Electronics*, 53, 120 (2009).