

## 교류구동방식에 의한 형광 OLED의 주파수 응답 특성

서정현, 주성후 

대진대학교 신소재공학과

### Frequency Response Characteristics of Fluorescent OLED with Alternating Current Driving Method

Jung-Hyun Seo and Sung-Hoo Ju

Department of Advanced Materials Science & Engineering, Daejin University, Pocheon 11159, Korea

(Received August 21, 2018; Revised September 3, 2018; Accepted September 4, 2018)

**Abstract:** To study the frequency response characteristics of alternating-current-driven organic light-emitting diodes (OLEDs), we fabricated blue-fluorescent OLEDs and analyzed their electroluminescent characteristics according to the alternating current voltage and frequency. The luminance-frequency characteristics of alternating-current-driven OLED was similar to that of a low-pass filter, and the luminance of high-voltage OLED decreased at higher frequency than low-voltage OLED. The luminance characteristics of the OLED according to the frequency is due to the capacitive reactance in the OLED, generated during the alternating current driving. The frequency response characteristics of the OLED according to the voltage is due to the decrease in internal resistance of the organic layer. In addition, the negative voltage component of the alternating current did not affect the frequency response of the OLED. Therefore, the electroluminescent characteristics of OLED with an alternating current power of 60 Hz are not influenced by the frequency.

**Keywords:** OLED, Alternating current, Frequency, Impedance, Waveform

## 1. 서론

OLED는 자체 발광 소자로 넓은 색 표현 범위, 고명암비, 광 시야각, 플렉시블, 고연색성, 면광원 등 장점을 가지고 있어 차세대 디스플레이 및 조명용 광원 소자로 활발히 연구되고 있다 [1-4]. OLED는 일반적으로 직류(direct current, DC) 전원에서 구동되어 조명으로 활용하기 위해서는 교류(alternating current, AC) 전원을 직류 전원으로 변환하는 전원 변환 장치가 필요하다. OLED를 별도 전원 변환 장치 없이 교류 전원으로

로 구동시킬 경우 OLED 조명의 디자인 자유도, 저가격화, 소비전력 개선 등의 효과를 기대할 수 있다 [5,6]. 또한, 교류구동방식 OLED의 경우 저전압에서 직류구동방식보다 개선된 발광특성을 나타내며, 직류 전원이 발생시키는 유기물과 전극, 유기물과 유기물 계면에서의 공간전하 축적을 완화시킬 수 있다 [7-10].

본 연구에서는 교류 전원의 주파수 성분이 OLED의 발광특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 인가전압에 따라 안정된 발광효율을 나타내는 다층구조 청색 형광 OLED를 제작하였다. 사인파 교류 전원을 OLED에 인가하여 주파수 변화에 따른 발광특성을 확인하였다. 주파수 변화에 따른 발광특성을 분석하기 위하여 교류 전원을 인가한 OLED의 임피던스 변화를 측정하고, 임피던스 측정 결과를 OLED 등가회로에 대입한 다음 회로 해석 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 실험 결과와 비

✉ Sung-Hoo Ju; [sunghooju@daejin.ac.kr](mailto:sunghooju@daejin.ac.kr)

Copyright ©2019 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.

교 분석하였다. 추가로 다양한 파형의 교류 전원을 인가한 OLED의 주파수 응답 특성과 교류 음전압 성분에 따른 OLED의 주파수 응답 특성을 분석하였다.

## 2. 실험 방법

그림 1은 주파수 응답 실험을 위해 제작한 청색 형광 OLED의 구조를 나타낸 것이다. 면저항 10 Ω/□의 ITO (indium tin oxide)가 증착된 유리 기판을 사용하여 1.0×10<sup>-6</sup> torr 이하의 고진공에서 열 기상증착 방법으로 유기물 및 금속 박막을 증착하였다. 소자 구조는 ITO, 150 nm / 2-TNATA(4,4,4-tris(2-naphthylphenyl)aminotriphenylamine), 60 nm / NPB(N,N-bis-(1-naphyl)-N,N'-diphenyl-1,1'-biphenyl-4,4'-diamine), 30 nm / SH-1:3 vol% BD, 30 nm / Bphen(4,7-Diphenyl-1,10-phenanthroline), 40 nm / Liq, 0.5 nm / Al, 100 nm로 제작하였다. 각 층은 유기물 1.5 Å/s, LiF 0.5 Å/s, Al 2 Å/s의 증착 속도로 박막을 형성하였다.

그림 2는 다양한 교류파형의 주파수 변화에 따른 OLED의 전계 발광특성을 측정하기 위한 시스템의 구성을 나타낸 것이다. 직류 전원 및 교류 전원 인가에 따른 발광특성 변화는 색도계(photo research, PR-650 Spectrascan Colorimeter)를 사용하여 측정하였다. 직류 전원은 Keithley 2400 Source-Meter를 사용하여 공급하였고, 교류 전원은 Siglent사의 SDG1010 함수발생장치를 사용하여 사인파, 삼각파, 구형파의 형태로 20 Hz에서 1 MHz의 주파수 범위로 변경하며 OLED에 인가하였다. 교류 전원 인가에 따른 OLED의 주파수 응답 특성의 분석을 위하여 임피던스 측정 시스템(Keysight, E4990A)을 사용하여 전압과 주파수에 따른 임피던스 변화를 측정하였다. 측정된 임피던스 스펙트럼은 Cole-

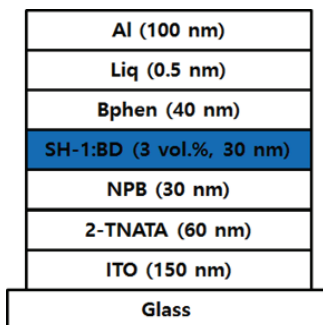


Fig. 1. Structure of blue fluorescent OLED.

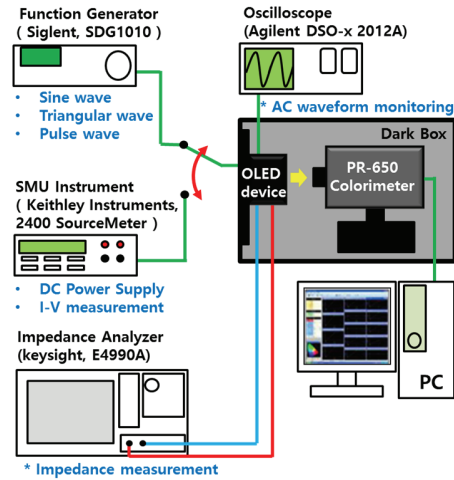


Fig. 2. Schematic diagram of current-voltage-luminance and impedance measurement system for frequency response characteristic of OLEDs.

Cole plot을 통해 도식화하고, OLED 등가회로에 대입하여 임피던스 특성을 분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

그림 3은 사인파형(sine wave) 교류 전원 인가에 따른 OLED의 주파수-휘도 특성을 나타낸 것이다. 5.5 V의 첨두치 전압을 인가한 경우 주파수 1,000 Hz 이상에서부터 주파수 증가에 따른 휘도 감소가 나타나 저역 통과 필터(low pass filter)와 유사한 휘도 특성이 나타났다. 휘도가 1/2로 감소하는 주파수를 주파수 응답 특성을 결정하는 차단주파수(cut-off frequency)

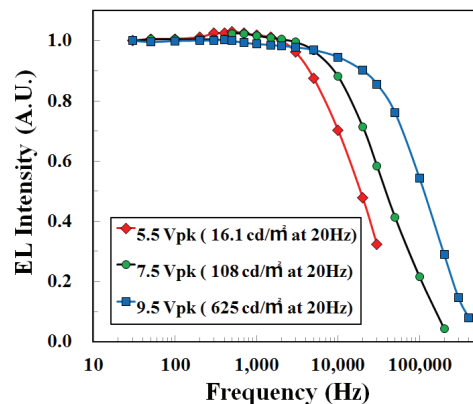


Fig. 3. Electroluminescent intensity vs frequency characteristics of OLED with AC application.

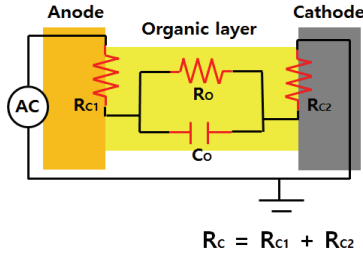


Fig. 4. Equivalent circuit of OLED with AC.

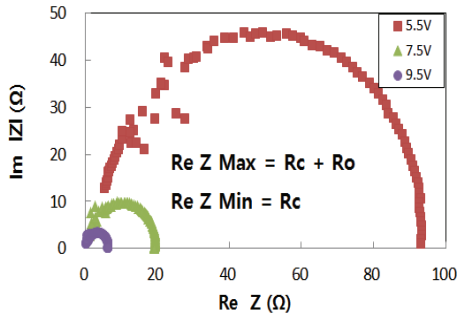


Fig. 5. Cole-Cole plot of blue fluorescent OLED.

로 정의할 경우 OLED의 전압 상승에 따른 차단주파수는 첨두치 전압( $V_{pk}$ ) 5.5, 7.5, 9.5 V에서 18,200, 37,900, 112,000 Hz를 나타냈다. OLED에 인가되는 교류전압이 증가함에 따라 보다 높은 주파수 영역까지 휘도가 유지되어 인가전압의 상승은 주파수 증가에 따른 휘도 저하를 완화시키는 결과를 나타냈다.

그림 4는 그림 3의 주파수 증가에 따른 휘도 저하를 설명하기 위한 저항과 커패시터로 구성된 OLED의 등가회로를 나타낸 것이다. 등가회로에서  $R_c$ 는 전극과 유기물 사이의 계면에서 발생하는 접촉저항이며,  $R_o$ 와  $C_o$ 는 유기물층 내부에서 발생하는 저항과 커패시턴스이다 [11,12]. 등가회로에서  $C_o$ 는 커패시터가 갖는 고유특성으로 인해 충분히 낮은 주파수 영역에서 열린회로로 동작하여 유기물층의 임피던스는  $R_o$ 에 의해 결정되므로 OLED 소자의 전체 임피던스는  $R_c$ 와  $R_o$ 의 합이 된다. 하지만 충분히 높은 주파수 영역에서  $C_o$ 는 단락회로로 동작하므로 유기물층의 임피던스는 0이 되어 전압 분배에 의해 대부분의 전압이  $R_c$ 에 걸리게 되어 발광하지 않는다. 이러한  $C_o$ 에 의한 유기물층의 임피던스 변화는 낮은 주파수 영역에서 높은 주파수 영역까지 연속적으로 변하게 되어 저역 통과 필터와 흡사한 특성을 나타낸다.

그림 5는 펄스파형(pulse wave) 전원의 주파수 변

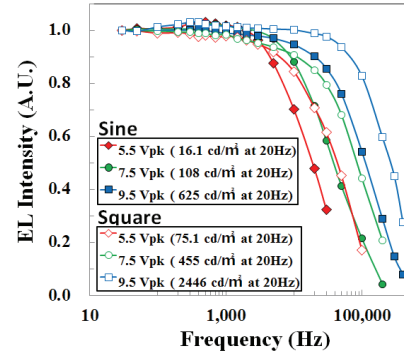


Fig. 6. Electroluminescent intensity vs frequency characteristics of OLED with AC sine and square wave application.

화(20 Hz ~ 1 MHz)에 따른 OLED의 임피던스 변화를 나타낸 Cole-Cole plot이다. 실수부 임피던스( $Re Z$ )의 최댓값은 낮은 주파수 영역의 임피던스에 해당하며, 등가회로에서  $C_o$ 가 열린회로에 해당하므로  $R_c + R_o$ 가 된다. 임피던스 최댓값은 5.5, 7.5, 9.5 V에서 각각 93.22, 19.25, 6.38  $\Omega$ 으로 나타났다. 실수부 임피던스의 최솟값은 높은 주파수 영역의 임피던스에 해당하며, 등가회로에서  $C_o$ 가 단락회로인 상태에 해당하므로  $R_o$ 가 된다. 임피던스의 최솟값은 5.5, 7.5, 9.5 V에서 각각 0.32, 0.37, 0.32  $\Omega$ 이었다. 따라서 임피던스 최댓값에서 최솟값을 뺀 유기물층 내부 저항  $R_o$ 는 5.5, 7.5, 9.5 V에서 각각 92.9, 18.88, 6.06  $\Omega$ 이다. 즉, 전극과 유기물층 계면에서 발생하는 접촉 임피던스  $R_c$ 와 비교하여 유기물층의 임피던스  $R_o$ 는 OLED의 다이오드 특성에 의해 구동전압의 영향을 크게 받는 것을 알 수 있다. 주파수 변화에 따른 OLED의 임피던스 감소는  $R_o$ 와 병렬로 연결된 용량성 리액턴스 성분인  $C_o$ 의 감소에 따른 결과이다. Cole-Cole plot에서 y축 임피던스 허수부 최댓값은 유기물층의 내부 임피던스가 1/2이 되는 지점으로 이때의 주파수 값이 OLED의 주파수 응답 특성을 결정하는 차단주파수이다 [11,12]. 임피던스 측정 결과의 차단주파수는 5.5 V에서 40,750 Hz, 7.5 V에서 83,450 Hz, 9.5 V에서 282,400 Hz를 나타냈다. 임피던스 측정을 통해 얻은 OLED의 차단주파수는 그림 3의 차단 주파수 측정 결과보다 5.5 V에서 2.24배, 7.5 V에서 2.2배, 9.5 V에서 2.52배 높게 나타났다.

그림 6은 구형파(square wave)와 사인파의 전원을 인가한 OLED의 주파수-휘도 특성을 나타낸 것이다. 구형파의 전원을 OLED에 인가한 경우에도 사인파를

인가한 경우와 유사하게 주파수가 증가함에 따라 저역 통과 필터와 같은 경향이 나타났다. 그러나 구형파의 전원을 인가한 경우의 차단주파수는 5.5, 7.5, 9.5 V를 인가한 경우 각각 44,500, 85,800, 267,000 Hz를 나타냈다. 그림 3의 사인파 전원을 인가한 OLED와 비교하여 구형파의 전원을 인가한 OLED의 차단주파수가 5.5 V에서 2.44배, 7.5 V에서 2.26배, 9.5 V에서 2.38

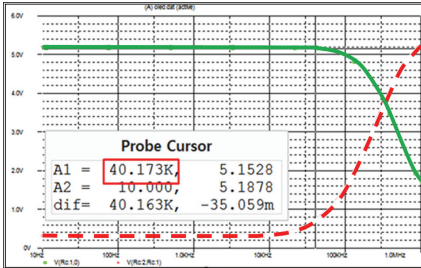
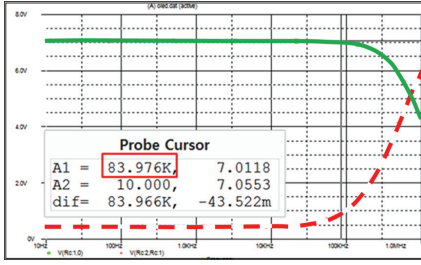
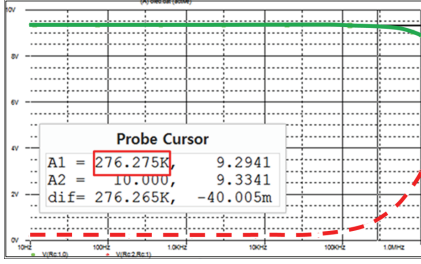
배 높은 결과를 나타내어 파형에 따라 OLED의 주파수 응답 특성이 달라졌다. 구형파의 전원을 인가한 OLED의 차단주파수를 그림 5의 임피던스 측정에서 얻은 차단 주파수와 비교하면 5.5 V에서 1.09배, 7.5 V에서 1.03배, 9.5 V에서 0.95배로 나타나 유사한 값을 나타내었다. 따라서 그림 3의 상용 교류 전원의 주파수 응답 특성을 확인하기 위하여 사인파 교류 전원을 사용한 경우보다 그림 5의 임피던스 측정에서 얻은 차단주파수가 5.5 V에서 2.24배, 7.5 V에서 2.2배, 9.5 V에서 2.52배 증가한 것은 전원공급원의 파형 차이에 의한 결과이다. 사인파를 인가한 OLED의 차단주파수, 구형파를 인가한 OLED의 차단주파수, 펄스파를 인가한 OLED의 임피던스 측정을 통해 얻은 차단주파수를 표 1에 정리하였다.

표 2는 Cadence Design System사의 회로 시뮬레이션 프로그램인 Orcad Capture CIS의 PSpice 기능

**Table 1.** Comparison of cut-off frequency. A: cut-off frequency of OLED driven by sine wave, B: cut-off frequency of OLED driven by square wave, and C: cut-off frequency by impedance measurement of OLED.

V	Cut-off frequency (fc)			Times (B/C)
	A	B	C	
5.5	18,200	44,500	40,750	1.09
7.5	37,900	85,800	83,450	1.03
9.5	112,000	267,000	282,400	0.95

**Table 2.** Comparison of cut-off frequency with impedance measurement and simulation.

AC (V)	Impedance measurement results (A)	Simulation result (B)	$f_c$ times (A/B)
5.5	$R_c = 0.32 \Omega$ $R_o = 92.9 \Omega$ $C_o = 83.5 \text{ nF}$ $f_c = 40,750 \text{ Hz}$	 <p><math>f_c</math> simulation result (Hz): 40,173 Hz</p>	1.01
7.5	$R_c = 0.37 \Omega$ $R_o = 18.88 \Omega$ $C_o = 194 \text{ nF}$ $f_c = 83,450 \text{ Hz}$	 <p><math>f_c</math> simulation result (Hz): 83,976 Hz</p>	0.99
9.5	$R_c = 0.32 \Omega$ $R_o = 6.06 \Omega$ $C_o = 168 \text{ nF}$ $f_c = 282,400 \text{ Hz}$	 <p><math>f_c</math> simulation result (Hz): 276,275 Hz</p>	1.02

을 이용하여 OLED 등가회로의 주파수 응답 특성을 시뮬레이션한 결과이다. 시뮬레이션을 위하여  $R_c$ ,  $R_o$ ,  $f_c$ 는 그림 5에서 측정된 값을 사용하였고, 커패시턴스  $C_o$ 는  $R_o$ 와  $f_c$ 를 식 (1)에 대입하여 계산하였다 [11,12]. 식 (1)에 의하여 계산한  $C_o$ 는 5.5, 7.5, 9.5 V에서 각각 83.5, 194, 168 nF이다.

$$f_c = \frac{1}{2\pi(R_o/2)C_o} \quad (1)$$

OLED 등가회로에 대입한 시뮬레이션 결과의 실선은 유기물층 임피던스에 의한 주파수 응답 특성을 나타낸 것이며, 점선은 전극과 유기물층 계면의 임피던스에 의한 주파수 응답 특성이다. 시뮬레이션 결과 또한 임피던스 측정 결과와 마찬가지로 저역 통과 필터의 특성을 보이며, 인가전압 상승에 따라 차단주파수가 고주파수 영역으로 이동하는 것을 알 수 있다. 시뮬레이션 결과의 차단주파수는 5.5, 7.5, 9.5 V에서 각각 40,173, 83,976, 282,400 Hz의 결과를 나타내어 임피던스 측정 결과의 차단주파수와 비교하여 2% 이내의 오차로 거의 일치된 결과를 나타내었다.

그림 7은 사인파, 삼각파, 구형파의 교류 전원을 OLED에 인가하여 주파수에 따른 휘도 변화를 나타낸 것이다. 동일한 첨두치 전압에서 구형파를 인가한 OLED의 휘도가 가장 높으며, 사인파, 삼각파 순서로 휘도가 낮아진다. 동일한 첨두치 전압에서 각 파형별 휘도 편차의 원인은 실효치 전압 차이에 의한 것으로 구형파의 실효치 전압은 첨두치 전압의 0.5배이고, 사인파는  $1/2\sqrt{2}$ 배, 삼각파는 0.25배이다. 따라서 교류 파형별 OLED의 주파수 응답 특성의 비교는 동일 전압에서 비교하는 것보다 파형별로 휘도가 동일한 첨두치 전압 구간을 찾아서 비교하여야 한다. 사인파는 7 V, 삼각파는 7.5 V, 구형파는 6 V의 첨두치 전압에서 각각 127.4, 125.2, 129  $\text{cd/m}^2$ 로 유사한 휘도를 나타내었다.

그림 8은 사인파, 삼각파, 구형파의 첨두치 전압 7, 7.5, 6 V에서 주파수에 따른 OLED의 휘도 변화를 보여준다. 세 가지 파형에서 OLED의 휘도 변화는 모두 저역 통과 필터의 특성을 나타내었다. 초기 휘도 대비  $1/2$  수준의 휘도가 되는 주파수가 사인파는 51,200 Hz, 삼각파는 46,200 Hz, 구형파는 44,900 Hz로 인가된 파형별로 차이가 있었다. 차단주파수의 차이는 푸리에 급수를 활용하여 각 파형을 시간 영역에서 주파수 영역으로 변환하여 함수의 응답 특성을 통해 설명할

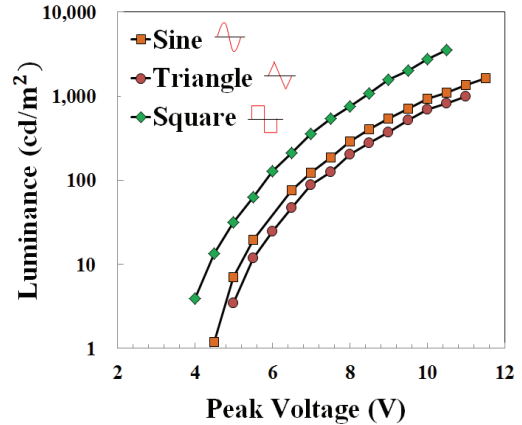


Fig. 7. Luminance vs peak voltage characteristics of OLED with various AC wave application.

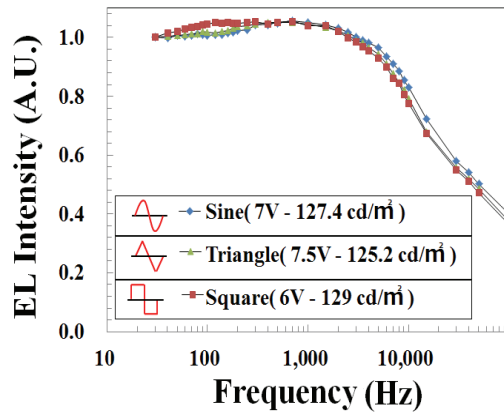


Fig. 8. Electroluminescent intensity vs frequency characteristics of OLED with various AC wave application.

수 있다. 푸리에 급수는 임의의 주기함수를 코사인과 사인의 합으로 된 무한급수로 표현하며, 주기가 T인 함수에 대한 푸리에 급수는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다. 식에서  $f(x)$ 는 임의의 주기함수를 의미하며,  $a_0$ 는 주기함수에 대한 시간  $t=0$ 에서의 푸리에 계수를 의미하고,  $a_n$ 과  $b_n$ 은 n배 주파수에 대한 푸리에 계수를 의미한다. 사인파, 삼각파, 구형파는 모두 원점 대칭의 기함수이므로  $a_0$ ,  $a_n$ 이 0이 되어, 푸리에 계수  $b_n$ 에 대한 푸리에 급수로 표현된다 [13].

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega x + b_n \sin n\omega x) \quad (2)$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(x) dx$$



$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(x) \cos n\omega x dx$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(x) \sin n\omega x dx$$

그림 9는 푸리에 급수를 이용하여 사인파, 삼각파, 구형파에 대한 시간 함수를 주파수 함수로 표현한 것이다. A는 파형의 진폭, T는 파형의 주기, f는 파형의 주파수를 의미한다. 주파수 영역에서 사인파의 경우 주기 T에 단일 주파수 성분만을 가지므로, 진폭 A의 주파수 1 f에서의 임펄스(impulse) 함수로 표현된다. 삼

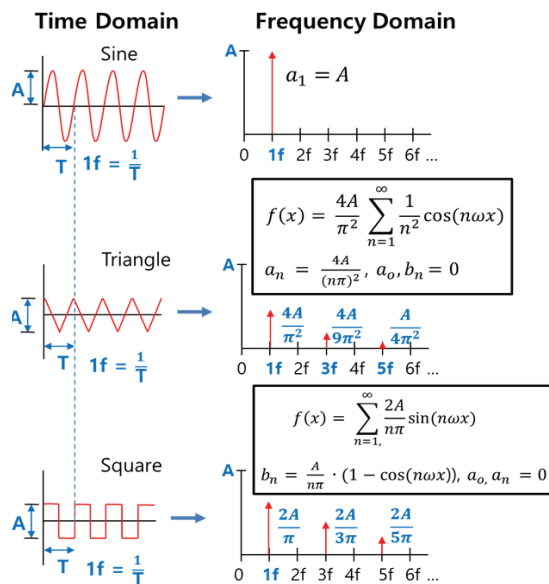


Fig. 9. Fourier series of various waveform.

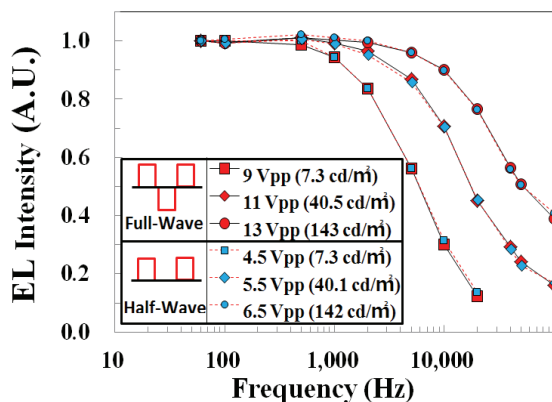


Fig. 10. Electroluminescent intensity vs frequency characteristics of OLED with AC full and half square wave application.

각파와 구형파의 경우 1 f의 홀수 배 주파수 성분을 갖는 기함수이므로 임펄스 열로 표현된다. 진폭을 1로 가정할 경우 사인파는 주기에 의해 결정되는 주파수 1 f에서의 푸리에 계수인 a<sub>1</sub>에서만 1의 이득 값을 가진다. 그러나 삼각파와 구형파의 경우 파형의 주기에 의해 결정되는 주파수의 홀수 배가 되는 주파수 영역에서도 이득 값을 갖게 되어, 삼각파의 경우 1 f에서 a<sub>1</sub> = 0.405, 3 f에서 a<sub>3</sub> = 0.045, 5 f에서 a<sub>5</sub> = 0.016이고, 구형파의 경우 1 f에서 a<sub>1</sub> = 0.637, 3 f에서 a<sub>3</sub> = 0.212, 5 f에서 a<sub>5</sub> = 0.127의 이득 값을 갖는다. 즉, 삼각파와 구형파의 경우 파형의 주기에 의해 결정되는 주파수 외에 홀수 배의 높은 주파수에서도 이득 값을 갖기 때문에 단일 주파수 성분만을 갖는 사인파보다 OLED의 저대역 통과 필터의 특성에 의한 영향을 더 많이 받아 차단주파수가 낮은 주파수 영역으로 이동하는 것이다.

그림 10은 펄스파 교류 전원의 음전압 성분의 유무에 따른 OLED의 주파수에 대한 휘도를 나타낸 것이다. OLED의 휘도는 펄스파의 음전압 성분 유무에 상관없이 동일한 주파수 응답 특성을 나타내었다. 따라서 교류 전원에서 전류 주입에 기여하지 않는 음전압 성분은 OLED의 주파수 응답 특성에 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

교류구동방식 OLED의 주파수 응답 특성을 분석하기 위하여, 청색 형광 OLED를 제작하여 OLED에 인가되는 교류 전원의 주파수 변화에 따른 특성을 측정하였다. 교류 전원 인가 시 주파수 변화에 따른 OLED의 휘도는 저역 통과 필터와 유사한 특성을 나타냈다. 인가전압의 증가에 따라 OLED의 휘도는 높은 주파수에서 감소되기 시작하였다. 교류 전원의 주파수 증가에 따른 휘도 저하는 저항과 커패시터로 구성된 OLED의 등가회로로부터 임피던스 변화를 나타낸 Cole-Cole Plot을 통하여 해석하고, 회로 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 검증하였다. 다양한 파형의 교류 전원을 OLED에 인가하여 주파수 변화에 따른 휘도 변화를 측정하였다. 삼각파와 펄스파의 교류 전원에서도 OLED의 주파수 응답 특성은 저역 통과 필터의 특성을 보이며, 가장 높은 주파수에서 휘도 감소가 시작되는 OLED는 사인파 교류 전원을 사용한 경우였다. 교류 주파수의 파형에 따른 차단주파수의 차이는 푸리에 급수를 활용하여 각 파형을 시간 영역에서 주파수 영역으로 변환하여 설명하였다. 또한 교류 전원의 음전압 성분은 OLED의 주파수 특성에 영

향을 주지 않음을 확인하였다. 결론적으로, 상용 교류 전원으로 사용하는 60 Hz의 주파수에서는 OLED의 발광 특성 저하가 나타나지 않아 교류 전원을 직접 연결하는 구동이 가능함을 알 수 있었다.

## ORCID

Sung-Hoo Ju

<https://orcid.org/0000-0003-3007-672X>

## REFERENCES

- [1] C. W. Tang and S. A. VanSlyke, *Appl. Phys. Lett.*, **51**, 913 (1987). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.98799>]
- [2] J. Kido, M. Kimura, and K. Nagai, *Science*, **267**, 1332 (1995). [DOI: <https://doi.org/10.1126/science.267.5202.1332>]
- [3] T. Tsuboi, H. Murayama, S. J. Yeh, and C. T. Chen, *Opt. Mater.*, **29**, 1299 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2006.06.005>]
- [4] H. D. Chun, H. Na, and S. H. Ju, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **26**, 451 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2013.26.6.451>]
- [5] J. H. Seo, J. H. Kim, and S. H. Ju, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **27**, 104 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2014.27.2.104>]
- [6] J. H. Seo and S. H. Ju, *J. Korean Inst. Surf. Eng.*, **50**, 398 (2017).
- [7] D. Liu, F. Teng, Z. Xu, S. Yang, S. Quan, Q. He, Y. Wang, and X. Xu, *Solid State Commun.*, **137**, 391 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2005.12.007>]
- [8] S. Y. Liu, J. H. Chang, I. W. Wu, and C. I. Wu, *Sci. Rep.*, **4**, 7559 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1038/srep07559>]
- [9] M. Fröbel, S. Hofmann, K. Leo, and M. C. Gather, *Appl. Phys. Lett.*, **104**, 071105 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4865928>]
- [10] O. T. Kwon and T. W. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **29**, 625 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2016.29.10.625>]
- [11] H. J. Kim, S. H. Choi, and T. W. Yoon, *Proc. Information and Control Symposium (KIEE, Seoul, 2012)* p. 106.
- [12] D. Liu, F. Teng, Z. Xu, S. Yang, S. Quan, Q. He, Y. Wang, and X. Xu, *Solid State Commun.*, **137**, 391 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2005.12.007>]
- [13] Y. K. Shin, *Signal and System* (Intervision, Seoul, 2009) p. 401.