검출기기반 광도표준과 광원기반 광도표준에 소급한 LED 평균광도의 비교 측정

김용완, 박승남, 이동훈, 박철웅, 조용익*
한국표준과학연구원, *한국광기술원
snpark@kriss.re.kr

최근 LED 제작 기술의 급속한 발전을 바탕으로 LED를 디스플레이는 물론 일반 조명에 사용하기 위한 적극적인 노력이 계속되고 있다. 조명용 LED의 성능을 판별하는 조명 효율 (lm/W)을 1 %를 올리기 위해서 엄청난 인력과 재원을 소모하고 있지만 제작사 마다 측정하는 결과는 수십 % 이상 (광도의 경우 24 %) 다를 수 있다는 것은 이미 알려진 사실이다[1]. LED 단일소자의 평가에는 CIE와 ISO와 같은 국제기구가 권고하는 방법[2,3]이 사용되고 있지만 이런 불일치를 극복할 수 있는 대안을 되지 못하고 있는 실정이다. 이와 같은 극심한 불일치의 대부분은 일반 조명 광원과 다른 LED의 독특한 특성에서 기인하지만, 측정에 사용되는 측정 표준의 부재 또는 오용에 따른 원인도 무시할 수 없는 상황이다.

LED의 평균 광도를 측정하는 방법으로 CIE/ISO에서는 광도계를 사용하거나 분광복사도계를 사용하도록 권고하고 있다. 이 때 광도계나 분광광도계 개구의 면적은 100 mm^2의 원형을 사용하고, 측정거리는 316 mm(CIE 조건 A)와 100 mm(CIE 조건 B)의 조건을 제안하였다. 이 연구에서는 CIE에서 제안하고 있는 두 가지 평균 광도 측정법을 국가 측정표준과 직접적인 소급성을 유지하여 최고 수준으로 구현해 봄으로써 LED 측정의 불일치 요인 중에서 국가 측정 표준의 기여분을 확인하였다.

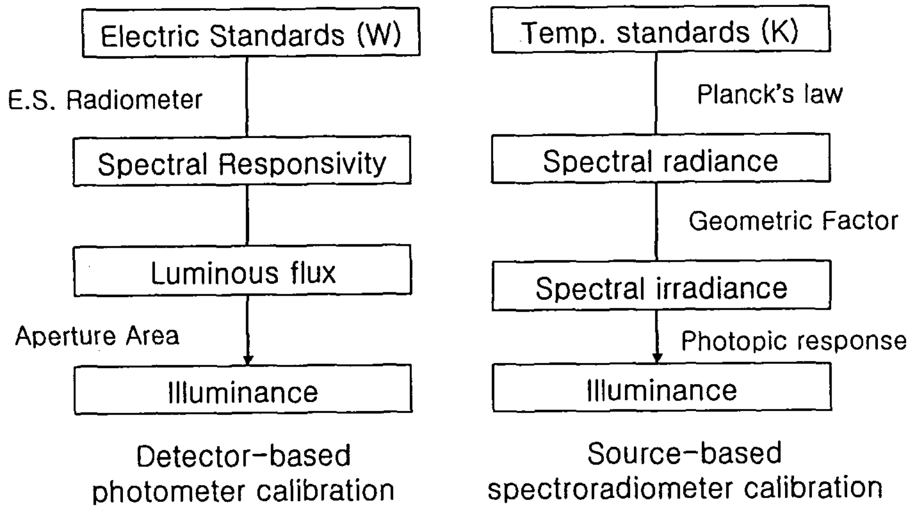

그림 1. 검출기 기반의 광도계 교정과 광원 기반의 분광복사계 교정 방법

광원 기반의 광도 표준은 온도가 알려진 흑체의 분광복사휘도(spectral radiance) L_λ가 식(1)과 같은 플랑크의 복사 법칙으로 표현된다는 사실로부터 출발한다.

$$L_\lambda(T) = \frac{C_1}{\pi \cdot \lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1\right]} \quad (W / m^3 \cdot sr) \tag{1}$$

여기서 C_1과 C_2는 각각 제1, 제2 복사상수이고, T는 흑체의 절대온도이다. 그림 1의 오른쪽의 분광복사휘도로부터 출발하여 분광복사조도표준이 얻어지는 단계에서는 분광복사도계를 교정할 수 있고, 시감효율함수를 고려한 복사조도-조명도 변환 적분을 통해서 조명도 표준을 얻을 수 있다. 이 조명도 표준을 사용하여 광도계의 조명도 감응도를 교정할 수도 있다.

광도계를 교정하는 가장 정확한 방법은 그림1의 왼쪽과 같은 검출기 기반의 측정법이 있다. 전력치환 복사계로부터 출발하여 광도계의 분광감응도와 개구의 면적을 측정하여 광도 표준을 얻는 방법이다. 파장 555 nm에서 절대분광감응도가 S_{555}(A/W)이고, 상대분광감응도가 s(λ), 개구 면적이 A(m^2)인 광도계를 사용하여 점광원으로 근사할 수 있는 광원을 측정할 때 U(A)일 전류가 측정되었다면 이 광원의 광도는 다음과 같은 식(1)과 같이 쓸 수 있다.

$$I_v = \frac{d^2 \cdot U \cdot K_m \cdot f(e)}{S_{555} \cdot A} (\mathrm{cd}) \tag{1}$$

여기서 V(λ)는 시감효능함수이고. K_m은 상수로 683 lm/W이며, d는 광도계 개구와 피측정 광원 사이의 거리로 CIE 조건에는 두 가지의 측정거리가 추천되고 있다.

$$f(e) = \int_\lambda e(\lambda) V(\lambda)\, d\lambda \Big/ \int_\lambda e(\lambda) s(\lambda)\, d\lambda \tag{2}$$

광도계의 상대 분광감응도가 시감효능함수와 같을 때는 보정이 필요 없지만, 기준광원(e_s)과 측정광원(e_t)의 분광분포가 다를 때는 광도에 다음과 같은 보정값, F(e_t,e_s) 을 곱하여 보정해야 하며 이를 색보정 인자 라고 한다.

$$F(e_t, e_s) = \frac{f(e_t)}{f(e_s)} \tag{3}$$

이 연구에서는 광원중심의 광도 표준을 실현하기 위하여 고온흑연관 흑체를 사용하였고, 흑체 앞에 정밀 개구를 설치하여, 정해진 위치에서 분광복사조도계를 절대 교정하였다. 검출기 기반의 광도 표준을 실현하기 위하여 광도계의 분광감응도를 극저온 절대복사계에 소급하여 절대 교정하고, 광도계 외부의 개구의 면적을 정밀하게 측정하였다[4]. 이렇게 얻어진 두 가지 방법으로 표준광원 A와 적색, 녹색, 청색 LED의 광도를 비교 측정하였다. LED의 분광분포에 대한 정보가 전혀 없는 경우, LED의 파장 최대 파장을 알 경우, LED의 상대분광분포를 알고 있어서 완전한 색보정인자를 계산할 수 있을 경우로 나누어서 측정 결과를 비교하였다.

1. K. Suzuki. et al, International Round Robin LED Photometry Test, 25-th Session Meeting CIE Proceedings, pp.D2-104, June (2003).
2. CIE Techical Report, Measurement of LESs, CIE127 (1996).
3, CIE/ISO Standard of Measureing the Intensity of Light Emittinf Diodes(LEDs), CIE TC2-46, Fifth Draft June (2003).
4. 박승남, 김용완, 이동훈, 검출기 기반의 광도 눈금 실현, 광학회지 투고 중 (2004)

FE