

CFD 해석을 이용한 한국도로공사 표준 25 [W] LED 모듈의 방열 특성 분석

이세일¹, 허인성¹, 이아람¹, 정민주², 유영문^{1,a}

¹ 부경대학교 LED 해양융합기술연구센터

² 부경대학교 LED 융합공학전공

Analysis of Heat Dissipation Characteristics for Standard 25 [W] LED Module of Korea Expressway Corporation: Using CFD Analysis

Se-II Lee¹, In-Sung Her¹, A-Ram Lee¹, Min-Joo Jung², and Young-Moon Yu^{1,a}

¹ LED-Marine Convergence Technology R&D Center, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

² Department of LED Fusion Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

(Received June 5, 2014; Revised July 3, 2014; Accepted July 4, 2014)

Abstract: Korea Expressway Corporation established standard of LED lighting fixture in Dec. 2013. To raise compatibility, the standard requires a fixed form and it is applied to street lights and tunnel lights, etc. Because streetlight has different circumstance condition from tunnel light that is down light and exposed to constant wind velocity over height of 8 meters, in case of LED module which has the same shape, characteristic of radiant heat can be different. In this paper, we designed 25 [W] LED Module that is designated by standard of Korea Expressway Corporation and analyzed characteristics of radiant heat about natural convection and forced convection. It is dropped 10.12[°C] that max temperature is decreased by increasing 20 mm of bended height of heatsink at the condition of natural convection. Radiant heat characteristic of bended height 35 mm became 78.08[°C] at the condition of natural convection, 55.30[°C] at the condition of forced convection so that 22.78[°C] is decreased that is 29.1[%] decrease. Bended height 55mm became 67.96[°C] at the condition of natural convection, 48.04[°C] at the condition of forced convection so that 19.92[°C] is decreased that is 29.3% decrease.

Keywords: LED module, Heatsink, Standard, Forced convection, Natural convection

1. 서 론

LED의 발광 성능 (luminous performance)이 높아

지면서 조명 분야의 핵심 주역으로 자리를 잡고 있다 [1-3]. 2009년 2월 27일 LED 조명제품 3종 (KSC 7651, KSC 7652, KSC 7653)에 대하여 KS 인증제도가 시행되고 현재까지 수많은 관련 규격이 제정되었다 [4-6]. LED 조명제품의 KS 인증제정은 제품의 성능 및 안전성을 향상시켜 소비자들에게 높은 품질의 조명제품을 공급하기 위함이다. KSC 7653 '매입형 및 고정형 LED 등기구' 표준은 2009년 11월 18일 미미

a. Corresponding author: ymyu@pknu.ac.kr

라이팅(주)의 첫 인증을 시작으로 2014년 4월 까지 약 224개 업체가 인증을 획득하며 많은 관심을 받아 오고 있다.

2013년 12월 한국도로공사는 LED 조명등기구의 표준을 신규 제정하였다. 공공기관 최초의 LED 조명등 표준안이며, 향후 한국도로공사에서 관리하는 도로에 LED 가로등과 LED 터널등을 공급하기 위해서는 표준에 맞는 제품을 설계해야만 한다. 한국도로공사 LED 조명등기구 표준안의 해설에서 표준제정의 배경 및 목적을 아래와 같이 언급하였다.

1. LED 터널등기구 및 가로등 기구는 에너지절감, 친환경, 고효율조명기기로서 기존의 고압나트륨등 및 형광등을 사용하는 도로 조명등기구를 대체하여 사용하기 위한 것이다.

2. 현재 국내에서 생산 중인 LED 도로조명 등기구는 KSC 7658 및 KSC 7716의 기준에 맞추어 제조되고 있으나, 제조자별 조명등 기구를 구성하는 부속품의 형식, 구성, 특성 등이 달라 설치 후 부속품 고장 시 호환성 부족으로 인하여 유지 보수가 어려울 것으로 예상된다.

3. 또한, 조명이 설치되는 도로 환경, 설치 조건, 조명 기준 등을 제시하여 등기구 설계 및 제조 시 효율을 향상시킬 수 있도록 하였다.

4. 따라서 도공형 LED 조명등기구의 표준을 제정 보급함으로써 제조자의 자율성을 보장한 단일 기준 제시로 공정한 기회를 부여하고, LED 도로조명등기구의 시장 활성화와 동시에 에너지 절감 등을 통해 경제성을 극대화하는데 목적이 있다 [7].

서울시에서 제정한 '공공기관 LED조명 보급 기준'과 KSC 7658 'LED 가로등 및 보안등기구', KSC 7716 'LED 터널등기구', '고효율 에너지기자재 보급 촉진에 관한 규정' 등 LED 가로등 및 터널등의 기존 표준 및 규격에서는 제품의 안전과 성능에 대하여 비슷하게 규정하고 있다. 하지만 한국도로공사의 LED 조명등기구 표준안은 기존 표준과 다르게 LED 모듈의 형태 및 사이즈를 규격화하여 호환성을 높인 것이 특징이다.

표준에서 지정한 LED 모듈의 종류는 정격 전력 25 [W] 이하이며, 터널등과 가로등에 적용할 수 있다. 하지만 각각의 용도와 설치 환경을 고려하였을 때 동일한 방열구조를 갖는 LED 모듈의 방열 특성은 달라질 수 있다. 가로등은 8 [m] 이상의 실외에 설치되어 바람에 의한 강제대류 현상이 일어나고, 터널등은 실내에 설치되어 매립되는 경우 자연대류 현상만이 일

어나게 된다. 따라서 한국도로공사 표준의 25 [W] LED 모듈 설계 시 동일한 방열구조를 갖는 LED 모듈을 가로등과 터널등에 적용하였을 때 설치환경에 의한 방열 특성 변화로 광 특성에 영향을 미칠 수 있다.

본 논문에서는 한국도로공사 표준에서 지정된 LED 모듈의 외형을 만족시킬 수 있는 25 [W] LED 모듈의 외형 설계 후 simulation을 이용하여 자연대류와 강제대류에 대한 방열 특성을 분석하였다. 동일한 외형을 갖는 LED 모듈을 외부 환경 조건이 다른 터널등과 가로등에 적용하여 각각의 열 특성에 대하여 확인하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 LED 모듈의 외형

한국도로공사 LED 조명등기구 표준의 부속서 A에는 그림 1과 같이 모듈의 외형 치수를 지정하였다. 모듈의 가로, 세로 길이와 취부 구멍은 그림 1에 적합하여야 하며, 높이는 60 [mm] 이하로 방열 부품의 형식 및 형상은 제한을 두지 않았다. 즉, 외형 사이즈는 표준에서 지정된 치수를 만족하여야 하지만 LED 모듈의 방열부 역할을 하는 베이스 (base) 두께, 핀 (fin) 두께, 핀 개수, 핀 간격 핀 높이는 설계 제한이 없어 최적화된 방열 설계가 필요하다.

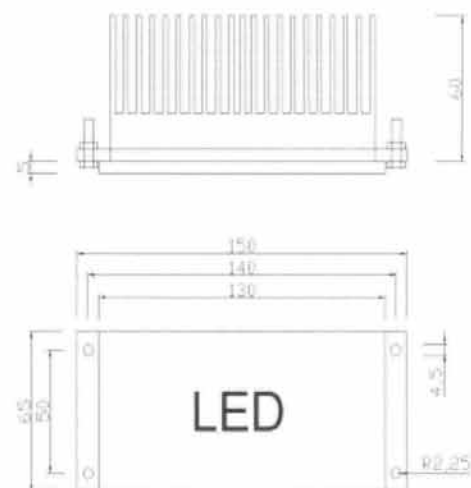


Fig. 1. Outer shape of designated LED module by standard.

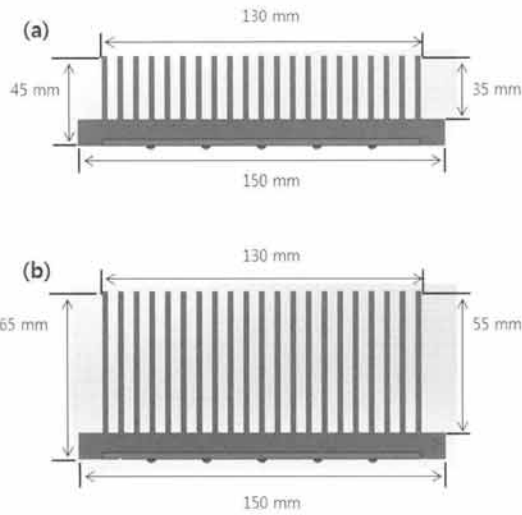


Fig. 2. Analytical model of simulation. (a) fin height 35 [mm] and (b) fin height 55 [mm].

실험을 위하여 그림 2와 같은 가장 일반적으로 사용되는 압출 형태의 핀 타입 2가지 모델을 설계하였다. 베이스 두께 10 [mm], 핀 두께 2 [mm], 핀 간격 4.4 [mm], 핀 개수 21 [EA] 모두 동일하지만 heatsink의 핀 높이는 최대 높이 65 [mm]와 20 [mm] 작은 45 [mm]로 설계하였다. 그림 2(a)의 핀 높이는 35 [mm], (b)의 핀 높이는 55 [mm]이다.

2.2 CFD 해석 조건

해석은 SolidWork사의 flow simulation을 이용하였고, 그림 3은 해석 모델의 분해도를 나타낸다.

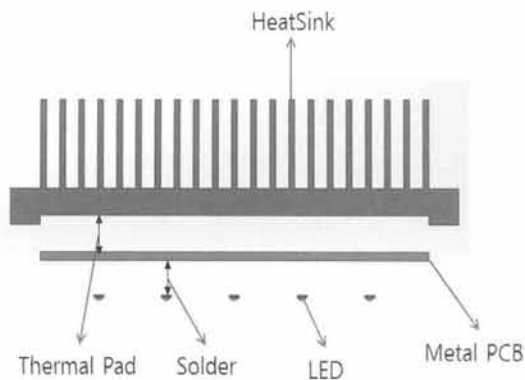


Fig. 3. Structure of analytical model.

Table 1. Simulation property of matter value.

	Conductivity [W/m·K]	Density [kg/m ³]	Specific Heat [J/kg·K]
Al 6061	193	2,700	900
Al 5052	137	2,680	880
sapphire	23.1	3,980	761

해석 모델은 크게 3가지로 구분된다. 위에서 부터 heatsink, PCB, LED PKG로 나누어진다. Heatsink의 재질은 압출형 금형에 가장 많이 사용되는 Al 6061로 설정하였다. PCB의 재질은 metal PCB로 가장하여 Al 5052로 설정하였고, LED PKG는 사파이어 재질로 설정하였다. 각각의 물성표는 표 1과 같다.

Heatsink와 PCB의 접합부에는 thermal pad의 접촉 저항 (thermal contact resistance)을 설정하였고, LED와 PCB의 접합부에는 solder (Au 80[%] / Sn 20[%])의 접촉 저항을 설정하였다. 접촉층의 열 저항은 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$R_c = \frac{d_c}{\lambda_c} \tag{1}$$

여기서, d_c 는 접촉 층의 두께, λ_c 는 접촉 층 재질의 열전도율을 말한다. CFD (computational fluid dynamics) 해석을 수행하는 유동영역은 x(0.25 [m], -0.25), y(0.3 [m], -0.35 [m]), z(0.18 [m], -0.18 [m])로 설정하였다. y축의 위 방향을 크게 한 이유는 해석 결과에서 유동의 흐름을 확인하기 위함이다.

외부 환경은 25[°C]로 설정하였고, 실제 환경에서는 중력이 작용하므로 y축의 반대방향으로 9.81 [m/s²]의 중력 가속도를 설정하였다. y축의 반대방향은 실제 중력이 작용하는 방향이다. 벽체에 대한 경계 조건은 이상적인 복사 상태인 흑체 복사로 설정하였다. 발열 원인 LED는 20 [W]의 heat source를 인가하였고, 총 10개의 LED PKG에 각각 2 [W]씩 인가하였다. 이는 한국도로공사 표준은 LED 모듈의 정격 전력을 25 [W] 이하로 지정하였고, 시뮬레이션은 25 [W] LED 모듈을 가정한 것으로 광 파워를 20[%]로 계산하였다.

핀 사이즈가 다른 2개의 해석모델은 위와 같이 동일한 조건 하에서 자연대류 현상에 의한 방열 특성을 분석한 후, z축 방향으로 2.64 [m/s]의 풍속을 설정하여 강제대류 조건 하에서 유동의 흐름과 방열 특성을

분석하였다. 풍속의 세기는 기상청 통계 중 2013년 서울의 매월 1일의 평균값이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 자연대류 조건하에서 방열 특성

그림 4는 자연대류 조건 하에서 heatsink 핀 높이에 따른 LED 모듈의 방열 특성을 나타낸다. 외부의 유동이 없는 상태 즉, 터널 안에 LED 모듈이 매입되어 설치하였을 조건이다. 핀 높이 35 [mm]의 max 온도는 78.08[°C], 핀 높이 55 [mm]의 max 온도는 67.96[°C]를 나타내었다. 여기서, max 온도는 LED의 접합 온도이다. 핀 높이의 차가 20 [mm]일 때 접합 온도는 10.12[°C]의 차로 약 12.9[%] 감소하였다. 핀 높이와 상관없이 LED 모듈의 중심부의 열이 외각보다 높게 나왔고, LED의 접합 온도는 위치에 따라서 각각 달라지는 것을 확인하였다. LED의 접합 온도는 성능과 신뢰성에 영향을 주는 만큼 위치에 따른 핀 높이의 조절을 통하여 접합 온도를 맞추어 신뢰성을 높여주는 기술이 필요할 것으로 사료된다.

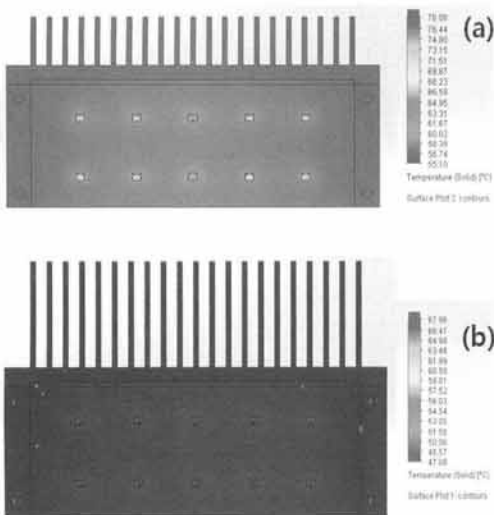


Fig. 4. Heat dissipation characteristic of LED module in natural convection. (a) fin height 35 [mm] and (b) fin height 55 [mm].

그림 5는 자연대류 내에서 heatsink 중앙 단면의 유체유동 특성을 나타낸다. Heatsink 중심 상부에서

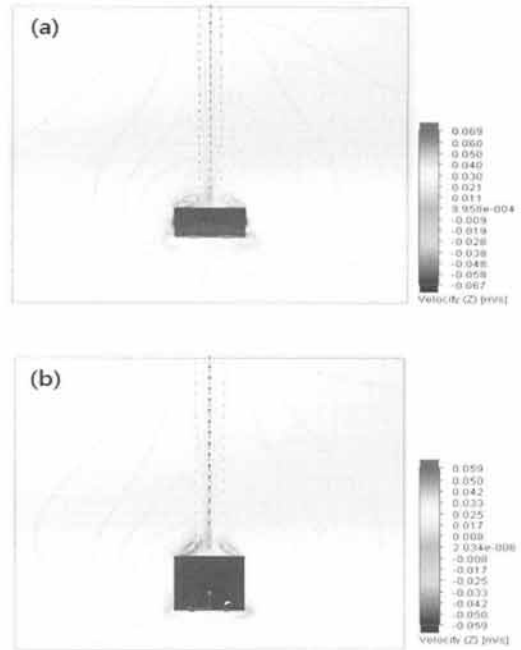


Fig. 5. Fluid flow characteristics of LED module in natural convection. (a) fin height 35 [mm] and (b) fin height 55 [mm].

수직방향을 가장 빠른 유속을 나타내고 있다. 유체의 흐름은 heatsink 외곽에서 냉각 공기가 heatsink 중심부로 유입되고, 유입된 공기는 고온의 heatsink에 의하여 온도 상승에 의한 밀도 차로 수직 상승하게 된다. 핀 높이에 따른 유속 차이는 핀 높이 35 [mm]에서 0.069 [m/s]로, 핀 높이 55 [mm]의 0.059 [m/s] 보다 빠르게 나타났다. 유속의 세기에 차이가 발생한 원인은 heatsink의 온도 차에 의한 것이다.

Heatsink의 온도가 높아 대기 온도와 온도 차가 커질 경우 수직 상승하는 유속의 세기는 커지며, 핀 높이 35 [mm]에서 0.01 [m/s] 빠르게 나타난 것으로 사료된다. 밀도 차에 의한 유속의 수직 상승을 방해하지 않게 LED 모듈이 중심축에 수평하게 설치되면 유속의 흐름이 원활하게 이루어지겠지만 LED 모듈이 수평하게 설치되지 않고 기울어져 설치된다면 수직 상승하는 유속의 흐름을 방해하여 방열 성능이 감소될 수 있다.

3.2 강제대류 조건 하에서 방열 특성

그림 6은 강제대류 조건 하에서 heatsink 핀 높이에 따른 LED 모듈의 방열 특성을 나타낸다. 2.64 [m/s]의

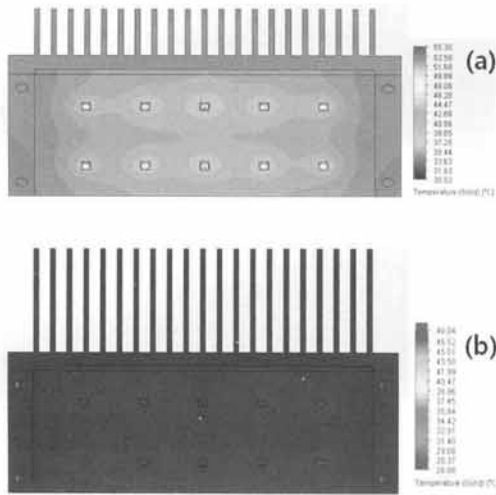


Fig. 6. Heat dissipation characteristic of LED module in forced convection. (a) fin height 35 [mm] and (b) fin height 55 [mm].

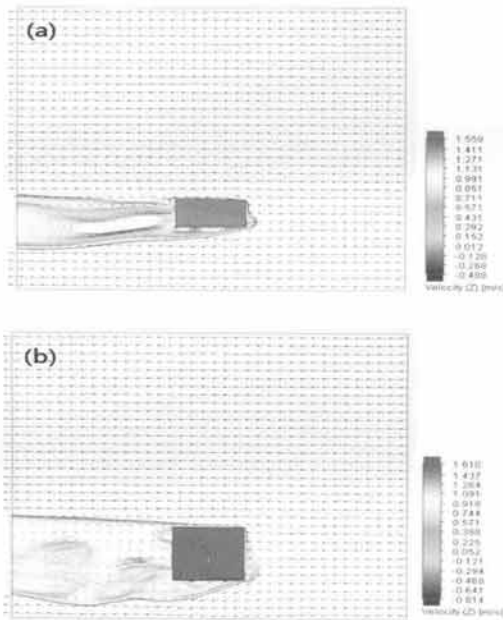


Fig. 7. Fluid flow characteristics of LED module in forced convection. (a) fin height 35 [mm] and (b) fin height 55 [mm].

z축 방향의 풍속은 25 [W] LED 모듈의 방열 성능을 향상시켜 주었다. 핀 높이 35 [mm]의 max 온도는 55.30[°C], 핀 높이 55 [mm]의 max 온도는 48.04[°C]를 나타내었다. 자연대류 내의 온도 특성대비 핀 높이 35 [mm]는 22.78[°C] 감소하였고, 핀 높이 55 [mm]는

Table 2. Property of matter value following bended height of heatsink.

Group	Mass [g]	Volume [cm ³]	Area [cm ²]
Fin 35 [mm]	143.99	942.63	1439.88
Fin 55 [mm]	225.89	1786.83	2258.88
Rate of increase [%]	56.8	89.5	56.8

19.92[°C] 감소하였다. 동일한 구조를 갖는 25 [W]급 LED 모듈은 설치 환경 즉, 바람이 통하는 외부와 바람이 통하지 않는 매입되어 설치되는 실내에 따라서 방열 성능이 크게 달라질 수 있다는 것을 확인하였다. 한국 도로공사에서 표준으로 정한 LED 조명이 터널 등으로 터널 안에 매입될 경우와 가로등 또는 보안등으로 실외 도로에 설치될 경우 방열 특성에 의한 광 특성 또한 차이가 있을 것임을 예상할 수 있었다.

그림 7은 강제대류 내에서 LED 모듈의 유체유동 특성을 나타낸다. z축 방향의 2.64 [m/s] 풍속은 heatsink 핀을 통과하며 LED 접합부에서 전도된 열을 빠르게 냉각시켜 주었다. 그림 7(a)의 25 [W] LED 모듈은 중심부의 단측면을 나타내며 핀의 우측 부분 즉, 바람이 들어오는 부분과 통과하여 빠져나가는 부분에 온도 차가 존재하였다. 핀 높이에 따른 유속 차는 핀 높이 55 [mm]에서 max 1.61 [m/s]로 핀 높이 35 [mm]의 유속 max 1.55 [m/s] 보다 빠르게 나타났다. 이는 부피 증가에 따른 저항력이 증가하여 유속의 세기에 차이가 생긴 것으로 사료된다. Heatsink의 핀은 실외 LED 조명 설치 시 바람의 방향에 수평 방향으로 설치된다면 유속의 흐름을 원활하게 하여 방열 성능이 개선될 수 있을 것이다.

표 2는 핀 높이에 따른 heatsink의 물성치를 나타낸다. 핀 높이가 20 [mm] 상승하였을 때, LED의 접합 온도는 자연대류 상태 내에서 12.9[%] 감소하였으나 heatsink의 질량은 56.8[%], 부피 89.5[%], 면적은 56.8[%] 상승하였다. 핀 높이 증가는 방열 성능 개선이라는 장점과 함께 질량 증가, 부피 증가라는 문제점을 동시에 발생시킨다.

4. 결론

본 논문에서는 CFD 해석을 이용하여 한국도로공사

표준의 25 [W]급 LED 모듈의 방열 특성을 heatsink 핀 높이와 자연대류, 강제대류 조건을 변수로 설정하여 분석하였다.

핀 높이 35 [mm]는 자연대류 조건 78.08[°C]에서 강제대류 조건 55.30[°C]로 22.78[°C] 낮아져 29.1[%] 감소하였고, 핀 높이 55 [mm]는 자연대류 조건 67.96 [°C]에서 강제대류 조건 48.04[°C]로 19.92[°C] 낮아져 29.3[%] 감소하였다. 자연대류 상태에서 heatsink 핀 높이가 20 [mm] 증가함에 따라 max 온도는 10.12[°C] 낮아져 기존대비 12.9[%] 감소하였다. 강제대류 조건에서 heatsink 핀 높이가 20 [mm] 증가하였을 때, max 온도는 7.26[°C] 낮아져 기존대비 13.1[%] 감소하였다. 핀 높이 증가에 따른 방열 성능 개선보다는 풍속에 의한 강제대류 환경 2.64 [m/s]의 풍속이 LED 모듈의 방열 특성에 더욱 큰 영향을 주는 것을 확인하였다. Heatsink 핀 높이 증가는 어떠한 환경 조건에서도 방열 특성을 개선시킬 수 있으나 물성 값은 기존대비 절량 56.8[%], 부피 89.5[%] 상승하였다.

결론적으로 한국도로공사 표준의 LED 모듈 설계 시 적용되는 LED의 접합 온도와 전류량에 따른 광효율을 확인하고, heatsink의 용량을 조절하여 광효율 상승과 제품 무게를 최소화시키는 복합적인 조명 설계가 필요하다. 위 시험 결과 중 핀 높이 35 [mm] 자연대류 조건에서 접합 온도 78.08[°C]는 규격상에 제정된 목표 광 출력을 만족시킬 수 있는 조건으로 물성치를 최소화하는 설계가 적합하다. 또, 동일한 구조의 LED 모듈을 가로등과 매입되는 터널등에 적용하였을 경우 환경 조건에 따라 방열 특성이 달라지는 것을 유의해야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업 (과제 번호: 1037416, 해양 LED 융합기술지원 기반구축 및 상용화 기술개발)으로 지원된 연구임.

REFERENCES

- [1] M. G. Craford, *Proc. of Fifth International Conference on Solid State Lighting*, 5941, 594101 (2005).
- [2] F. Nguyen, B. Terao, and J. Laski, *Proc. of Fifth International Conference on Solid State Lighting*, 5941, 594105 (2005). [doi:10.1117/12.623393]
- [3] F. M. Steranka, J. Bhat, and J. J. Wierer, *Phys. Stat. Sol.(A)*, 194, 380 (2002).
- [4] Korea Standard KSC 7651:2013, *Self-ballasted LED lamps - Safety and Performance Requirements* (2013).
- [5] Korea Standard KSC 7652:2013, *Non-ballasted LED lamps - Safety and Performance Requirements* (2013).
- [6] Korea Standard KSC 7653:2013, *Recessed LED Luminaires and Fixed LED Luminaires - Safety and Performance Requirements* (2013).
- [7] Korea Expressway Corporation Standard, *LED Luminaires* (2013).