

15W급 LED 다운라이트 개발

(Development of 15W LED Downlight)

박철근* · 최문구 · 윤형길 · 권성훈 · 김상천 · 안진호 · 한성수

(Chil-Keun Park · Moon-Goo Choi, Hyoung-Kil Yoon, Seong-Hun Kwon, Sang-Cheon Kim, Jinho, Ahn, Sung-Su, Han)

Abstract

Fixture 일체형 LED 다운라이트(Downlight)의 광 효율 향상을 위하여 LED 장착위치 및 Reflector 길이, 히트싱크(Heat sink) 형태에 따른 광도(luminous intensity)와 기구효율(luminaire efficiency)을 시뮬레이션을 통하여 비교 분석 하였다. 또한 히트싱크의 방열 설계를 시뮬레이션 하고 상용 LED 패키지(Cree, XP-E P4)를 사용하여 시제품을 제작 하여 그 성능을 평가하였다. 그 결과 광속 966lm, 상관 색온도(CCT) 3,060K, 연색지수(CRI) 82의 광 특성을 갖는 LED 다운라이트를 개발하였다.

1. 서 론

LED는 1990년대 말 백색 LED가 개발되면서 조명 시장에서 주목을 받기 시작했고, 소위 '하이츠의 법칙'에 따라 매년 약 35%씩 제품 성능이 향상되었으며, 매년 21%씩 가격이 감소하기 시작했다. 여기에 2008년부터 시작된 불황을 극복하고자 하는 세계 각 국의 녹색 성장 노력이 LED 조명 시장의 성장을 힘차게 떠받치고 있다. 그래서 LED는 고효율, 환경 친화, 공간 효율성, 다양한 연출 효과를 앞세우며 차세대 조명으로서 조명 시장에서 어필하고 있다.[1] 정부에서도 공공기관의 고효율 LED조명 사용을 확대하기 위해 "공공기관 에너지 이용합리화 지침"을 개정('08.9)하여 고효율 조명기기 설치 시 LED 제품을 우선 사용토록 하였으며, 공공기관에 대한 LED조명 시범사업을 추진하고 있다.[2] 이러한 LED 조명은 LED 효율(lm/W)에 비하여, 이를 이용한 LED 조명 효율은 아직 충분하지 못한 게 현실이다. 본 연구에서는 25W급 CFL 다운라이트를 대체하기 위한 fixture 일체형 고효율, 고신뢰성 LED 다운라이트를 개발하기 위하여, 조명 구성 요소들에 대한 광학 및 방열, 기구구조에 관한 시뮬레이션을 실시하고 시제품을 제작하여 그 성능을 평가 하였다.

2. LED 다운라이트 설계

2.1. 광학설계

LED 다운라이트는 방열을 위한 히트싱크, 광원인 LED를 장착한 PCB 모듈, 광원에서의 빛을 목표배광으로 되도록 제어하기 위한 Reflector 및 확산판으로 구분

할 수 있으며, 그림 1에 시뮬레이션을 위하여 모델링 된 LED 다운라이트의 예를 나타내었으며, LED 다운라이트의 주요 구성요소로 이루어져 있다.

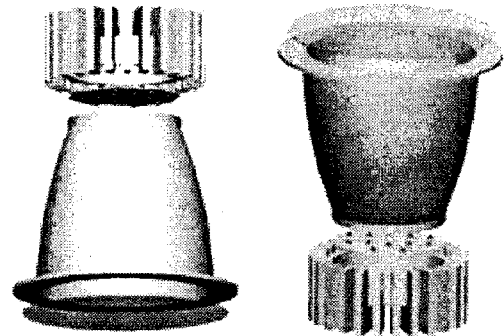


그림 1. LED 다운라이트의 주요 구성요소별 모델링 예

광학 설계를 위하여 LED 구성요소 중 먼저 광원인 LED 패키지를 모델링 하여야 한다. LED 패키지 모델링 및 광 시뮬레이션을 위한 소프트웨어는 ORA사의 LightTools를 사용하였다. LightTools를 이용한 모델링은 정확한 데이터에 근거하여 설계하여야 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있다.[3] LED 패키지 제조 회사에서 제공된 데이터 시트(Data sheet)를 근거로 실제 제품의 구조와 크기에 유사한 3차원 LED 패키지를 설계하고 반사 컵 및 실리콘 렌즈 등의 각 특성에 맞는 적절한 재질을 선택하고 그에 맞는 굴절률, 투과율과 반사율 등의 데이터를 입력하여 모델링 하였다. 모델링된 LED 패키지는 광속 87lm, 색온도 3490K, 방사각(FWHM) 110°의 일반적인 램버시안(Lambertian) 배광분포를 갖으며, 시제품 제작에 사용된 LED 패키지(Cree, XLamp XP-E P4)의 광학 특성을 만족하였다.

또한 모델링된 LED 패키지를 이용하여 PCB의 LED 패키지 장착 위치에 따른 광 추출효율을 비교하기 위하여 다운라이트 구성요소들을 모델링 하였다. 그림 1의 다운라이트 모델링 예와 같이 Reflector의 몸통 길이는 105mm, 최대 내구경 $\Phi 114\text{mm}$ 의 유선형 곡면을 갖으며, PCB 크기는 약 $\Phi 70\text{mm}$ 로 하여 6인치 다운라이트용으로 설계하였다. 또한 PCB 중심과 Reflector 몸통 중심이 일치하도록 하여 방열설계가 적용된 오목형태의 히트싱크와 체결된 상태에서 LED 패키지 위치를 변화시켜 가며 시뮬레이션 하였다. 그림 2는 PCB 중심에 LED 패키지를 위치 시켰을 때 거리를 "0"로 하여 중심으로부터 외각 방향으로 5mm 단위씩 LED 패키지 위치를 변화 시켜가며 광 추출 효율을 시뮬레이션 한 결과이다.

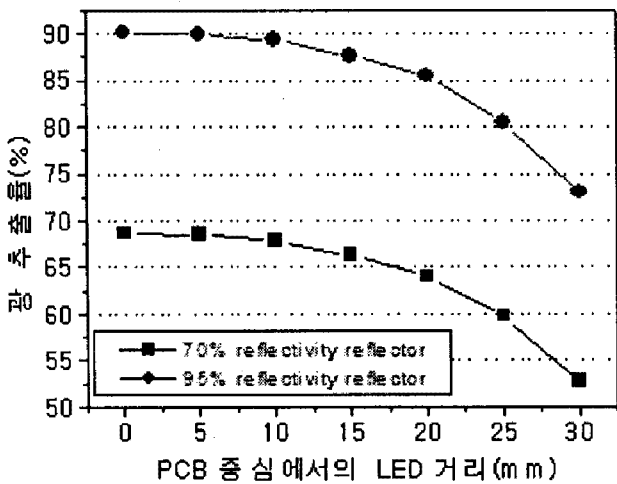


그림 2. LED 패키지 위치에 따른 광 추출효율

시뮬레이션 결과 LED가 PCB 중심에서 외각방향으로 위치할수록 즉, Reflector 몸통의 중심부분 보다 Reflector의 내부벽면에 가깝게 위치할수록 광 추출효율이 감소하였다. 특히 PCB 중심으로부터 30mm 외각에 위치한 LED의 경우 중심부에 비하여 약 20% 효율이 감소하였으며, Reflector의 내부벽면 반사도가 95% 조건보다 70% 조건일 때 외각 방향에 가깝게 위치할수록 추출효율이 더욱 많이 감소하였다. 이는 LED에서 발광된 빛이 Reflector를 통하여 외부로 방출되는 과정에서 Reflector의 내부벽면에 가까울수록 Reflector의 내부벽면과 충돌되는 횟수 및 충돌되는 광량이 증가함에 따른 것으로 추측된다.

이와 같이 LED 다운라이트는 LED에서 발광된 빛을 Reflector 몸통 안에서의 간섭 또는 계속되는 중첩반사 없이 최대한 밑으로 내려가게 하여 조명 효율을 극대화하는 형상설계가 중요하다. 또한 작은 점광원과 높은 지향성을 가진 LED를 다수 결합하여 만드는 조명기기

는 사용자에게 glare를 초래하여 불편감 및 피로감을 줄 수 있으므로 이를 해결 하여야 한다. 이를 위하여 앞서 모델링 된 LED 다운라이트에서 15W급 LED 다운라이트에 필요한 LED 패키지 12EA를 PCB 기판 상에 균등하게 배치하고 Reflector 길이 및 반사성질, 반사율 변화에 따른 시뮬레이션을 실시하여 farField Receiver에서의 광도를 비교하였으며, 그 결과를 그림 3에 나타내었다. 이때 Reflector 최대 내구경 크기는 동일하게 하였으며, 반사성질은 램버시안(Lambertian) 반사와 미러(Mirror) 반사로 구분하였고 반사율은 각각 95%와 70%로 하였다. Reflector를 체결하지 않은 상태(Shade 길이: 0mm)에 비하여 Reflector의 길이가 증가할수록 모든 조건에서 광 추출효율은 감소하였으며, 70% 반사율의 램버시안 반사성질의 경우 Reflector 길이가 증가할수록 광 추출 효율은 크게 감소한 반면, 95% 미러반사 성질의 경우 광 추출 효율 감소는 크지 않음을 알 수 있다.

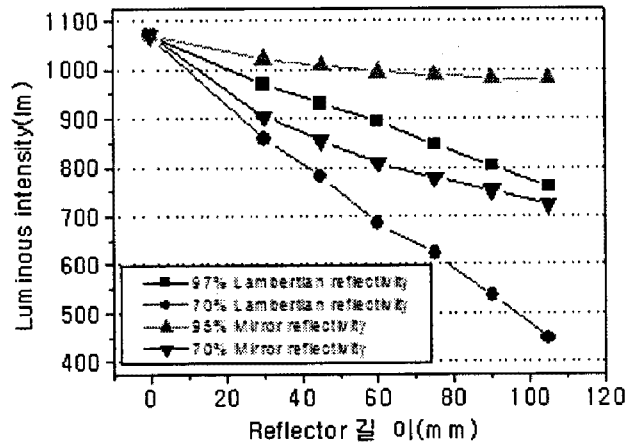


그림 3. Reflector 길이변화에 따른 광 추출효율

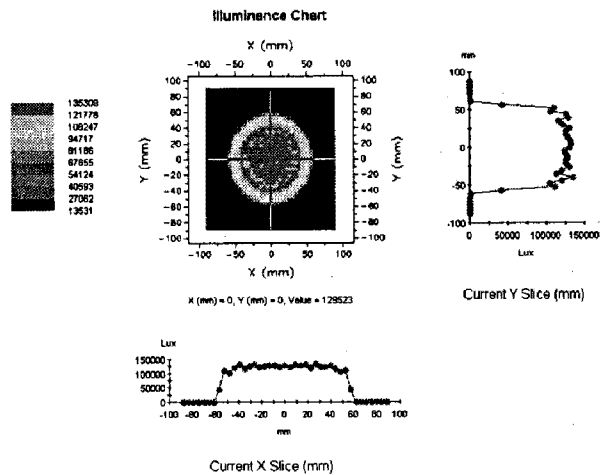


그림 4. Reflector 길이 45mm에서의 Illuminance Chart

또한 Reflector 길이변화에 따른 조명 클레어를 해결하기 위하여 Reflector 길이를 5mm 단위로 더욱 세분하여 Raster Chart를 비교하였다. 이때 Reflector의 반사성질은 95% 미러반사 성질 조건으로 하였다. 그 결과 Reflector 길이가 45mm일때 조도 균일도가 가장 우수하였으며 그때의 Illuminance Chart를 그림 4에 나타내었다.

이와 같이 다운라이트 시뮬레이션 결과 Reflector는 미러반사 성질의 우수한 반사도를 갖으며, 또한 광원으로부터 Reflector 길이가 45mm때 광 추출 효율이 우수할 뿐만 아니라 균일한 조도분포를 갖으며, 클레어를 해결할 수 있음을 알 수 있다.

또한 앞서 모델링된 히트싱크와 같이 Reflector와 결합부분이 히트싱크 내부에 있는 오목형태의 경우, LED에서 발광된 빛이 결합부분에 충돌함으로써 외부로 추출되는 광의 효율이 저하되는 것으로 판단되어 결합부분을 볼록 형태의 외부결합방식으로 히트싱크 구조를 변경하였다. 변경 전, 후의 히트싱크 구조를 그림 5에 나타내었다.

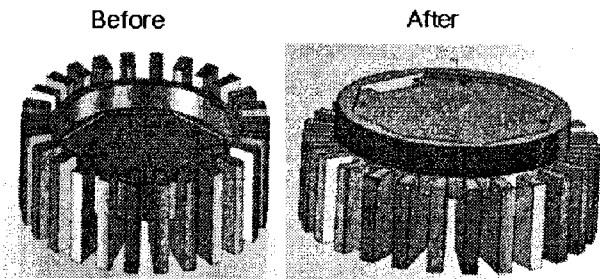


그림 5. 변경 전, 후의 히트싱크 모델링 예

시뮬레이션을 바탕으로 볼록형태의 히트싱크 시제품을 제작하여 비교한 결과, 변경전의 오목형태 히트싱크에 비하여 변경된 볼록형태 히트싱크의 광 추출효율은 약 18%의 상승효과가 있었다.

2.2. 방열설계

LED 칩의 발광 효율이 높아진 것은 사실이지만, 아직 LED 칩의 발열량은 상당한 수준이다. 방열 대책을 마련하지 않으면 LED 칩의 온도가 너무 높아져 칩 자체 또는 패키징 수지가 열화하게 된다. 결국 이것이 발광 효율의 저하와 칩의 단수명화를 초래하게 된다. LED의 가장 큰 특징인 장수명(長壽命)을 손해보지 않기 위해서는, 칩의 열을 외부에 확산시키기 위한 기술 개발이 필수적이다.

LED 다운라이트의 고신뢰성 확보를 위하여 히트싱크 방열 설계를 하였다. 히트싱크의 방열 설계는 15W급 LED 다운라이트에 적합할 뿐만 아니라 20W급 LED

다운라이트에도 공용으로 사용 되도록 설계 하였다. 20W급 LED 다운라이트에서 드라이브 효율 등을 감안하여 18W정도가 LED에 인가되고 또한 광 효율을 고려하면 발열과워는 약 15.3W 정도이나, 일반적으로 방열 설계 시 over design을 고려하여 20W 모두발열로 전환한다고 가정하고 ice pak 4.48버전 소프트웨어를 사용하여 방열 시뮬레이션을 하였다.

시뮬레이션 조건은 아래와 같다.

- Boundary : 202mm * 202mm * 202mm

Natural Air convection

- Flow: Laminar Flow

- Semi-closed space or opened space

- Room Temperature : 25°C

- Conduction, Convection, Radiation considered

- Source : Equivalent Thermal Resistance

- Power : 20W

- Reflector Emissivity ~ 0.77 (Anodized surface)

이와 같은 조건으로 열저항(R_{th}) 약 9K/W인 XP-E 패키지를 이용하여 opened 공간에서의 시뮬레이션 결과를 그림 6에 나타내었다.

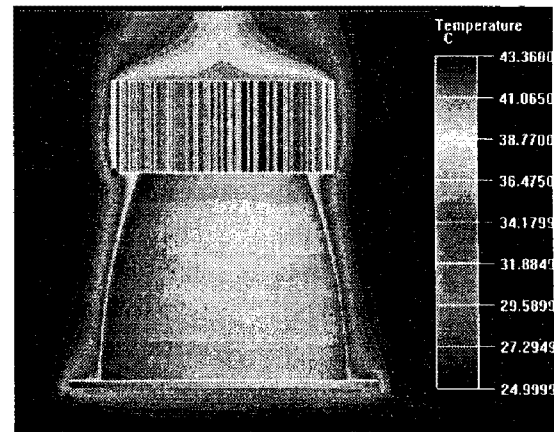


그림 6. 방열시뮬레이션 결과

시뮬레이션 결과 Reflector 온도(T_r) 40.74°C, Junction 온도(T_j) 56.22°C, 전체 시스템 열저항(R_{th}) 0.77 K/W를 나타 내었다.

2.3. 시제품 제작 및 측정결과

이상과 같이 광학 및 방열 시뮬레이션 최적결과를 토대로 15W LED 다운라이트 시제품을 제작하였다. 그림 7은 제작된 시제품 형상이다.

시제품 제작에 사용된 LED 패키지는 Cree사의 XLamp XP-E P4 Group 으로서 자체 보유 적분구(J&C Technology, LMS-120)로 측정된 LED 패키지의 주요 측정결과를 표 1에 나타내었다.

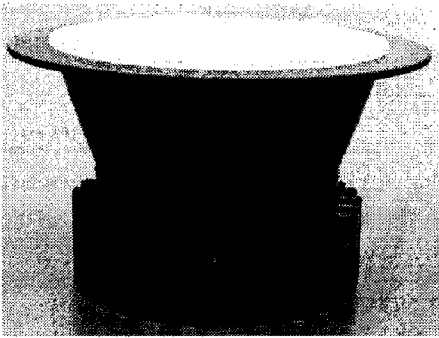


그림 7. LED 다운라이트 시제품 형상

표 1. 시제품에 적용된 LED 패키지 측정 결과

패키지 사이즈(mm)	3.45*3.45*2.0t
효율(lm/W)	75.8
색온도(K)	3190
연색성(Ra)	83
방사각 (FWHM)	115°

LED 패키지 배열은 시뮬레이션에서 모델링 된 배열과 동일하게 12EA LED 패키지를 배열 하였다. Reflector 또한 최적 길이인 45mm로 제작하여 몸통 내부벽면에 미러반사 성질의 반사시트(Vikuiti™ ESR)를 부착하였다. 히트싱크와 메탈 PCB를 Grease(Berquist, TIG830SP)를 사용하여 접합하고 자체 개발한 94%의 광 투과율을 갖는 확산판을 접합하여 조립된 LED 다운라이트를 적분구(J&C Technology, LMS-400 ipt) 중앙에 위치시키고 측정하였다. 이때 14.0W 정전류를 인가하였으며, 측정한 결과를 Osram사의 CFL과 비교하여 표 2에 나타내었다.

표 2. LED 다운라이트 측정결과 비교

구 분	Osram CFL	LED 조명
Power(W)	24	14
효율(lm/W)	38	69
색온도(K)	2,700	3,060
연색성(Ra)	82	82

상기 결과는 열효율 및 구동 드라이브 효율이 고려되지 않은 측정치로서, 95%열효율 및 90% 구동 드라이브 효율을 고려하면 실제 LED 다운라이트의 효율은 59lm/W로 예측되어 진다.

또한 시제품의 메탈 PCB 중심부분의 온도는 48.4℃이었으며, 이를 근거로 하여 LED에 인가된 Power 및 LED 패키지 열저항을 고려하여 계산된 Junction 온도(T_j)는 약 58℃로서 시뮬레이션 결과와 비슷한 결과이다.

또한 앞서 적분구를 이용한 측정방법은, 배광시험기 측정 장비를 이용한 측정방법과는 차이점이 있다. 즉 적분구를 이용한 측정 시 LED 다운라이트에서 추출된 빛이 적분구 내부 벽면에 반사되어 다시 LED 다운라이트의 외부몸통에 흡수되는 빛이 존재하게 되므로 실제 배광 시험기를 이용하여 측정하게 되면 다운라이트의 효율 상승이 예측된다.

3. 결 론

Cree사의 XLamp XP-E P4 LED 패키지를 적용하여 LED 다운라이트의 광학, 방열 설계를 하여 시제품을 제작하고 14W 정전류를 인가하여 측정한 결과 광속 966lm, 상관색온도 3,060K, Ra 82의 광학 특성 및 Junction 온도(T_j) 약 58℃의 방열 성능을 갖는 15W급 LED 다운라이트를 개발하였다. 이는 25W급 CFL 다운라이트를 대체할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- (1) 김치현, "LED 조명, 미래의 빛이 되려면", LG business Insight, 2009. 6. 3.
- (2) 장선호, 권영희, "LED 산업동향 및 정책추진 방향", IT SoC Magazine, 2009. 7.
- (3) 여인선, 김완호, 박준석, "LightTools을 사용한 LED 조명 광학설계", 조명전기설비학회지, vol.16, No.1, p.15, 2002, 2.