

이제서야 본 LED광원 특성과 조명시스템 응용

정봉만<한국에너지기술연구원 책임연구원>

1 제 2의 빛의 혁명 - 고체광원조명 (Solid State Lighting)

1.1 조명기술과 에너지

2001년 기준 국가 총 전력의 21%(54,167GWh, 총 에너지의 약 6%)을 조명용으로 사용하고 있다. 또한 지난 15년간 전기소비 증가율이 10.7%인 반면 조명용 전기소비 증가율은 11.9%로 조만간 선진국

수준인 25%로 증가될 전망이다.

이와 같이 막대한 량의 에너지를 소비하는 조명기술은 광원, 구동장치(안정기), 등기구가 일체화된 시스템 기술로써 <표 1>에서 보듯 에너지 이용효율이 0.3~20%로 매우 낮아 다른 어느 기술보다 에너지 절약 잠재량이 크고, 실현가능성이 높으며, 시장 침투력이 큰 기술 분야이다. 예로써 지난 10여 년간 조명기술은 부분적으로 30~90%의 효율향상을 달성하

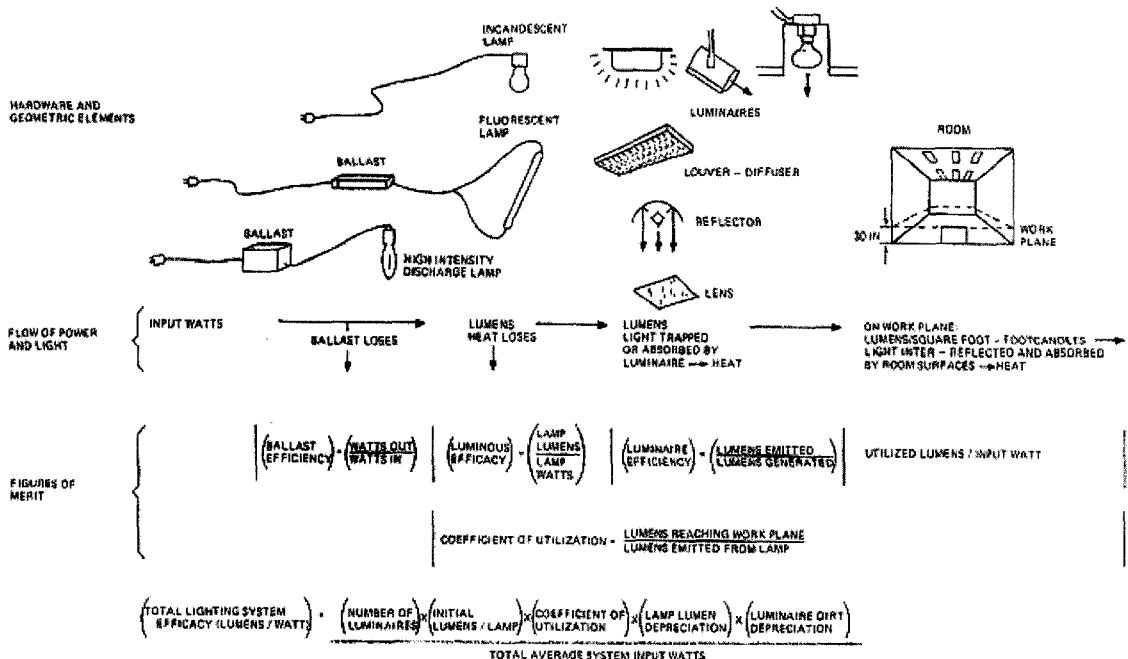


그림 1. 조명시스템의 구성과 효율

특집 : 조명신기술(2)

여(T8/T5램프, 전자식안정기, 고조도 반사갓, 전구 식 형광램프, LED 교통신호등 등), 현재 폭넓게 상용화 보급되고 있으며, 보급률을 감안하면 조명에너지의 10%는 절약한 것으로 평가된다. 이는 국가 총 에너지 소비량의 약 0.6%에 해당하는 것으로 국가 총 에너지절약 실적 1.9%의 약 30%를 조명부문에서 이룩한 결실이라 할 수 있다.

이와 같이 에너지기술과 밀접한 관련이 있는 조명 기술은 1879년 빛의 혁명이라 일컬어지는 에디슨전구 발명 이래 지난 1세기 이상 백열전구와 형광등으로 대표되는 방전등과 이에 적합한 안정기, 등기구 중심으로 기술개발이 이루어져 왔다.

표 1. 조명시스템의 효율수준

광원 효율	3.5%(백열등)~35%(HID) [10~100lm/W]
안정기 효율	75%(형광등) ~ 100%(백열등)
등기구 효율	8%(Colored) ~ 90%(고반사, No louver)
조명시스템 효율 : 0.3 ~ 20%	

1.2 LED 광원기술의 발전

반면 반도체기술을 응용하는 LED는 1980년대 초까지만 하더라도 발광효율이 1% 수준에 머물렀으나 80년대 후반 AlGaAs기술을 이용한 고휘도 적색 LED의 출현과 함께 색 필터를 붙인 백열전구보다 높은 발광효율을 달성하였으며, 이때부터 LED가 장수명과 고 신뢰성을 요구하는 비상구, 교통신호등 자동차의 브레이크등과 같은 특수조명에 적용되어 경쟁력 있는 새로운 광원으로써 가능성이 제기되었다.

1992년 InGaAlP기술이 개발됨으로써 초 고휘도 적색 및 주황색 LED가 상용되기 시작하였으며, 1993년 일본 니찌아화학에서 InGaN 고휘도 청색 LED가 개발되었고, 1995년에는 고휘도 녹색 LED가 개발됨으로써 오랜 숙원이던 빛의 삼원색인 적색, 황색, 녹색 고휘도 LED가 등장하게 되었다. 1996년

에는 청색 LED에 형광물질을 첨가시켜서 구현한 백색 LED가 개발되었고, 2000년에는 LED의 성능지수가 100(lm/W)를 능가하는 InGaAlP 적색 LED 기술이 소개되기도 하였다. 백색 LED의 휘도가 높아짐에 따라 휴대폰의 Color TFT-LCD의 Back-light로 적용되기 시작했으며, 다음 응용단계인 LCD Monitor의 Back-light용 백색 LED도 개발되었다.

현재는 일반조명용 광원으로 응용이 가능한 고휘속(High flux), 고출력(High power) 백색 LED 개발에 심혈을 기울이고 있으며, 2002년 LumiLED사에서 1×1(mm) 크기의 대형 칩을 사용하여 100(lm/5W)의 고휘력 LED를 개발 완료하였다.

1.3 LED 조명시대의 도래

초기 LED가 개발된 이후 30여년이 지난 이 시점에서 LED를 이용한 반도체 조명이 새롭게 부각되고 있는 이유는 무엇일까? 첫째로 성능지수 측면에서 지난 10년마다 발광효율이 30배씩 증가하였고, 가격측면에서 10년마다 10분의 1로 하락시켰던 화합물 반도체 기술의 발달을 들 수 있다. 이와 병행하여 둘째로 특수 조명분야에서 기존 조명기구에 비해 90%이상의 에너지절약 실현, 10배 이상의 장수명과 유지보수비용 절감, 고 시인성과 친 환경성 등의 장점이 입증되어 빠른 속도로 상용화 보급되고 있으며, 셋째로 무한한 기술개발 가능성과 지속적인 성능개선과 가격 하락으로 일반조명 용 광원으로서의 경제성이 크게 개선되었기 때문이다.

이에 따라 주요 기술보유국을 중심으로 제 2의 빛의 혁명이라는 기치아래 범국가적인 과제로서 LED 조명기술개발을 추진하고 있다. 일본의 경우 1998년 “21세기 빛 프로젝트”라는 명칭 아래 산학연이 연계하여 효율이 좋은 백색 LED를 광원으로 2010년까지 조명에너지의 20% 감소와 CO₂ 배출량을 1990년 수준으로 끌어내리는 목표를 수립하고 추진 중에

있다. 미국의 경우 DOE(에너지부)를 중심으로 “비전 2020”라는 차세대 조명프로젝트(Next generation lighting initiative project)를 기획하여 2020년까지 경쟁력 있는 200lumen/W의 LED기술 개발을 목표로 하고 있다. 대만의 경우 반도체 조명을 국가 핵심사업으로 지정하여 11개의 회사를 중심으로 2005년까지 일본을 추월하려는 야심 찬 계획을 선보이고 있다. 우리나라도 2003년 10대 성장동력산업의 디스플레이분과 포함되어 2004년부터 본격적으로 추진할 계획이다.

표 2. 각국의 국가주도 기술개발 계획

일본	<ul style="list-style-type: none"> ■ “21世紀 光 Project” <ul style="list-style-type: none"> • 백색 LED를 이용한 반도체조명계획 수립 (최종목표 120lm/W) • 2010년까지 조명에너지 20% 감소 • CO2 방출 1990년 수준으로 억제
미국	<ul style="list-style-type: none"> ■ “Next Generation Lighting Initiative(Vision 2020)” <ul style="list-style-type: none"> • 2020년 까지 200lm/W 개발, 조명시장 50% 점유 목표
대만	<ul style="list-style-type: none"> ■ “Next Generation Illumination Light Source Project” <ul style="list-style-type: none"> • 2005년 까지 실험실 수준 100lm/W, 양산 50lm/W 목표
한국	<ul style="list-style-type: none"> ■ “차세대 10대 성장 동력사업” <ul style="list-style-type: none"> • 디스플레이 분과에 포함(2003)

2. 조명측면에서 본 LED 광원의 특성과 응용분야

21세기 빛의 혁명을 주도하고 있는 LED를 조명용 광원으로 사용하기 위해서는 무엇보다 기존 광원과 비교하여 LED 광원의 구조적, 광학적, 전기적, 환경적 특성을 이해하고, 이러한 특성을 조명기구 설계 시 적절히 반영하는 것이 요구된다.

LED 광원의 주요 특징을 살펴보면 다음과 같다.

- 구조적으로 기존의 광원과는 달리 작은 점광원으로써 유리전극, 필라멘트 및 수은(Hg)을 사용하지 않아 매우 견고하고, 수명이 길며, 환경 친화적이다.
- 광학적으로 선명한 단색광을 발광하여 연색성이

나쁜 반면 색을 필요로 하는 조명기구에 적용 시 빛 손실이 매우 작고 시인성이 향상되며, 지향성 광원으로써 등기구 손실을 크게 줄일 수 있다.

- 전기적으로 특정전압 이상에서 점등을 시작하고 점등 후에는 작은 전압변화에도 민감하게 전류와 광도가 변화한다.

- 온도상승 시 허용 전류와 광 출력이 감소하고 많은 열이 발생하는 등 주위온도 및 동작온도 변화에 대해 매우 민감하게 동특성이 변화한다. 만약 허용치 이상의 전류가 흐를 경우 수명이 대폭 감소하고 성능이 크게 저하되므로 적절한 열처리 장치와 전류를 제어하는 구동장치(Ballast)를 필요로 한다.

표 3. 백열전구와 LED광원의 주요 특성 비교

백열전구	LEDs
Generate intense IR & heat	Relatively cool
Relatively high current draw	Low current draw
Last around 3 years	Last up to 15 years
Suddenly burn out	Dim with age
Fragile, susceptible to shock	Extremely durable
Hard to control lighting patterns	Ability to control lighting patterns
Relatively high total cost-of-ownership	Relatively low total cost-of-ownership
Relative large and bulky	Compact
Styling limitations	Afford new styling opportunities

2.1 작고 견고한 구조(장 수명)

LED는 기존의 유리전구 형태의 광원과 다르게 단단한 고체형태(Solid state)의 작은 점광원으로 개당 광 출력이 매우 작은 반면 견고하고 수명이 긴 특성을 지니고 있다.

LED 광원의 수명은 100,000 시간 정도로 산출되어지며, 여기에 환경의 변화 및 물리적인 악조건을 감안하여도 통상 40,000~50,000 시간의 수명을 예측하고 있다. 이는 기존 전구의 수명인 1000~4000 시간에 비해 비교할 수 없을 정도의 긴 수명으로 조명기구의 유지보수를 대폭 절감할 수 있는 장점이 있다.

LED의 개당 광 출력은 수 Lumen 정도로 조명용 광원으로 사용하기 위해서는 수십~수백 개를 직렬로 연결하여 사용하며, 이러한 작은 점광원을 적절히 배열함으로써 다양한 형태를 갖는 조명기구의 설계가 가능하다.

주요 응용분야로는 유지보수가 어렵고 크기가 제한된 후미진 곳, 광원을 숨길 필요가 있는 내장형 조명기구와 비상구 등에 유리하다.

2.2 좁은 파장대의 단색광 발광과 높은 시인성

LED는 반도체 종류에 따라 결정되는 좁은 파장대의 단색광을 발광하므로 특정한 색을 요구하는 조명기구에 적용할 경우 탁월한 성능과 유효 발광효율을 기대할 수 있다.

현재 통용되는 LED의 발광효율은 20(lm/W) 수준으로 백열전구의 15(lm/W)를 추월하였으며, 각종 신호용 조명기구에서 경이적인 에너지절약효과를 발휘하고 있다. 예로서 적색 백열전구 신호등의 경우 적색 투과율이 10% 정도로 적색 발광효율은 1.5(lm/W) 정도로 감소하는 반면 LED는 선명한 적색 그 자체를 20(lm/W)로 발광하기 때문에 전구식에 비해 90% 이상의 에너지절약이 가능하게 된다. 이밖에 LED 교통신호등은 장 수명에 따른 유지보수비용 75% 절감, 시인성 향상에 따른 교통사고 저감 등이 기대된다. 주요 응용분야로는 LED 교통신호등을 비롯하여 항공장애등, 비상구, LED 등명기 등이 있다.

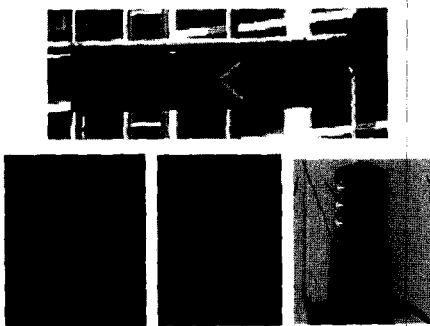


그림 2. LED 교통신호등과 해상용 등명기 설치 예

2.3 용이한 광 출력 제어와 빠른 응답

LED의 광 출력을 제어하기 위해서는 전원전압(전류)을 제어하는 방법과 전원전압을 일정하게 유지하면서 펄스폭을 변조하는 방법이 있다. 일반적으로 신호등과 같이 단순한 조명장치는 전압(전류)제어 방식을, 전광판과 같이 다양한 밝기와 색을 연출하여야 하는 복잡한 조명장치는 디지털 기술을 이용한 펄스 폭 변조방식을 사용하고 있다.

기존 백열전구의 경우 빛을 발광하기 위해서는 전원 공급 후 필연적으로 필라멘트가 가열되는 시간이 필요하게 되며, 통상 2/10초가 소요되는 것으로 평가되고 있다. 이에 반해 LED는 전원 공급과 동시에 전자와 양전하가 결합하여 순간적으로 빛을 발광하게 된다. 이러한 순간 점등특성을 이용하여 특수 조명기구에 응용할 경우 큰 효과를 기대할 수 있다.

예로서 자동차의 브레이크등(적색)에 적용할 경우 반사경을 사용하지 않아 컴팩트하게 다양한 모양으로 설계가 가능하며, 폐차 시 까지 램프의 교환 없고 소비전력을 1/10로 줄일 수 있는 장점 외에 빠른 점등 응답으로 교통안전에 크게 기여하는 것으로 평가되고 있다. (시속 100km/h차량의 경우 전구식 보다 5.5m 앞에서 감지 가능)

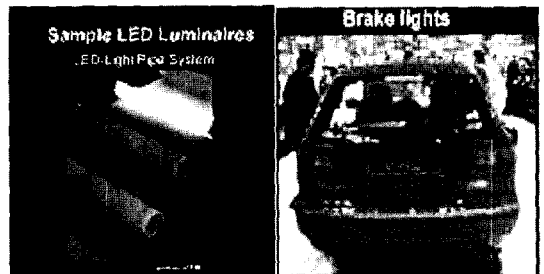


그림 3. 다양한 색 연출과 자동차 브레이크 램프

2.4 큰 지향성 - Task lighting

LED는 반사 컵과 에폭시 렌즈의 구조 등에 의해 배광특성이 결정되며, 최대 광도를 발산하는 광축방

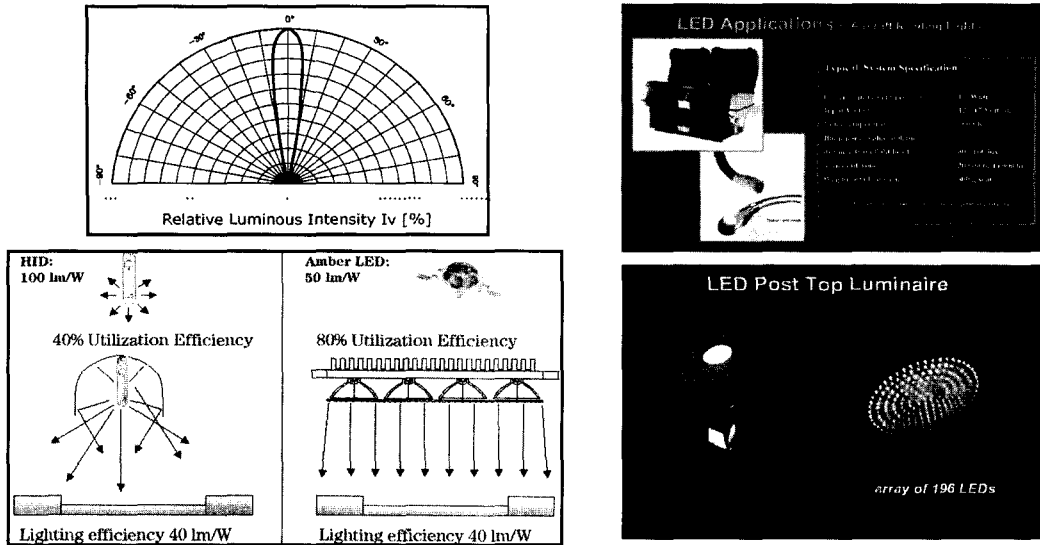


그림 4. 지향특성과 등기구 효율비교

향을 중심으로 좌우각도에 따라 광도가 감소한다. 이 때 중심 축 방향의 최대광도의 50%되는 각도를 반치각 또는 가시각($\Delta\theta$)이라 하며, 최대광도와 더불어 LED의 발광효율을 결정하는 중요한 요인이다. 반치각이 클수록 중심 축 광도는 작아진다.

[그림 4]의 좌측은 LED의 가시각과 이에 따른 등기구 효율을 비교한 것으로 작업 면(Work plane)이 특정 지역으로 제한되어 있을 경우 목적조명(Task lighting)이 가능하여 기존광원 보다 2배의 등기구 효율이 가능한 것을 알 수 있다. 그림의 오른쪽은 이러한 특성을 응용한 사례이다.

경우 열 발생비율이 높은 것을 알 수 있다.

표 4. 광원의 에너지 출력 비교

Lamp Type	Light	IR	UV	Heat	Ballast
Incandescent(100W)	10	72	-	18	-
Fluorescent(40W)	20	33	-	30	17
Fluorescent(40W excluding ballast)	24	40	-	36	-
Mercury(400W)	15	47	2	27	9
Metal halide(400W)	21	32	3	31	13
High-pressure sodium(400W)	30	35	-	20	15
LED	15	-	-	60	25

2.5 낮은 UV / IR

가시광선의 좁은 파장대를 발광하는 LED 광원은 적외선과 자외선 방출에 의한 열전달은 거의 없는 반면 접합부위에서 큰 열 발생한다. 이러한 열 발생은 LED 성능을 크게 좌우 하므로 조명시스템 설계 시 열처리 기술은 매우 중요한 요인의 하나로 고려된다. <표 4>는 입력전력에 대한 주요 광원의 광 출력, IR/UV 출력, 열 발생, 안정기 손실에 대한 비율로써 기존 광원의 경우 IR 발생비율이 높은 반면 LED의

IR과 UV가 적다는 것은 빛에 의해 피사체에 전달 되는 에너지가 적다는 의미로 국부적으로 발열된 에너지를 외부로 적절히 방출할 경우 박물관 조명, 냉동냉장고의 내부 조명에 우수한 효과를 기대할 수 있다. 예로써 현재 형광등을 주로 사용하는 냉장 쇼 케이스의 경우 짧은 수명에 깨지기 쉽고, 불균일한 조도와 빛에 의한 열전달 등이 문제되나 LED를 사용할 경우 작은 점광원을 균일하게 분배하여 조도를 균일하게 유지하기 용이하고, 외부로 방열처리 시 냉장효율을

증가시킬 수 있다. 또한 형광등의 경우 저온에서 광출력이 25% 감소하는 반면 LED는 광출력이 증가하여 광 이용효율 향상도 이를 수 있다.

3. LED광원의 동특성

3.1 I_F-V_F 특성

LED에 인가되는 전압(V_F , V)에 대한 전류(I_F , mA)의 변화특성으로, 저항 소자와는 달리 LED는 일정전압이 인가될 때까지 전류가 흐르지 않다가 임계전압 이상에서는 작은 전압변화에 대해 급격히 전류가 변화하는 특성을 가지고 있다.((그림 5)의 (a))

이때 임계전압은 발광 파장대를 결정하는 반도체의 에너지 밴드에 의해 좌우되므로 발광 색에 따라 임계전압이 변화하게 된다.

3.2 I_V-I_F 특성

LED에 흐르는 순방향 전류(I_F , mA)에 대한 광도(I_V , mcd)의 변화특성으로 정격 허용전류 내에서는 전류와 광도는 서로 비례한다.((그림 5)의 (b))

그러나 허용 전류보다 큰 전류가 흐를 경우 열 손실로 직선성이 없어지며, 이는 발광효율의 저하 및 수명 단축의 원인이 된다.

3.3 I_F-T_a 특성

주위온도(T_a , °C) 변화에 대한 허용 순방향 전류(I_F , mA)로써 주위온도가 상승함으로써 허용전류가 크게 감소한다.((그림 5)의 (c))

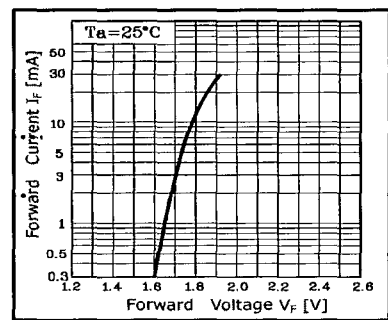
이러한 특성으로 LED 조명기구는 설치장소와 주위환경에 따라 조명성능이 크게 변화하고 심할 경우 소손될 수 있으므로 조명기구 설계 시 신중히 고려하여야 한다.

3.4 I_V-T_a 특성

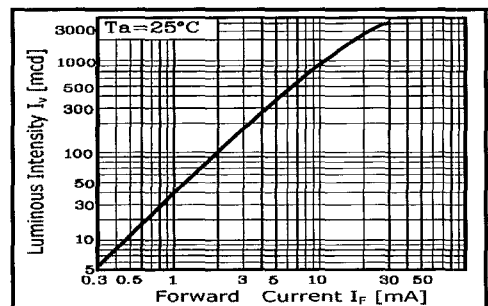
순방향 전류(I_F , mA)를 일정하게 흐르게 하고(통상

$I_F=20\text{mA}$) 주위온도(T_a , °C) 변화에 대한 광도(I_V , mcd)의 변화특성으로 (그림 5)의 (d)에서 보듯 온도가 증가함에 따라 광도가 크게 감소하는 것을 알 수 있다.

이러한 특성은 통상적으로 제조회사의 카다로그에는 제공하고 있지 않으나 I_F-T_a 특성과 더불어 LED 조명기구 설계 시 반드시 고려하여야 할 중요 요인이다. 예로써 옥외에 설치되는 전광판에 응용할 경우 주위온도에 관계없이 일정한 전류(전압)를 공급하면 주야간 계절별로 밝기가 크게 변화하게 된다. 특히 상온 기준으로 구동전류(전압)를 설계했다면 주위온도가 상승하면서 열 발생이 증가하고 광도는 감소하며, 허용전류도 크게 감소하여 안전 운전영역을 벗어나 과전류가 흐르게 된다. 이는 LED의 수명감소와 성능저하의 주된 요인이다. 따라서 첫째로, 설치하고자 하는 LED 조명기구의 주변 동작온도 범위를 조사하고, 둘째로 I_F-T_a 특성곡선에서 최대 허용전류를 산출한 다음, 셋째로, I_V-T_a 특성곡선을 이용하여 상온에서의 구동전류를 역으로 환산하여 설계하는 것이 요구된다.

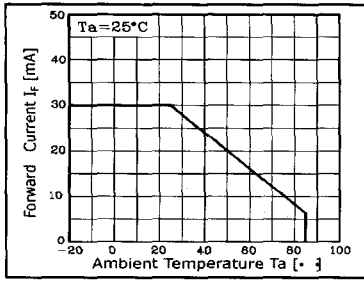


(a)

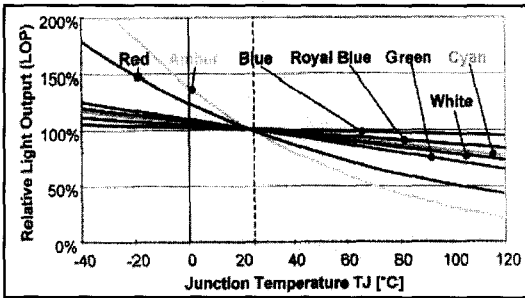


(b)

조명측면에서 본 LED광원 특성과 조명시스템 응용



(c)



(d)

그림 5. 전형적인 LED의 동특성

4. LED 조명시스템 설계

[그림 6]은 LED 조명시스템의 구조이다. 그림에서 보듯 LED 조명시스템은 집적된 LED 광원(LED Array)을 중심으로 전원장치(Ballast), 열처리장치(Heat Sink), 광학장치(Lens, Diffuser) 등으로 구성된다. 이러한 LED 조명시스템은 LED광원 자체의 여러 장점에 불구하고 이를 이용한 시스템 설계에는 다음의 몇 가지 요인을 고려하여야한다.

첫째로 조명기구의 성능과 내구성을 최대한 유지하기 위해 주변온도를 고려하여 정격 허용전류 내에서 일정한 광도유지가 가능하도록 전원구동장치(Ballast)를 설계하여야한다. 일반적인 LED 조명기구는 직류 수십 V의 정 전류원으로 구동되며, 이 경우 주위온도가 상승하면 광도가 저하하고 허용전류도 감소한다. 이러한 조명기구를 고온의 옥외에 설치할 경우 광도 저하 및 허용전류 감소에 의한 과전류로 치명적인 손상을 줄 수 있다. 실제로 온도에 대한 동특성 변화가

가장 심한 황색 LED의 경우 상온에서 허용전류의 20~30%(70°C 허용전류의 40~50%) 수준으로 설계하여야만 70°C에서 광도변화율 20% 이내로 유지할 수 있다.

둘째로 작은 점광원과 높은 지향성을 가진 LED를 다수 결합하여 만드는 조명기구는 사용자에게 글레어를 초래하여 불편감 및 피로감을 줄 수 있다. 따라서 일반조명용 제품으로 응용을 위해서는 용도에 맞는 배광을 가질 수 있도록 적절한 렌즈 및 조명기구가 설계되어하며, 또한 다수의 LED를 집적화하면서 야기되는 국부적 열 발생과 이를 처리하는 기술이 시스템 성능을 크게 좌우한다.

이와 병행하여 새로운 광원을 사용하는 새로운 조명기구로써 이에 적합한 조명시스템의 설계와 해석기법 개발 및 관련 규격의 표준화에 대한 연구가 요구된다.

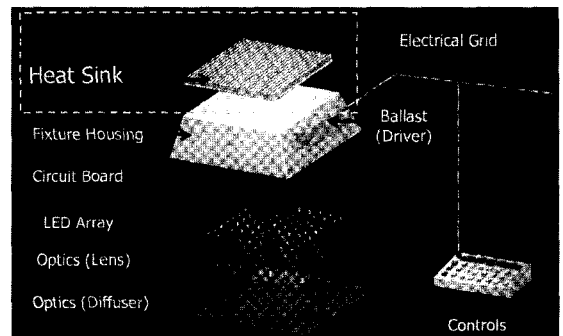


그림 6. LED 조명시스템의 구조

◇ 저 자 소개 ◇



정봉만(鄭鳳晩)

1954년 12월 6일생. 1980년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1984년 충남대학교 대학원 전자공학과 석사 졸업. 1990년 충남대학교 대학원 전자공학과 박사 졸업. 1980년 현재 한국에너지기술연구원 전기·조명기술연구센터 책임연구원. 1998~1999년 고효율조명시스템 연구회장. 주요관심분야 : 환경친화적 고효율 조명기술, 전력부하관리기술.