



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

LED를 이용한 농작물 재배 효율에
관한 연구



2011 年 2 月

釜慶大學校 産業大學院

電氣工學科

辛東洛

工學碩士 學位論文

LED를 이용한 농작물 재배 효율에 관한 연구

指導教授 裴 鍾 一

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함



2011 年 2 月

釜慶大學校 産業大學院

電氣工學科

辛 東 洛

辛東洛의 工學碩士 學位論文을 認准함

2010 年 12 月

主審 工學博士 權 聖 烈 (印)

委員 工學博士 朴 昶 炫 (印)

委員 工學博士 裴 鍾 一 (印)

목 차

목차	i
그림 목차	ii
표 목차	iii
Abstract	iv
제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경	1
제 2 장 본 론	4
2.1 LED와 빛의 스펙트럼	4
2.2 LED에서 방사되는 빛의 특성	11
2.3 LED 모듈 구성	19
2.4 LED 조도와 색상 제어	24
제 3 장 결 론	30
참고 문헌	31

표 목차

표 1 lx로 표시한 밝기의 예	11
표 2 $1[\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}]$ 당 [x] 와의 관계	12
표 3 청색, 적색 LED의 투과율	16
표 4 방사각에 따른 LED의 빛의 세기	17



그림 목차

그림 1 LED 식물재배	2
그림 2 햇빛의 스펙트럼	5
그림 3 백열등의 빛 스펙트럼	6
그림 4 3파장형광등의 빛의 스펙트럼	7
그림 5 기존의 식물 성장의 이상적 빛 스펙트럼	8
그림 6 태양의특성을 반영한 식물 성장의 이상적 빛 스펙트럼	9
그림 7 광량과 전류와의 관계	13
그림 8 거리에 따른 광량	15
그림 9 방사각에 따른 빛의 밝기	17
그림 10 색 제어 가능한 LED 조명의 블록도	20
그림 11 (a) LED 구동 회로의 회로도, (b) 구동 회로의 동작 파형	21
그림 12 (a) RGBW LED 모듈의 연결도와 (b) 외형	23
그림 13 CIE 1931 x, y 색도좌표	24
그림 14 LED조명 제어 프로그램 순서도	28
그림 15 RGBW 모듈과 구동회로	28
그림 16 LED 구동회로의 효율	29
그림 17 RGBW LED 제어를 통한 스펙트럼	29

A Study on the Crops Growing Efficiency Using LED

Dong-Rak Shin

Department of Electrical Engineering

Graduate School of Industry

Pukyong National University

Abstract

The LED of cultivation edible plants was compliance the variable of the photo-receptor pigment with the red light source and ultra red light source from long wave region. The mechanism of cultivation edible plants for each part was necessary the wavelength unit which is appropriate, the illuminant source, motor control and lens design of LED light source about plant. The photo-receptor pigment induces for a long daytime recognition, seed germination and anthesis etc, induction years exists in the state which is an inactivity within the cells and in compliance with the red light source to be converted in active

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

최근 LED의 성능이 빠르게 개선되면서, 조명업계 연구개발 종사자들은 끊임없이 LED를 이용한 응용제품의 개발과 백열전구 및 조명기구들을 대체하려는 연구와 노력을 거듭해 가고 있다. 최근 LED의 제어를 식물의 성장에 영향을 줄 수 있음을 통해 연구와 개발이 활발하다. LED 광색 파장을 통해 작물을 재배할 경우 광합성 촉진, 개화조절 및 당도와 사포닌 증가, 곰팡이 발생 억제 등 생육조절에 필요한 획기적인 성능을 볼 수 있기 때문에 재래식 농업방식을 개선할 수 있는 경쟁요소로 부상하고 있다 농업과 광기술을 융합한 애그리포토닉스(Agriphotronics)라 한다. 즉 조명을 이용한 농업이다.

식물 재배용 인공광원에는 형광등, 메탈할라이드등, 수은등이나 백열등이 주로 사용되고 있다. 이러한 광원들은 식물의 성장 및 광형태 형성에 불필요한 파장역의 광이 포함되어 있기 때문에 광이용효율(광 및 광강도)이 낮고 일정 공간 내에서 광원이 차지하는 비율이 높아 생산효율이 낮으며, 광선 중에 열선을 포함하고 있어 공조설비에 비용이 많이 소요된다. 또한 전력비 증가로 인하여 비용이 증가하게 된다. 반면에 고휘도화 및 저가격화 등에 따라 일반화되고 있는 LED가 새로운 식물재배용 인공광원으로 주목을 받고 있다.

LED의 제어를 통해 식물의 성장에 영향을 줄 수 있음을 통해 연구와 개발이 활발하다. LED 광색 파장을 통해 작물을 재배할 경우 광합성 촉진, 개화조절 및 당도와 사포닌 증가, 곰팡이 발생 억제 등 생육조절에 필요한 획기적인 성능을 볼 수 있기 때문에 재래식 농업방식을 개선할 수 있는 경쟁요소로 부상하고 있다. LED재배는 협소한 공간, 채광의 제한적 조건등의 불리한 조건 내에서 우수한 재배효과를 볼 수 있다. 그림 1은 서울 지하철역에서 각종 식물을 LED로 재배하는 사진이다.



그림 1. LED 식물재배

기존 사용되고 있는 LED등은 식물의 특성을 전체적으로 고려한 파장을 띄고 있다. 국내 (주)카스트친환경농업기술의 연구결과에 따르면 식물의 이상적 광특성을 연구를 통해 이상적 스펙트럼을 제시하였다.

본 연구는 LED를 이용한 효율적 재배의 방향 제시를 위한 LED광의 특성과 구동회로를 이상적인 스펙트럼에 맞추어 연구하였다.

LED를 이용한 식물재배 효율 향상을 위한 최적화된 스펙트럼에 맞춘 광원의 조건과 구동회로의 선정 및 스펙트럼 구성을 위한 RGBW 모듈구성에 대하여 연구하였다.



제 2 장 본 론

2.1 LED와 빛의 스펙트럼

LED(Light Emitting Diode)는 발광다이오드의 영어명을 줄인 것으로 빛을 발하는 반도체 소자를 말하며 각종 전자제품류와 계기판, 전자 표시판 조명에 활용되고 있다. 갈륨비소(GaAs)재질이나 이 재질에 인, 알루미늄 등을 첨가해서 만든 칩을 사용하는 LED는 직경 3, 5[mm]등으로 제작되며 발광색은 현재 빨강, 녹색, 노랑, 오렌지, 최근에는 파랑색 등이 개발되어 있다.

첨가하는 불순물의 함량에 따라 재질의 파장이 달라 파장은 인간의 가시광선영역인 400[nm]에서 700[nm]사이이며, 적색은 650-700[nm]대, 녹색은 500-570[nm], 황색은 580-600[nm], 오렌지색은 610-640[nm], 청색은 460-490[nm] 사이에서 파장을 형성하고 있다.

LED는 반도체라는 특성으로 인해 처리속도, 소비전력, 수명 등의 제반사항에서 큰 장점을 보여 각종 전자제품의 표시부품으로 각광 받고 있다.

기존의 램프에 비해서 눈이 부시거나 엘러먼트가 단락되는 경우가 없는 LED는 소형으로 제작되 각종 표시소자로 폭 넓게 이용되고 있으며 반 영구적인 수명(약 100만시간)과 적은 소비 전력으로 그 활용도가 높다. 최근 일본에서 질화갈륨비소와 사파이어등을 이용한 청색 LED가 상용화 되었다. 이 청색 LED의 개발로 인하여 LED 전광판은 풀컬러 구현이 가능해졌고 가격도 크게 낮출 수 있게 되면서 새로운 대형 디스플레이로 부상했다. 이는 식물 재배용 LED에 필요한 파장의 다양성에 큰 영향을 주었다

빛에는 여러 가지 색이 있다. 그리고 우리가 잘 알고 있듯 흰 빛에는 여러 가지 색의 빛이 섞여 있다. 즉 여러 가지 색, 예를 들어 빨간색, 파란색, 초록색, 노란색을 섞어 놓으면 우리의 눈에는 흰색으로 보인다. 그러나 빛의 색은 원래 각기 분리되어 있는 것이고, 각각의 빛깔의 색은 각기 다른 일을 한다. 즉 붉은색이거나 적외선(Infra Red)은 열 작용을 하고, 파란색

빛이나 자외선(Ultra Violet)은 화학적 작용을 주로 한다. 그리고 대부분의 식물은 초록색 빛을 싫어해서 반사해 버린다. 즉 식물의 성장에는 초록색이 아무런 도움이 안되므로 반사해 버리게 되는데, 그래서 식물은 초록색으로 보이게 된다. 그러나 엄밀한 의미에서는 초록색도 식물의 성장에 특이한 영향을 준다.

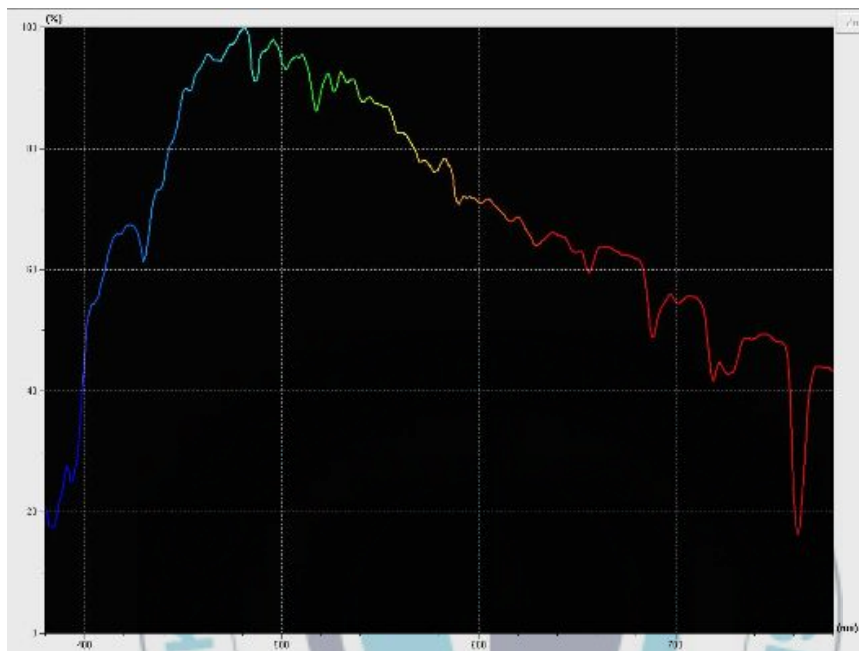


그림 2. 햇빛의 스펙트럼

햇빛은 흰 색으로 보이나, 햇빛에는 그림 2와 같이 자외선에서부터, 오른쪽으로 빛의 파장이 700nm 를 넘는 적외선 까지를 두루 포함하고 있다. 그 중에서도 파장이 400nm 보다 크고, 700nm 보다 짧은 가운데 영역인 가시광선의 속에 적색부터 보라색까지가 포함되어 있고, 460-480nm 대의 빛 부근에 가장 강한 피크를 이루고 있음을 알 수 있다. 이 그래프는 2010년 4월 1일, 오후 4시경 부산지역, 흐린 날 햇빛이 반쯤 드는 곳에서 수집한 햇빛 스펙트럼으로, 햇빛은 이렇듯 넓은 주파수대의 빛과 복잡한 분포를 가지고 있다.

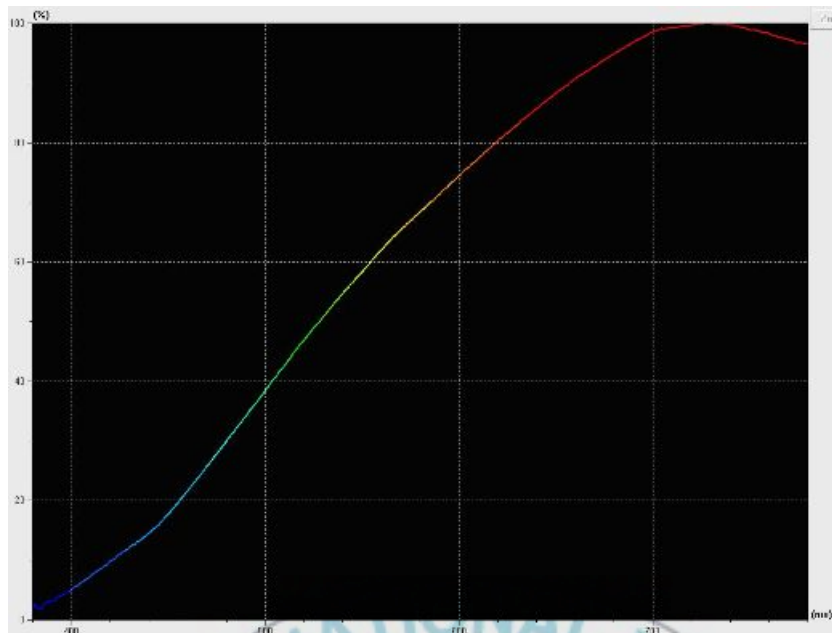


그림 3. 백열등의 빛 스펙트럼

그림 3의 빛은 60W 백열전등을 켜 놓은 후 약 1m 밖에서 잡은 빛 스펙트럼이다. 그래프에서와 같이 730nm 파장대의 빛이 가장 세고, 가시광선대에서는 빛의 파장이 짧을수록 그 세기가 약해지는 것을 볼 수 있다. 그러나 백열등에서도 그래프의 왼쪽 끝에서와 같이 미약하나마 자외선도 방출되고 있음을 알 수 있다. 그림 3에서 보듯 형광등에서 발산되는 빛 파장에는, 초록색, 노란색 등과 같이, 식물에서는 탄소동화작용에 필요하지 않는 색이 섞여 있다는 뜻이 된다. 이렇듯 식물은 태양에서, 또는 형광등이나 백열등에서 비치는 모든 빛을 조사하여도 광합성에는 자신이 선호하는 빛깔만 골라 섭취한다. LED는 이런 점에서, 식물이 좋아하는 빛을 쉽게 조합해 낼 수 있어 식물재배에 필요한 빛을 만들어 내는데 가장 유리하고 이 점이 다른 어떤 광원보다 좋은 이점이 된다.

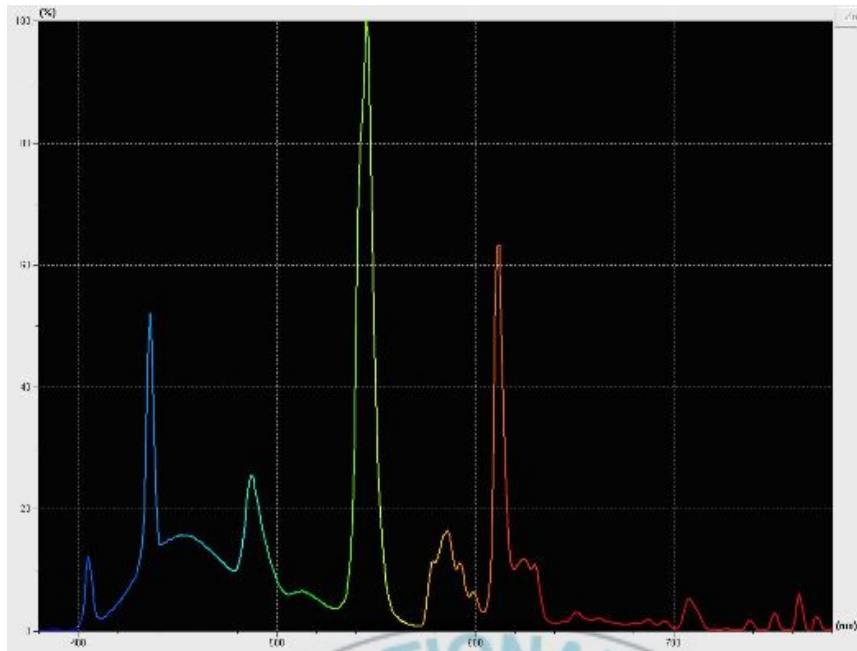


그림 4. 3파장형광등의 빛의 스펙트럼

그림3. 의 3 파장 형광등이란 말과 같이, 3가지 빛의 피크(440nm 대의 파란색과 550nm 대의 초록색, 620nm 대의 적색)가 있고 전체적으로는 파장대별로 매우 불규칙한 세기의 빛 스펙트럼을 포함하고 있다. 식물은 위의 세가지 빛 중 어느 것 아래서도 빛의 세기만 어느 정도 이상이 되면 성장을 한다. 물론 적색광만으로도 식물은 자라고, 청색광만으로도 식물이 성장할 수는 있다. 그러나 어떤 빛이 식물의 성장에 가장 효율적인가 하는 점은, 태양광이 아닌 인공광으로 식물을 재배하고자 할 때는 아주 중요한 문제가 된다. 태양광은 너무 세어 비록 비효율적으로 낭비가 되더라도 식물이 성장을 잘 하나, 인공광을 만들어야 하는 입장에서는 그 효율이 바로 생산비가 되기 때문이다. 그림 5는 식물이 가장 잘 성장하는 것으로 알려진 빛의 스펙트럼이다. 식물은 660nm 파장대의 적색과 450nm 파장대의 청색에서 가장 잘 자란다고 알려져 있다. 이것은 식물재배에서는 이미 잘 알려져 있는 정설이다. 그뿐이 아니라, 어떤 연구에서는 적색 대 청색의 비율이 5:1

일 때, 10:1 일 때, 또는 88%대 12%의 비율로 섞여 있을 때, 또는 20:1 로 혼합했을 때 식물이 가장 잘 자란다는 연구 결과도 많이 발표되어 있다.

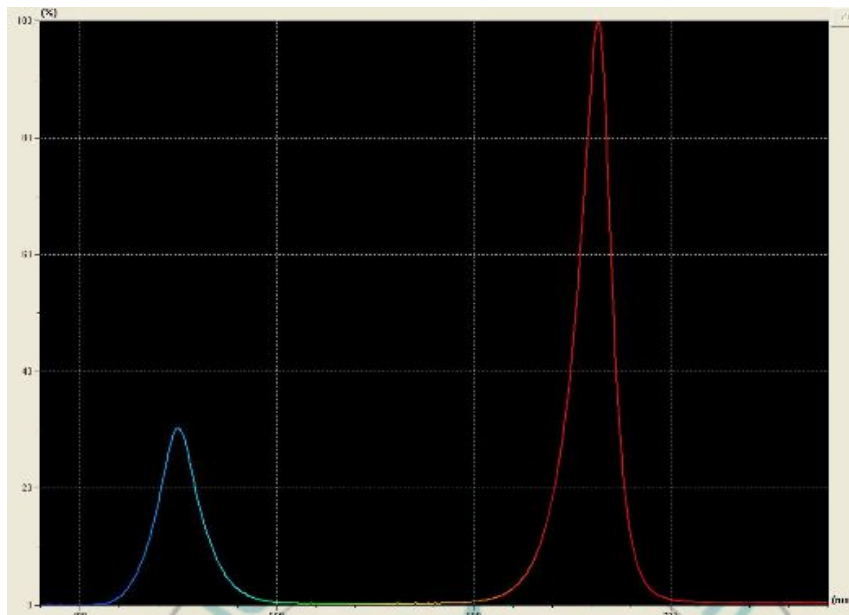


그림 5. 기존의 식물 성장의 이상적 빛 스펙트럼

그림 5 에서의 그래프는 1W 짜리 660nm 파장대의 적색 LED 4개와 450nm 파장대의 청색 LED 1 개를 섞어 점등시켜 얻은 스펙트럼이다. 그래프에서는 적색 빛의 세기가 10일때 청색이 3으로, 그 빛의 세기가 적색대 청색 10: 3으로 섞여있는 셈인데, 여기서 청색의 비율을 좀 낮춰 적색대 청색의 비율을 8 : 1 정도로 해야 한다. 이 그래프에서는 660nm 대의 적색과 450nm 대의 청색 빛 외에는 다른 아무 색도 포함되어있지 않아 말 그대로 2가지 색 만의 순수색 혼합이 되어있는 셈이다. 그러나, 실제로는, 시험에서는 꼭 이 두 가지 색깔의 빛만으로는 식물이 그리 만족스럽게 성장하지는 않는다는 결론을 얻었다.

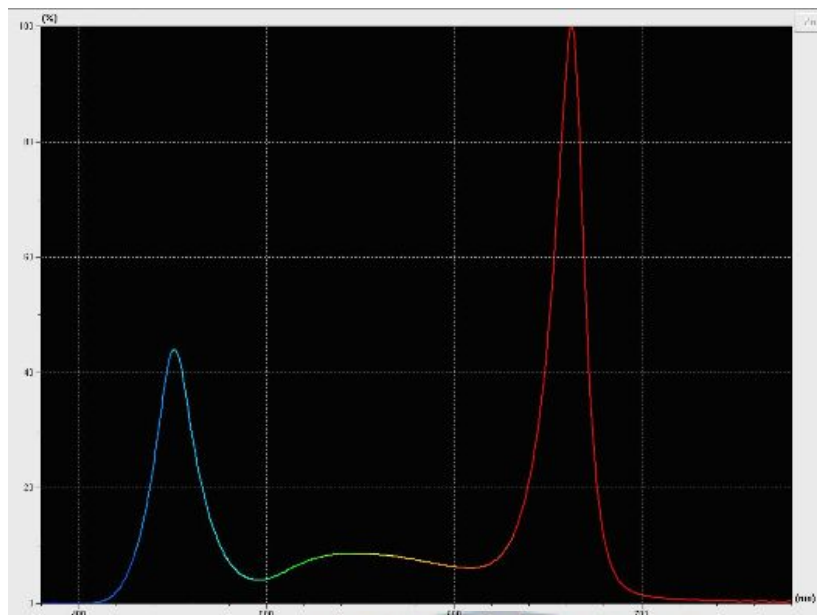


그림 6. 태양의특성을 반영한 식물 성장의 이상적 빛 스펙트럼

그림 6의 그래프는 카스트친환경농업기술의 연구에서 여러번의 시험을 거쳐 얻은, 가장 이상적인 식물성장을 위한 빛 스펙트럼이다. 물론 이 스펙트럼은 엽채류의 식물을 키우는 목적에서만은 확실히 이상적이라고 말할 수 있을 만큼 많은 시험을 거쳐 얻은 스펙트럼이기 때문이다. 여기에는 적색과 청색 외에 백색, 주황색 빛을 섞어 얻은 것이다. 즉 적색과 청색이 주를 이루는 스펙트럼 중에도 주황색, 황색, 녹색이 조금이나마 포함되어 있고, 청색의 분포도도 덜 날카롭다. 식물은 30억년쯤 태양광 아래 성장해 오고 발달해 왔다고 한다면, 인공광 역시 태양광에서의 특성은 그대로 지니고 있어야 할 것이라는 추정에서 이런 결론을 얻는다.

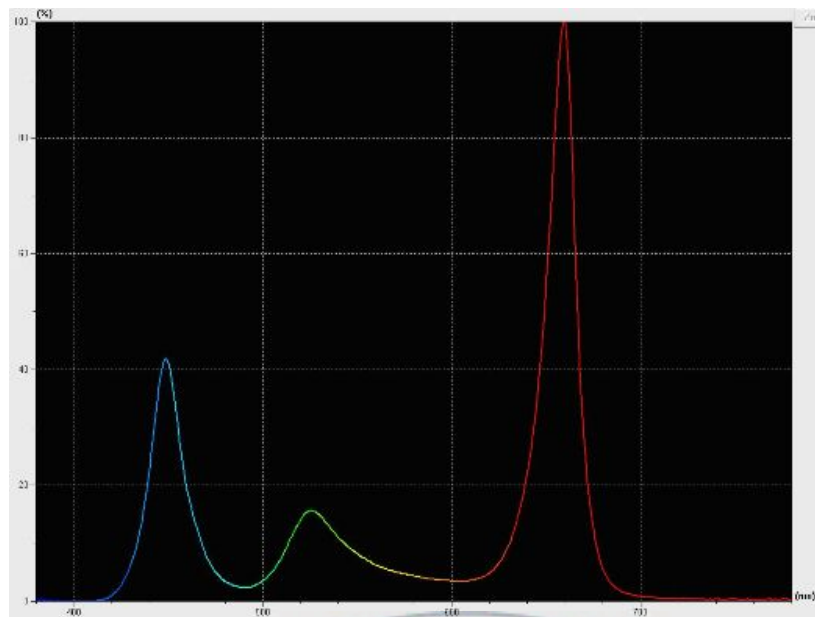


그림6. 초록색 파장이 혼합된 빛의 스펙트럼

위의 빛의 혼합에 다시 초록색 LED(530nm 파장대)를 조금 섞은 빛의 스펙트럼. 그래프의 530nm 파장대에 작은 피크가 있는 것이 보인다. 식물은 원래 초록색을 싫어해서 반사하므로 초록색으로 보이는 것이 사실이나, 이 그래프에서처럼 초록색 빛을 약간 섞은 빛에서 어떤 식물은 더 잘 자라기도 한다. 이렇듯 식물의 성장은 빛에 아주 민감하고 어떤 일률적인 추리를 거부한 채 제멋대로 자라기도 한다. 식물의 이런 조그만 변화나 민감성에 대한 모든 부분의 연구가 앞으로의 과제이기도 하다.

2.2 LED에서 방사되는 빛의 특성

빛에는 스펙트럼도 있지만 그 세기에도 강하고 약함이 있다. 사람의 눈으로 봐서 빛이 강하다, 또는 약하다는 걸 말할 때는 그 단위로 lx(룩스)를 쓴다. 예를 들어 적도지역에서의 여름철 한낮 바로 내리쬐는 햇빛의 강도는 50,000 ~130,000[Lx]가 된다.

표 1. lx로 표시한 밝기의 예

조건	단위 [lx]
한낮	10,000~25,000[lx]
인공조명(TV 스튜디오)	1,000[lx]
맑은 날의 해돋이, 일몰	400[lx]
권장 오피스 실내조명	320[lx]
매우 어두운 낮	100[lx]
복도, 화장실	80[lx]
권장 거실 밝기	50[lx]
맑은 날의 밝은 보름달	0.2~1[lx]
초승달	0.01[lx]
달 없는 맑은 밤하늘	0.002[lx]
가장 밝은 별	0.00001[lx]

이런 예로 보아, 사람의 눈은 한 낮의 밝은 햇빛에서 별빛까지를 볼 수 있는, 즉 가장 어두운 빛에서부터 그 빛의 10억배 밝기도 볼 수 있는 아주 광범위한 가시능력을 가지고 있는 셈이다. 60[W] 백열등을 1[m] 밖에서 보았을 때의 밝기가 대략 60 [lx] 가 되고, 이렇듯 [lx] 를 쓰는 빛의 밝기를 조도(Illuminance, Photometric)라고 한다. 그러나 사람의 시각에 의존하는 빛의 밝기는 빛 그 자체가 가지고 있는 빛에너지와는 별로 관계가 없다. 사람은 같은 양의 에너지를 가진 세기의 빛을 보았을 때 초록색(555nm 파장대)을 가장 강하게 느끼고, 적색, 청색으로 편향될수록 빛이 약한 걸로 느끼게 된다. 그런데 식물은 빛의 세기를 사람과는 다르게, 빛에 포함된 광양자의 양에 의해 강 약으로 받아들인다 여기서, 식물이 빛의 세기에 반응한

다는 뜻은, 빛을 받아들여 얼마만큼 광합성을 하는가에 기준을 둔다는 뜻이다. 식물은 빛에 포함된 광양자 하나를 받아들여 하나의 광합성을 하기 때문이다, 이런 식의 빛의 강도를 나타내는 방법으로는 “광합성, 광양자속 밀도(Photosynthetic Photon Flux Density)” 라는 말을 쓰고, 그 단위로는 $[\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}]$ 을 써 나타낸다. 그리고 이때의 $[\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}]$ 단위는 너무 커서 마이크로 몰 $[\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}]$ 을 쓰고, $[\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}]$ 이라고 표기한다. 이 말은 $1[\text{m}^2]$ 의 면적에 1초 동안 내리는 광양자의 양이 얼마가 된다는 뜻이다. $[\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}]$ 은 빛의 파장대와 광원에 따라 다른데 $[\text{lx}]$ 와의 비교는 아래와 같다.

표 2. $1[\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}]$ 당 $[\text{lx}]$ 와의 관계

광 원	단 위 $[\text{lx}]$
태양광	54
백열등	50
형광등	74
메탈 할라이드 등	71
고압 나트륨 등	82
적색 LED(660nm)	9.94
청색 LED(450nm)	11.9
백색 LED(Warm white)	68.2
녹색(530nm)	101

위의 환산치에서와 같이, $[\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}]$ 은 광원과 빛의 색깔에 따라 다르다. 이에 따라, 형광등으로 $10,000[\text{lx}]$ 의 빛을 식물에 쬌어 준다는 말은 $135[\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}]$ 의 빛을 비춰준다는 뜻이고, 비록 $[\text{lx}]$ 로 쳐서는 어두울지라도 이를 $[\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}]$ 로 환산하는데 가장 유리한 빛은 적색 LED(660nm)라는 걸 알 수 있다. 재배시험에 의하면 식물(엽채류, 상추, 쪽갯, 청경채, 적겨자, 케일 등)은 대략 $30[\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}]$ 에서 $150[\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}]$ 사이에서 무난히 성장한다는 연구결과가 있다. 물론 이보다 더 센 빛에서는 더 잘 자라겠으나, 그렇게 되면 그 빛을 만들어내는데 드는 전기료에 비해 그만한 효과를

얻지 못한다는 뜻이다. 즉 열채류의 빛의 세기에 대한 최소 필요량은 $30[\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}]$ 부근이고, 최대 포화점은 대략 $150[\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}]$ 이라는 뜻이다.

LED를 가장 효율적으로 쓰기 위한 법칙은 그 특성에 의해 결정된다. 1개의 LED 에서 방출되는 전체 빛의 양은 일정하다. 즉 각자의 1개의 LED 에서 방출되는 빛의 양은 입력전류에 비례할 뿐 누가 어떻게 사용해도 동일하다. 그 상관관계를 그림 7에 보인다.

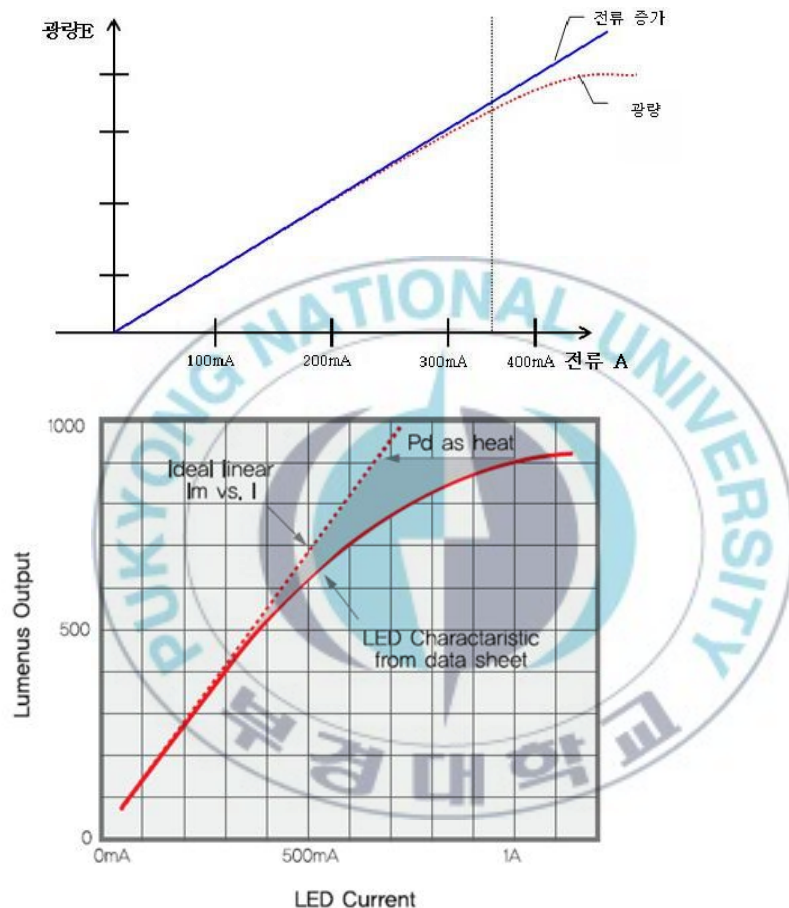


그림 7. 광량과 전류와의 관계

그림7은 1W급 청색 LED(450nm)에 흐르는 전류를 가변해서 얻은 밝기와 비교 그래프이다. 그림에서와 같이, LED에서 방출되는 광량은 전류 포화점까지는, 또는 그 이상 어느 한계까지는 전류의 변화에 거의 비례한다.

같은 LED라도, 전류를 많이 흘려 사용하면 그만큼 방출 광량이 많아진다는 뜻으로, LED는 같은 값이면 많은 전류를 흘려 사용하는 것이 좋다는 뜻이다. 물론 전류가 증가하면 LED 에서 발생하는 열도 증가하므로, 이에 대한 대비는 따로 해야 한다. LED 는 고온에서 사용하면 수명이 급격히 줄 수도 있기 때문이다. 즉 LED는 방열(Heat sink) 기능만 잘 갖추면 더 많은 광량을 내도록 사용할 수 있다. 대부분의 LED 는 최대 정격전류점이거나, 그보다 조금 더 많은 전류에서도 광량이 비례하고 있음을 보인다.

광량은 어떤 경우에도 산술적으로 더해진다. 광원이 여러 개가 되면 그 광량은 단순한 값으로 더해진다. 다만 여러 개의 LED를 한 자리에 모을 수는 없으므로, 각개의 광량 값이 일률적으로 더해지지 않는 것으로 보이거나 주변의 광량을 다 더하면 그 값은 산술적 합산과 같다.

한 개만의 LED로는 도저히 낼 수 없는 광도, 또는 광량일지라도 여러 개의 LED를 모으면 된다는 말이다. 즉 빛의 밝기, 또는 광량을 $[L_t]$ 라고 하고 각개의 광량을 $[L_p]$ 라 하면 식 1과 같이 나타난다.

$$L_t = L_{p1} + L_{p2} + L_{p3} \dots \quad (1)$$

빛의 밝기는 광원과의 거리의 제곱에 반비례한다.

$$L_B = L_S / m^2 \quad (2)$$

여기서, L_B 는 광도, L_S 는 광원의 밝기, m 은 광원과 빛을 받는 곳 사이의 거리를 말한다. 즉 빛은 레이저 빛과 같이 빛 다발이 확산되지 않고 모여서 진행하는 경우를 제외하고는 어떤 경우에도 멀어지면 약해진다.

이는 빛이 멀리 갈수록 퍼지기 때문인데, 거리가 두 배 멀어지면 빛을 받는 면적은 그림 8과 같이 4배 넓어지기 때문이다.

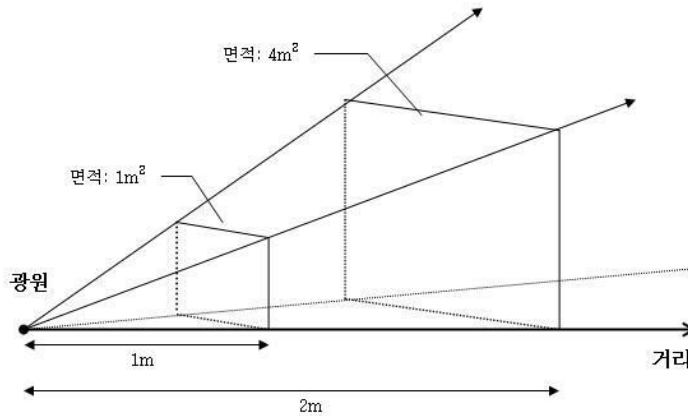


그림 8. 거리에 따른 광량

여기서 말하는 광량이란, 광도에 그 빛을 받는 총면적을 말한다. 이때의 광량은 LED가 같으면 일정이다.

여기서 광원이 가까우면 빛의 강도가 증가하고 빛의 조사면적은 적어진다는 뜻인데, 인공광을 식물재배에 사용해야 하는 모든 사람들에게는 피해 갈 수 없는 딜레마이기도 하다. 또한, 광원을 쓸데없이 높이 매달아서 아무런 광합성 효과가 없다는 것도 이로써 알 수 있다.

즉 LED 광을 사용한 식물재배에서는 실제 광원의 높이가 식물의 지붕 (The roof of the plants: 식물에서 햇빛을 주로 받는 나뭇잎)으로부터의 거리가 1.5m 이상이 되어서는 아무리 광원이 세어도 식물의 앞까지 도달해서는 광합성이 충분할 만한 세기가 될 수 없다는 뜻이다.

만일 식물의 앞에서 광원까지의 거리가 1.5m 일 때 광량이 $5[\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}]$ 이었다면, 그 거리를 50cm 로만 줄인다면 이때의 광량은 거리가 3배 줄었으므로 광량은 9배가 늘어나 $45[\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}]$ 이 될 수가 있기 때문이다.

빛을 받는 곳에서 볼 때, 광량, 광도, 스펙트럼 등은 오로지 받는 쪽의 조건에 따라 결정된다. 즉 광원 쪽에서 본 cd, lx, 방사각, lm등은 참고 자료에 불과하다.

이는 어떤 LED 가 어떻고, 그 특성이 어떻다는 등의 사양은 그냥 참고 자료로만 이용할 뿐, 믿을 수도 없고 이용하는 방법도 쉽지가 않으니 모든 데이터는 직접 빛을 받는쪽에서 측정해 보아야 한다는 뜻이다. LED는 하나씩 사용되는 것도 아니고, 방사각이 어떻다 한들 그걸로 빛을 받는 쪽에서의 특성을 알기는 어렵기 때문이다.

광량은 무언가를 투과(Penetrate)하고 무언가에 반사(Reflect)되고, 가는 거리가 멀수록 (Distant) 약해진다. 물론 무언가에 흡수(Absorb) 되어도 감쇄한다. LED 에서 비추는 빛은 가능하면 식물의 잎에까지 가까이, 직접 조사돼야 한다. 표 3은 빛이 무언가를 투과할 때의 감쇄율의 데이터이다.

표 3. 청색, 적색 LED의 투과율

투과물질	적색 LED(660nm)투과율	청색 LED(450nm)투과율
0.1mm 비닐	89 %	86.4 %
2mm 플라스틱	88.2 %	87.9 %
0.1mm 운모	87.2 %	73.7 %
2mm 유리	89.2 %	87.2 %

청색빛이 적색빛 보다는 투과량이 조금 떨어지는데, 이는 청색빛의 파장대가 짧으므로 그만큼 무언가를 투과할 때 손실이 더 많이 생긴다는 뜻이다. 이 손실은 빛을 이용해 식물을 재배하는 측에서는 이것은 큰 문제가 될 수 있다.

LED 에서 방사되는 빛은 빛이 비치는 수직면에서 제일 강하고 이 각을 0°로 했을 때, 이 각을 벗어날수록 약해진다. 즉 빛이 비치는 각도에 따른 빛의 세기는 아래와 같다.

표 4는 1[W] 급 백색(Natural White) LED, 스펙에는 방사각 130°에 350[mA]의 전류를 흘려 방사각의 변화에 따른 빛의 세기를 측정해 본 것이다.

표 4. 방사각에 따른 LED의 빛의 세기

방사각	빛의 세기
0°	100 %
15°	97.2%
30°	91.8%
45°	73%
60°	54%
65°	48%
70°	41%
75°	34%
80°	26%

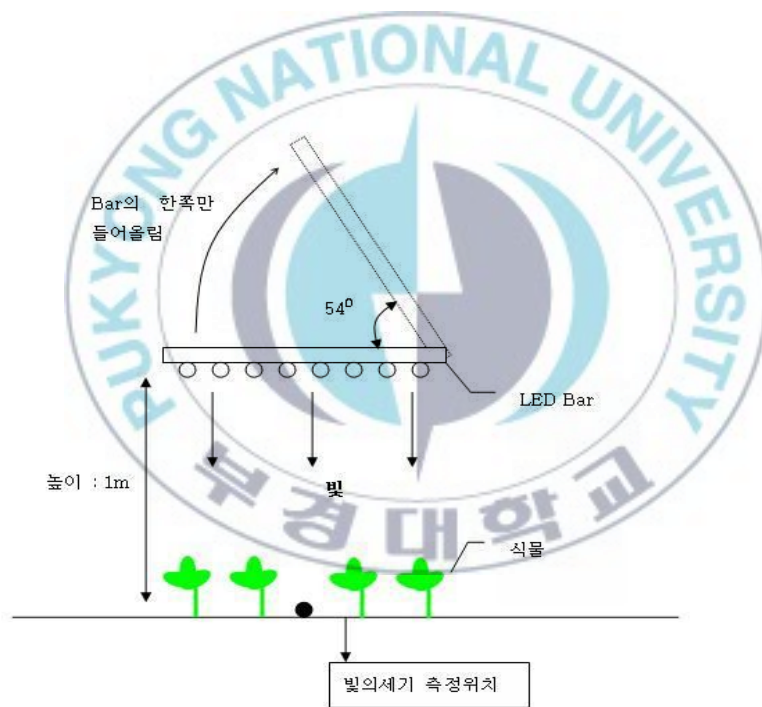


그림 9. 방사각에 따른 빛의 밝기

그림 9는 LED를 13개 직렬로 연결한 Bar를 수평으로 두었을 때와, 이 Bar를 수평에서 한쪽만 들어 올려 54°가 되게 기울였을 때의 빛의 세기를 측정해 본 결과이다. 여기에 사용된 LED는 반사각이 130° 짜리임을 제조자 측에서 밝힌 제품이다.

Bar가 수평으로 있을 때의 밝기..... 14[$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$]

Bar를 54° 기울게 들어 올렸을 때의 밝기 6[$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$]

식물에 비춰주는 LED 조명은 가까울수록, 또 방사각은 수평일 때가 가장 효율적임을 알 수 있었다. 광원이 어떤 모양일지라도 광원에서 차츰 멀어지면 빛을 받는 면의 형태는 원에 가까워진다. LED의 광원 형태가 막대형이거나 직사각형, 어느 것이라도 멀리에서는 그 빛을 받는 면의 모양은 원형 형태가 된다. 또한 각기 다른 빛을 내는 LED를 섞어 놓더라도 그 전체적인 빛 스펙트럼은 어느 정도 거리 밖에서는 저절로 섞이게 된다는 뜻이다. 이러한 특성은 각기 다른 여러 가지 파장대의 빛과, 각기 다른 밝기의 LED를 섞어쓰더라도 아무런 문제가 되질 않아, 합성 스펙트럼을 만들기가 편하다.

2.3 LED 모듈 구성

RGB LED를 조합한 조명은 넓은 범위의 색상을 만들어 낼 수 있다. 혼합된 색은 LED 광원에서 방출 되는 각 빛의 세기의 비로 결정되고, 이 빛의 세기는 LED 구동 전류에 선형적으로 비례한다. 따라서 원하는 색상은 전류 레벨을 제어하는 방법 혹은 PWM 디밍 방식으로 얻을 수 있다. 충분한 휘도 제공을 위해 보통 적색과 청색 LED 소자의 수보다 두배의 녹색 LED 소자를 사용해 RGB LED 모듈을 제작한다. 본 논문에서는 같은 목적으로 충분한 휘도를 제공하며 위해 백색 LED를 사용한 RGBW LED 모듈을 이용하였다. 이는 기존 RGB LED 모듈이 제공하는 빛의 광량보다 풍부한 광량 제공 및 식물에 적합한 스펙트럼의 제어를 위해서 RGBW LED 모듈을 통한 광을 만들어 낸다.

그림 10은 제안된 시스템의 블록도이다. 입력되는 교류 전원의 역률을 높이기 위해 역률 개선 회로 (PFC)를 통해 LED 조명 시스템에 직류전원을 공급한다. 디지털 제어기는 목표 색좌표와 조도에 해당하는 PWM 디밍 신호행렬 D를 만든다. 각 LED 구동 회로는 최대치가 일정한 구동 전류를 공급하고, 디밍신호행렬 D에 의해 구동 전류의 온-오프시간비율이 제어된다.

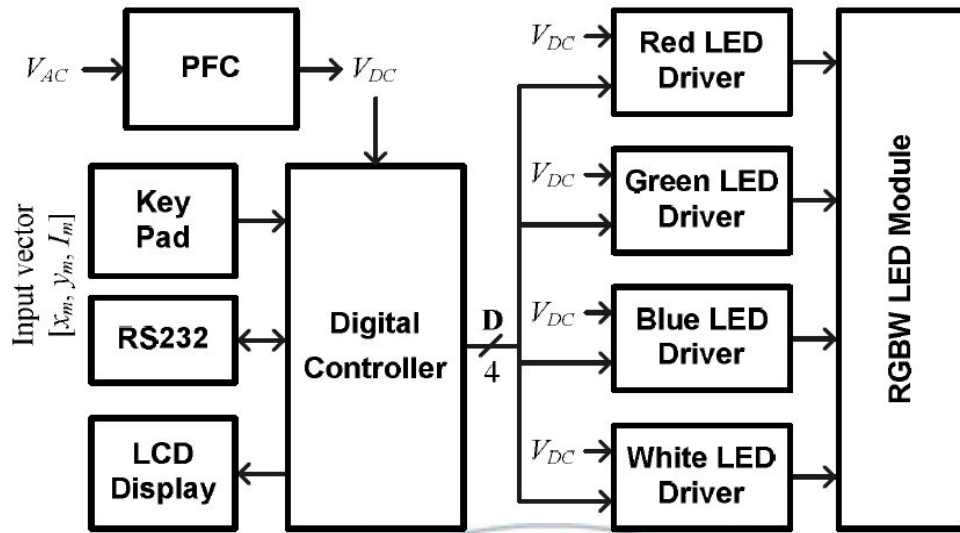
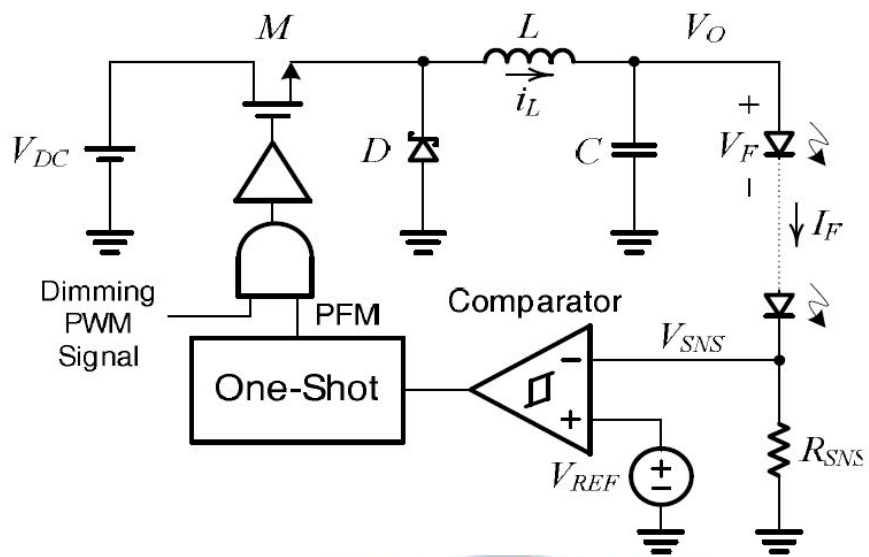
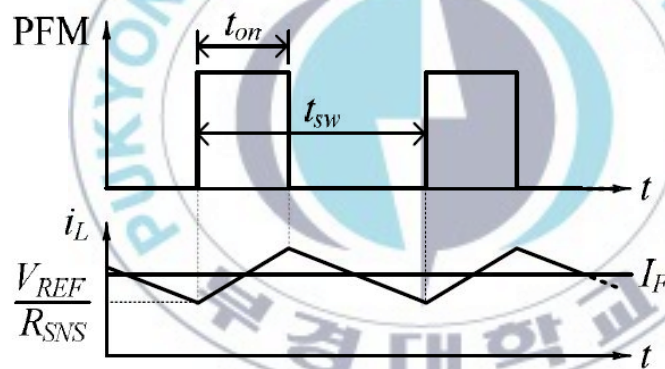


그림 10. 색 제어 가능한 LED 조명의 블록도

LED조명의 디지털제어기는 혼합된 빛의 색좌표와 조도를 가진 입력 벡터 $[x_m, y_m, I_m]$ 를 입력 받아 색 제어 알고리즘을 수행하고, 색좌표, 색온도, 조도정보를 표시한다. 유효 색역 (color gamut) 범위 내에서 입력 벡터 $[x_m, y_m, I_m]$ 는 제어 알고리즘에 의해서 각 LED를 위한 4개의 PWM 디밍 시비율로 변환된다. 이 디밍 시비율 값들은 재배에 원하는 색좌표와 조도를 실현하기 위해 필요하다.



(a)



(b)

그림 11. (a) LED 구동 회로의 회로도, (b) 구동 회로의 동작 파형

그림 11 (a)는 빠른 동특성과 구현 이용이한 특징을 지닌 이력(hysteretic) 전류-모드 제어 정전류 강합형 LED 구동 회로의 회로도이다[9-10]. 그림 11 (a)에서, V_F 는 각 LED의 순방향 전압 강하, I_F 는 직렬로 연결된 LED를 통해 흐르는 전류를 나타낸다. 그림 2 (b)는 이 구동 회로의 동작 파형을 보여준다. RGBW LED 모듈을 구동하기 위해 별도의 4 개 구동회로가 필요하고, 이 구동회로들의 출력 전류 온-오프는 색온도 알고리즘에 의해 결정되는 PWM 디밍신호에 의해 제어된다. 각각의 구동 회로는 출력 전류를 일정하게 유지하기 위한 정전류 피드백 루프를 포함하고 있다. 따라서 출력 전류와 LED들의 접합온도 T_j 가 고정되어 있다면, LED모듈의 특성은 항상 일정할 것이다.

조도를 향상시키기 위해서 구동회로의 동작주파수는 플리커(flicker) 주파수 보다 높아야 한다. 입력 전압 와 가능한 최대 출력 전압 V_{DC} 에 따라, 구동 회로의 최대 스위칭 주파수 $f_{sw(max)}$ 가 다음 식 3과 같이 결정된다.

$$f_{sw(max)} = \frac{1 - V_{0(max)}/V_{DC}}{t_{off(min)}} \quad (3)$$

여기서 $t_{off(min)}$ 은 인덕터 코어의 포화를 막기 위한 최소 스위치 개방 시간. 리플 전류 Δi_L 을 고려해 다음 식 4와 같이 인덕턴스 L 이 선정 될 수 있다.

$$L \geq \frac{V_{DC} - V_O}{\Delta i_L} \cdot t_{on} \quad (4)$$

RGB기본 모듈에 식물성장에 가장이상적인 스펙트럼을 만들기 위한 광색 연출을 위해 백색 LED를 사용한 RGBW LED모듈 구성이 필요하다.

그림 12는 시스템에서 사용되는 RGBW LED 모듈의 연결도와 외형이다. 이 그림에서 n 은 직렬로 연결된 LED의 개수이고 $V_{OB}, V_{OG}, V_{OR}, V_{OW}$ 는 각각 적색, 녹색, 청색, 백색 LED 구동 회로의 출력전압이며 i_B, i_G, i_R, i_W 는 직렬연결된 각LED들을 통해 흐르는 전류이다. LED 구동회로의 출력전압 V_O 는 다음과 같이 직렬로 연결된 LED 숫자로 결정된다.

$$V_{O(max)} = n \cdot V_{F(max)} + V_{REF} \quad (5)$$

여기서 $V_{F(max)}$ 는 임의의 LED 최대 순방향 전압강하이다. 빛이 잘 혼합되도록 그림 12 (b)와 같이 4가지 색상 LED들을 서로 가깝게 배치했다.

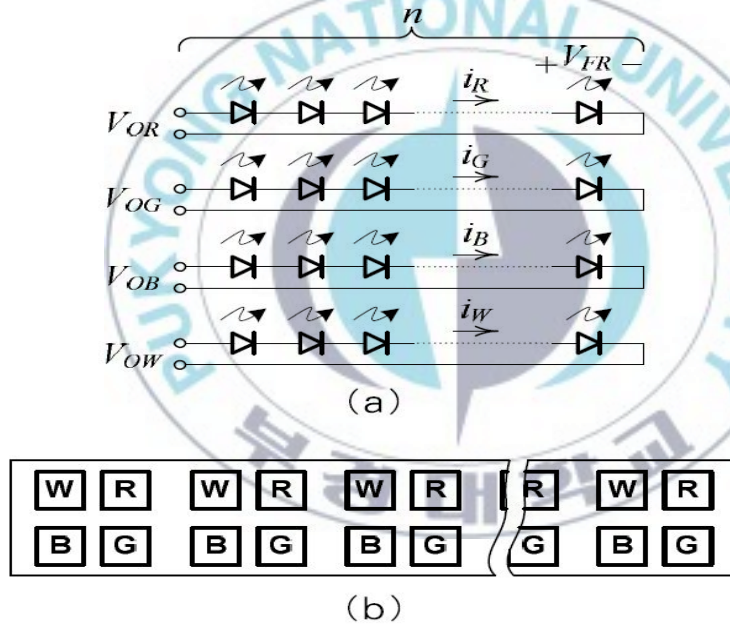


그림 12. (a) RGBW LED 모듈의 연결도와 (b) 외형

2.4 LED 조도와 색상 제어

국제조명위원회(CIE)가 CIE 1931 색 대응 함수(color matching function)와 CIE 1931 색도좌표로 색상을 측정하는 CIE 1931 색공간 표준을 제정했다. 이 표준을 이용해 임의의 광원의 색상을 3개의 변수만으로 기술할 수 있다. 즉, 임의의 색상을 추상체의 자극값에 해당하는 3가지 색대응함수의 가중합으로 표현할 수 있다. 색좌표 값 x 와 y 는 각 자극치와 자극치 전체를 합한값과의 상대적인 비율로 계산된다[2].

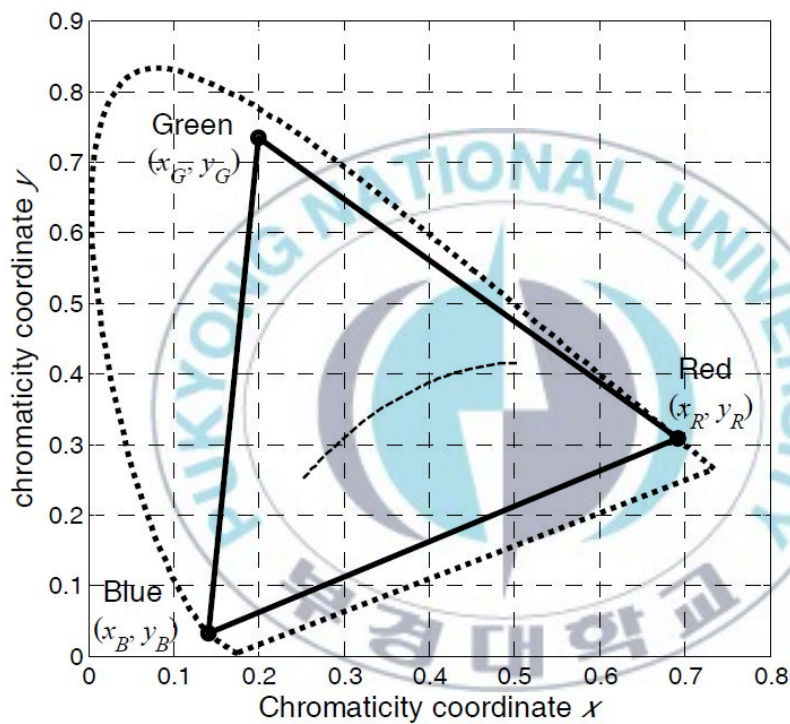


그림 13. CIE 1931 x, y 색도좌표

LED 조명 전체의 조도와 색상을 제어하기 위해 광원의 혼합된 색상과 개별 색상간의 관계를 구해야만 한다. 색 조합이론에 따르면 혼합된빛의 색도좌표는 개별색상의 색도좌표들의 가중된 선형결합이다. 따라서 삼자극치로부터 계산된 혼합된 색상의 색좌표는 다음과 같다.

$$x = \frac{\sum_{n=1}^3 x_n L_n}{\sum_{n=1}^3 L_n}, y = \frac{\sum_{n=1}^3 y_n L_n}{\sum_{n=1}^3 L_n} \quad (6)$$

여기서 첨자 n 은 차례대로 적색, 녹색, 청색광을 상수 x_n 과 y_n 은 각 LED 광원들의 색도좌표를 표시한다. 가중치 L 은 다음과 같이 정의된다[2].

$$L_n = (\bar{x}(\lambda_n) + \bar{y}(\lambda_n) + \bar{z}(\lambda_n)) \cdot P_n \quad (7)$$

여기서 $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ 는 색 대응 함수, λ_n 은 n 번째 LED의 파장, P_n 은 n 번째 광원에서 방출되는 광 전력(optical power) 이고, L_n 은 n 번째 LED에서 방출되는 빛의 삼자극치 합을 의미한다. CIE 1931의 정의에 따라 조도 E 는 다음과 같이 표현된다[2].

$$E = k \int_{\lambda} V(\lambda) P(\lambda) d\lambda \quad (8)$$

여기서 상수 k 는 683[lux/W], $V(\lambda)$ 는 눈의 감도함수(eye sensitivity function)이다. 녹색 대응 함수 $\bar{y}(\lambda)$ 는 $V(\lambda)$ 와 동일하다. 단색 LED의 $P(\lambda)$ 가 매우 협소한 대역폭을 가진다고 가정하면, n 번째 LED에서 방출되는 빛의 조도는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$E_n = kV(\lambda)P_n = k\bar{y}(\lambda)P_n \quad (9)$$

식 (7)과 (9)로부터,

$$L_n = \frac{\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda)}{\bar{y}(\lambda)} \cdot \frac{E_n}{k} = \frac{E_n}{ky_n} \quad (10)$$

식 (6)와 (10)을 결합해 RGB LED 모듈에서 방출되는 혼합된 색상의 색좌표를 다음처럼 계산할 수 있다.

$$x = \frac{\sum_{n=1}^3 x_n E_n / y_n}{\sum_{n=1}^3 E_n / y_n}, \quad y = \frac{\sum_{n=1}^3 E_n / y_n}{\sum_{n=1}^3 E_n / y_n} \quad (11)$$

같은 방식을 3가지 색상 이상의 LED를 사용한 조명에도 적용할 수 있다. RGBW LED 모듈의 혼합된 색상의 색좌표 (x_m, y_m) 은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$x_m = \frac{x_R E_r / y_R + x_G E_g / y_G + x_B E_b / y_B + x_W E_w / y_W}{E_r / y_R + E_g / y_G + E_b / y_B + E_w / y_W}$$

$$y_m = \frac{y_R I_r / y_R + x_G I_g / y_G + y_B I_b / y_B + y_W I_w / y_W}{I_r / y_R + I_g / y_G + I_b / y_B + I_w / y_W} \quad (12)$$

여기서 상수 $x_R, y_R, x_G, y_G, x_B, y_B, x_W, y_W$ 는 각 LED들의 색좌표를 나타내고, E_r, E_g, E_b, E_w 는 원하는 빛의 색을 만들기 위해 필요한 각 LED들의 조도이다. 혼합된 색의 조도 E_m 은 $E_r + E_g + E_b + E_w$ 이다. 따라서 RGBW LED 모듈의 시스템 행렬은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ E_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_R - x_m}{y_R} & \frac{x_G - x_m}{y_G} & \frac{x_B - x_m}{y_B} & \frac{x_W - x_m}{y_W} \\ \frac{y_R - y_m}{y_R} & \frac{y_G - y_m}{y_G} & \frac{y_B - y_m}{y_B} & \frac{y_W - y_m}{y_W} \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_r \\ E_g \\ E_b \\ E_w \end{bmatrix} \quad (13)$$

식 (13)은 다음과 같이 간단하게 행렬로 표현 가능하다.

$$B_0 = A_0 \cdot E_0 \quad (14)$$

여기서 B_0 는 LED 모듈의 전체 조도를, 시스템 행렬 A_0 는 각 LED의 색과 혼합된 색 사이의 관계를 E_0 는 집합 온도가 T_{j0} 일 때 각 LED의 조도를 나타낸다. A_0 의 역행렬이 존재한다면 E_0 는 식 15와 같다.

$$E_0 = A_0^{-1} \cdot B_0 \quad (15)$$

따라서 E_0 는 x_m, y_m, E_m 의 함수가 되며, 색좌표와 조도가 주어지면 각 LED의 조도는 식(15)으로부터 구할 수 있다.

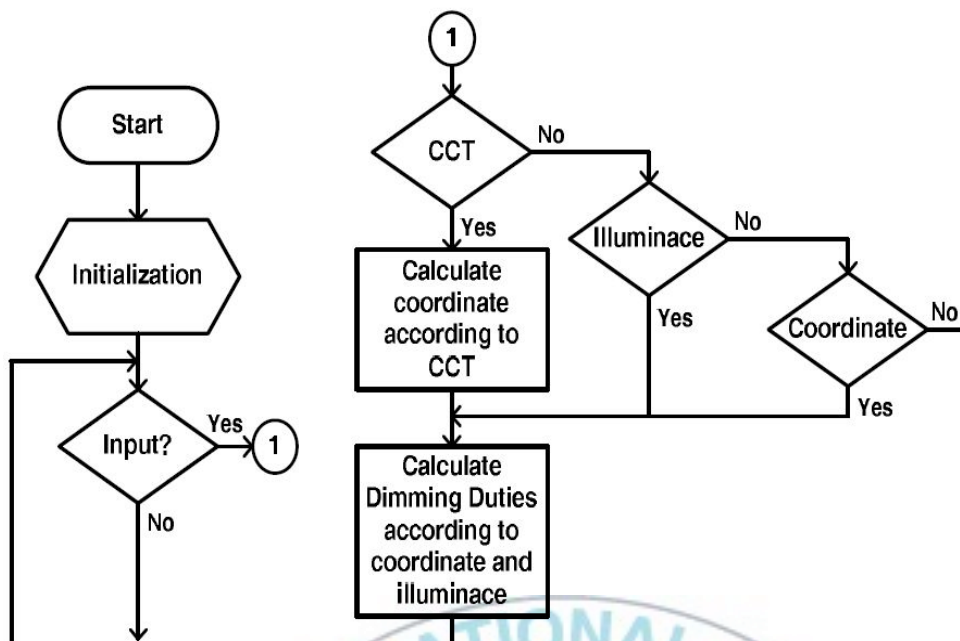


그림 14. LED조명 제어 프로그램 순서도

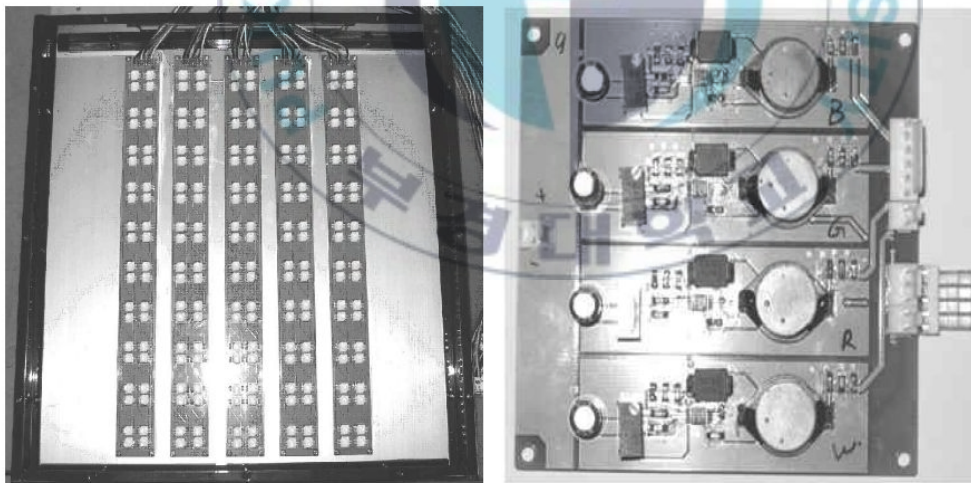


그림 15. RGBW 모듈과 구동회로

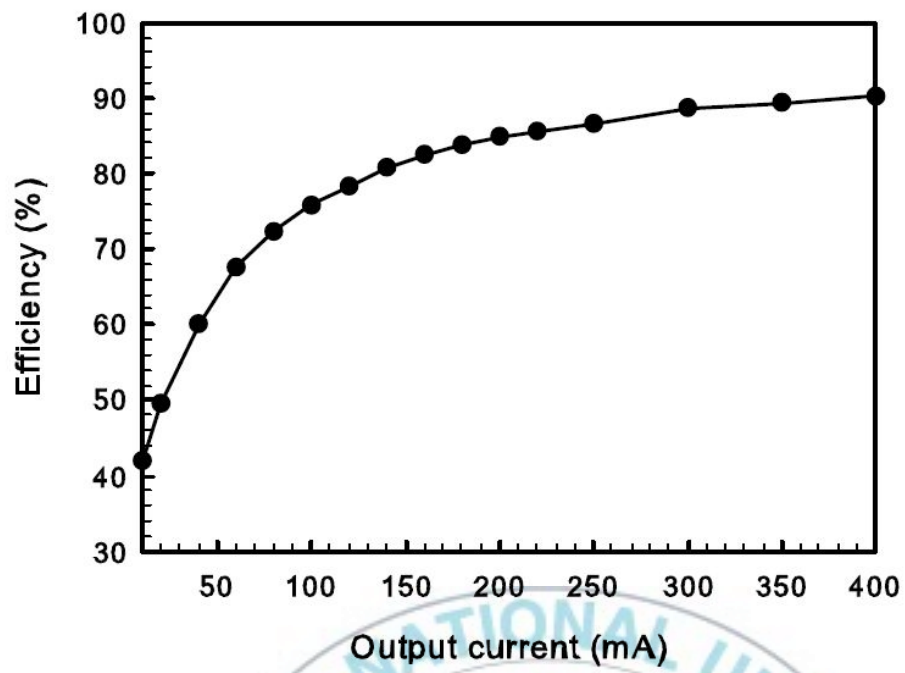


그림 16. LED 구동회로의 효율

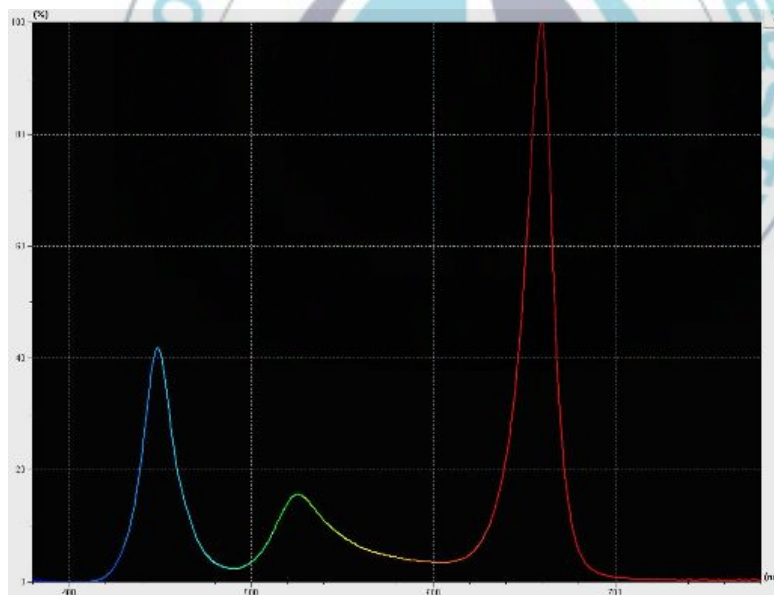


그림 17. RGBW LED 제어를 통한 스펙트럼

제 3 장 결 론

LED를 이용한 식물재배 효율 향상을 위한 최적화된 스펙트럼에 맞춘 광원의 조건과 구동회로의 선정 및 스펙트럼 구성을 위한 RGBW 모듈구성에 대하여 연구하였다.

이상적인 스펙트럼 구성을 위해 RGB광의 제어는 물론 그동안 알려져 왔던 불필요한 광을 태양에 가까운 광으로 구현하기 위해 혼합색인 백색 LED를 함께 모듈화하여 LED의 조도와 색상을 제어하여 제시된 스펙트럼을 구현하였다.

조도와 색상제어를 통해 각 식물에서 요구되는 빛의 조건 제어가 가능하다. 이는 식물 재배 효율 향상에 큰 역할을 할 것으로 기대된다. 본 연구에서 만들어낸 RGBW LED모듈과 조도 색상 제어는 식물의 성장 특성 요구조건의 데이터 하에 재배되어야 한다. 이는 무수한 실험과 과학적인 연구가 필요하다. 각 식물의 재배조건에 관한 확립된 데이터와 본 연구에서 제시한 LED의 조건과 제어를 통해 식물재배에 효율을 향상 시킬 것을 기대한다.

참고 문헌

- [1] S. Muthu, F. J. P. Schuurmans, and M. D. Pashley, "Red, green, and blue LED based white light generation: Issues and control", Proc. IEEE Industry Application Conf., Vol. 1, pp. 327-333, Oct. 13-18, 2002.
- [2] E. F. Schubert, Light-Emitting Diodes, Cambridge University Press, 2006.
- [3] X. Qu, S.-C. Wong, and C. K. Tse, "Color control system for RGB LED light sources using junction temperature measurement", Proc. IEEE Industrial Electronics Society, Nov. 5-8, 2007, pp. 1361-1368.
- [4] Cho, J.Y., D.M. Son, J.M. Kim, B.S. Seo, S.Y. Yang, J.H. Bae, and B.G. Heo. 2008. Effect of LED as light on the germination, growth and physiological activities of broccoli sprouts. J. Bio-Environment Control.
- [5] P. Narra, and D. S. Zinger, "An effective LED dimming approach", Proc. IEEE IAS2004, Vol. 3, pp. 1671-1676, Oct.3-7, 2004.
- [6] L. Svilainis, "LED PWM dimming linearity investigation", Displays, Vol. 29, No. 3, pp. 243-249, Jul. 2008.
- [7] K. Lim, J.-C. Lee, G. Panotopoulos, and R. Helbing, "Illumination and color management in solid state lighting", Proc. IEEE Industry Applications Conf., pp.2616-2620, Oct. 8-12, 2006.
- [8] Kim. H, "A Color Temperature and Illuminance Controllable LED Lighting System", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 23, No.12 pp.10~22, Dec. 2009.

감사의 글

3년이라는 길지 않은 시간이지만 논문을 마무리하는 시점에 뒤돌아보니 감사를 드려야 할 분들이 참으로 많습니다. 한 분씩 찾아 뵙지 못하고 이렇게 지면으로나마 감사의 인사를 드리하고자 합니다.

석사 과정 동안 연구에 매진할 수 있도록 아낌없는 격려와 지도를 해주신 배종일 교수님께 진심으로 감사 드립니다. 그리고 저의 논문 심사를 맡아주시고, 소중한 충고와 조언을 아끼지 않으신 권성렬 교수님, 박창현 교수님께 깊은 감사를 드리며 대학원 과정 동안 저에게 많은 가르침을 주신 전기공학과 여러 교수님들께도 머리 숙여 감사를 드립니다.

미흡한 제가 대학원에 진학 할 수 있도록 물심양면으로 도움을 주신 (주)일신전기감리의 김경구 사장님, 3년이라는 시간동안 함께 한 대학원 동기인 손상동 님, 연구실에서 같이 고민하고 연구하며 많은 도움을 준 심창수 후배에게도 진심으로 감사를 드리며, 좁은 지면에 도움을 주신 모든 분 들을 일일이 열거하면서 감사의 마음을 전하지는 못하지만 이 모든 것이 결코 저 혼자 힘만으로 된 것이 아니었음을 고백하지 않을 수 없습니다.

마지막으로 저를 믿고 항상 말없이 저의 뜻을 이해하고 지원해준 사랑하는 아내 김은진, 딸 신하영, 아들 신성민에게 이 모든 영광을 바칩니다.

부족함이 많은 논문이지만 이 논문의 완성은 저 개인의 능력이 아니라 주위의 모든 분들의 격려와 사랑 속에 탄생한 것으로 믿고, 늘 감사하는 마음을 잊지 않고 처음 시작하는 자세로 정진을 거듭하겠습니다. 감사합니다.

2010년 12월

신 동 락