



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](#)

2017년 2월

석사학위취득

원격교육시스템

전용

LED

통합수업시스템

최적설계와

건전성

평가

정윤수

2017년 2월  
석사학위논문

원격제어방식을 적용한 LED  
통합조명시스템 최적설계와 건전성  
평가

조선대학교 대학원  
기계시스템공학과  
정 윤 수

# 원격제어방식을 적용한 LED 통합조명시스템 최적설계와 건전성 평가

Optimal design and Soundness Evaluation of LED  
Integrated Lighting System That Is Applied with  
Remote Control Method

2017년 2월 24일

조선대학교 대학원

기계시스템공학과

정 윤 수

# 원격제어방식을 적용한 LED 통합조명시스템 최적설계와 건전성 평가

지도교수 김 재 열

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2016년 10월

조선대학교 대학원

기계시스템공학과

정 윤 수

## 정윤수의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 김 경 석 (인)

위 원 조선대학교 교수 김 지 훈 (인)

위 원 조선대학교 교수 김 재 열 (인)

2016년 11월

조선대학교 대학원

## 목 차

LIST OF FIGURES .....	iv
LIST OF TABLES .....	vi
NOMENCLATURE .....	vii
ABSTRACT .....	viii
제 1 장 서 론 .....	1
제 1 절 연구 배경 .....	1
제 2 절 연구 동향 및 연구 필요성 .....	3
1 . LED 조명 시스템의 연구 동향 .....	3
2 . 적외선 열화상 계측기술의 연구 동향 .....	5
3 . 연구 필요성 .....	7
제 3 절 연구 목적 .....	10
제 2 장 이 론 .....	11
제 1 절 LED 조명 개념 및 특성 .....	11
1 . LED 조명 .....	11
2 . LED 조명의 특성 .....	14
가. 저전력, 고효율 .....	15
나. 긴 수명 .....	15
다. 친환경 소재 .....	16
라. 공간 효율성 .....	16
마. 광출력 제어와 빠른 응답 .....	17

바. 다양한 연출 효과 .....	17
3 . LED 조명의 한계 .....	18
4 . LED 접합온도 및 열저항 .....	19
5 . 방열판(Heat-Sink) .....	21
제 2 절 적외선 열화상 기술의 개요 .....	22
1 . 적외선(Infrared Radiation) .....	23
2 . 열화상 원리 및 이론 .....	25
제 3 절 적외선 열화상 탐상 기법 .....	34
1 . 수동적 방법(Passive method) .....	34
2 . 능동적 방법(Active method) .....	35
제 3 장 제안된 LED 조명 시스템 최적설계 및 건전성 평가 .....	37
제 1 절 제안된 LED 조명 시스템 설계 .....	37
1 . 1.5kW 급 LED 전원 모듈 설계 .....	37
2 . 120W 급 LED 조명등 모듈 설계 .....	41
가. LED 칩 1EA 발열량 .....	41
나. 120W 급 LED 조명 모듈 설계 .....	44
3 . Heat-Sink 최적설계 .....	47
4 . GUI 및 원격제어 프로그램 .....	50
제 4 장 실험 및 연구결과 분석 .....	52
제 1 절 실험 장치 및 실험 방법 .....	52

제 2 절 Heat-Sink 방열 검증 결과 .....	53
제 3 절 120W 급 LED 조명 효율 검증 결과 .....	60
제 5 장 결론 .....	61
Reference .....	62

## LIST OF FIGURES

Fig. 1-1 Global LED Lighting Market Forecast .....	8
Fig. 1-2 Global LED lighting penetration forecast .....	9
Fig. 2-1 LED Principle .....	11
Fig. 2-2 OLED materials .....	12
Fig. 2-3 LED light source efficiency improvement .....	15
Fig. 2-4 Test jig for LED junction temperature measurement .....	20
Fig. 2-5 LED package heat dissipation chart .....	21
Fig. 2-6 The electromagnetic spectrum .....	24
Fig. 2-7 Atmospheric transmission in different wavelength bands .....	25
Fig. 2-8 IR camera with addition of scanning element for imaging .....	26
Fig. 2-9 The flux incident $\Phi_i$ is equal to the flux reflected $\Phi'_r$ , absorbed $\Phi_a$ , and transmitted $\Phi_t$ .....	29
Fig. 2-10 Spectral radiance of a blackbody(Planck's law) .....	30
Fig. 2-11 Radiation contributions to the general measurement situation .....	33
Fig. 2-12 Passive method (jenoptik ag) .....	34
Fig. 2-13 Active method (jenoptik ag) .....	35
Fig. 3-1 Power supply module for LED module (Generic) .....	37
Fig. 3-2 LED Driver Circuit Block Diagram .....	38
Fig. 3-3 PFC appearance .....	39
Fig. 3-4 PFC circuit schematic diagram .....	39
Fig. 3-5 1.5kW-class power supply module control method .....	40
Fig. 3-6 120W-class LED power supply module circuit diagram .....	41
Fig. 3-7 LED chip 1EA .....	42
Fig. 3-8 LED chip 1EA for thermal imaging camera temperature measurement .....	43
Fig. 3-9 LED chip 1EA for thermal imaging .....	43
Fig. 3-10 LED chip 1EA for thermal imaging temperature graph (Spline) .....	44
Fig. 3-11 120W-class PCB Layout .....	45
Fig. 3-12 LED 98EA PCB before and after .....	46

Fig. 3-13 120W LED lighting module .....	46
Fig. 3-14 Heat-Sink 3D drawings .....	48
Fig. 3-15 120W-class LED Heat-Sink .....	49
Fig. 3-16 GUI Configuration .....	50
Fig. 3-17 Program Configuration .....	51
Fig. 4-1 Test jig Configuration .....	52
Fig. 4-2 Thermocouple wire attachment to LED module .....	53
Fig. 4-3 Thermal image after 20 seconds .....	54
Fig. 4-4 Thermal image after 30 minutes .....	55
Fig. 4-5 Thermal image after 60 minutes .....	55
Fig. 4-6 Thermal image after 90 minutes .....	56
Fig. 4-7 Thermal image after 120 minutes .....	56
Fig. 4-8 LED module thermal image graph .....	57
Fig. 4-9 LED module thermocouple graph .....	58
Fig. 4-10 Heat-Sink thermocouple graph .....	59
Fig. 4-11 Light distribution curve .....	60

## LIST OF TABLE

Table 1-1 Regulatory policy for incandescent bulbs by major countries .....	7
Table 2-1 Comparison of LED lighting with existing lamps .....	14
Table 2-2 Payback period when replacing LED lights with fluorescent lamps.....	18
Table 2-3 Infrared classification with wavelength .....	23

## NOMENCLATURE

$B$	: Spectrum parameter
$C$	: Speed of Sound in a Material of Horn
$E$	: Modules of Elasticity
$F$	: Model parameter
$F$	: Frequency
$I_m$	: Thermal value of measured whole radiation
$I(T)$	: Thermal Value
$P$	: Density
$R$	: Correspondence parameter
$T_{amb}$	: Ambient air temperature
$T_{atm}$	: Atmosphere air temperature
$T_{obj}$	: Temperature of measurement target
$W_b$	: Exitance of whole radiant energy
$\alpha$	: Absorptivity
$\epsilon$	: Emissivity
$\rho$	: Reflectivity
$\tau$	: Transmissivity
$\sigma$	: Stefan-Boltzman constant
$\lambda$	: Wavelength

## ABSTRACT

# Optimal design and Soundness Evaluation of LED Integrated Lighting System That Is Applied with Remote Control Method

Jung Yoon-Soo

Advisor : Prof. Kim Jae-Yeol Ph. D.

Dept. of Mechanical system engineering,

Graduate School of Chosun University

Lighting has evolved over time as an indispensable tool for human life according to the skill levels and the demands of the times. The demand for lighting has changed significantly in a variety of ways from a means of simply lighting the fire in the past flame-light era to a means of creating a pleasant life and beauty for human beings, and to a means of preparing for the coming changes in future human life, as the demand for high efficiency and environment-friendly light is growing in the wake of the depletion of fossil fuels and global warming. Accordingly, there is a growing interest in new convergence lighting technologies as well as in new light sources that can meet this demand.

As energy conservation and environmental issues are emerging as a hot topic around the world, consumers are demanding high-efficiency, eco-friendly products. In the field of lighting, the interest in LED lighting, which is also called green lighting, as well as interest in the alternative lighting for factories is hot. Most of the lighting used currently in the industrial field is low efficiency light such as metal halide lamp (MHL). Public expectations for

LED lighting have increased in recent years, but the supply of LED lighting is still slower than expected due to the fact that the product is not reliable enough and the price is too high. Conventional lightings applied to the present industry can lead to a host of issues such as long relighting time, low durability and high defect rate during manufacturing and production process due to troubles associated with replacing lights. It is necessary to improve lighting environment to a human-friendly one in the future in industrial sites such as factories. In the case of LED lighting, securing competitive heat insulation materials and developing optimized heat dissipation design will largely decide the competitive edge in the LED lighting industry. It is necessary, therefore, to develop lighting devices specialized for LED light armed with competitiveness by securing longevity and reliability of LED lighting through application of heat dissipation technology and lighter weight.

In this study, the author proposed 120W LED integrated lighting system that is applied with remote control method to replace metal halide lamp (MHL) which is currently used in the industry. Furthermore, it would be possible to provide a perfect opportunity for Korea to rise as a global leader in the LED lighting industry through an optimal design and soundness evaluation of the LED integrated lighting system that is applied with the remote control method. I hope that this study would be used as a material for success in the LED lighting market, given that related technology has not been developed nor market environment has matured sufficiently yet.

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구 배경

에너지절약과 환경문제가 사회적 이슈로 대두되면서 유해가스가 없고 수명이 길며 광효율 또한 끊임없이 지속적으로 발전하고 있는 LED 광원의 관심이 뜨겁다. LED(Lighting Emitting Diode)는 기존에 전자회로 부품이나 표시용 소자로 사용되었지만 조명용으로 사용할 수 있을 만큼 고도화 개발로 조명시장을 매우 흥분하게 만들었고 기존의 조명시장을 점차 대체할 것으로 예견되고 있다.

조명은 인간이 삶을 영위해 나가는데 있어 반드시 필요한 도구로써 그 시대의 기술 수준과 시대적 요구에 따라 발전해왔다. 과거 등화(燈火)시대에 단순히 불을 밝히는 수단에서 인간의 쾌적한 삶, 아름다움을 창조하는 수단으로 현재는 지구온난화와 화석연료의 고갈 등 미래의 인간 삶 변화를 대비하는 수단으로 고효율 및 친환경적인 요구까지 조명에 대한 시대적 요구는 다양하고 광범위하게 변화하고 있어 이를 충족시킬 수 있는 새로운 융·복합 조명기술과 新광원에 대한 관심이 크게 높아지고 있다.<sup>(1)</sup>

하지만 조명은 전 세계 연간 이산화탄소 배출량 중 약 19억 톤을 차지하며 이는 전 세계 이산화탄소 배출량의 8퍼센트에 해당하면서 환경규제의 큰 이슈 중 하나로 부각되고 있다. 전력 소모도 역시 전체의 약 25%를 차지하고 있어 기존 조명인 백열등은 현재 주요국에서 환경규제가 시작돼 사용이 크게 줄어들고 있으며, 2020년부터 본격적인 규제가 시작되는 형광등도 2015년부터 관련 시장이 크게 감소할 것으로 예상된다.

이러한 추세에 따라 조명의 고효율화와 수은, 납 등을 함유하지 않은 친환경 조명 제품의 개발문제가 시장의 화두로 떠오름에 따라 LED 조명은 미래 조명 시장을 선도할 광원으로 부각되고 있다.

최근에는 이와 같은 LED 열풍으로 해외에는 니치아(Nichia), 크리(Cree), 오스람(Osram Opto Semiconductor), 도요다 고세이(Toyoda Gosei), 필립스(Philips), 국내에는 삼성LED, 서울반도체, LG이노텍 등 많은 LED 패키지 생산 업체가 우후죽순(雨後竹筍)으로 생겨나고 있으며, 이에 따라 다양한 LED 구동회로가 개발되고 있는 추세이다. 이들 기업은 형광등 모양의 LED 형광등, 백열전구 모양의 LED 전구

를 출시하여 기존의 조명 기구에서 별다른 교체 작업 없이 바로 사용할 수 있도록 하였다.

LED 구동회로에서 많이 사용되는 SMPS(Switching Mode Power Supply) 경우 부품의 수가 매우 많고 회로가 복잡하여 고장 발생률을 높일 뿐만 아니라, 트랜스포머, 인덕터 등과 같이 부품의 부피가 크며 조명의 소형화 및 저가격화 하기가 쉽지 않다.

## 제 2 절 연구 동향 및 연구 필요성

### 1 . LED 조명 시스템의 연구 동향

LED 제조과정은 부품/재료 제조공정, 에피(Epitaxy)/칩 공정, 패키징 공정으로 구분되며, 각 단계별로 다른 성격의 기술을 필요로 하기 때문에 LED 제조업체들은 어느 한 분야에 특화되어 있는 것이 일반적이다. 그러나 LED 산업 내 경쟁력 확보와 기술 유출 억제를 위해 선두기업들은 전체공정을 일괄 처리하는 추세를 나타내고 있다.

LED 산업의 세부기술은 기판, 에피 성장, 칩 공정 기술 등 소자 단계에서의 기술과, 패키징 기술, 고장분석 기술, 고속측정 및 양산 공정장비 기술, 고효율 형광체 기술, 광원모듈 설계 및 제조 기술, 시스템 제조 및 스마트 제어 기술, 신뢰성 평가 기술, 제품 표준 및 측정법 등이 이슈가 된다.

LED 에피성장과 관련된 기술이슈는 사파이어 기판과 GaN 에피와의 격자 부정합, 열팽창계수 차이, 낮은 열팽창계수 및 열전전도 등으로 인해 나타나는 부정적인 영향을 극소화하기 위해 다양한 방법으로 GaN 기판 제조 기술개발이 진행되고 있다. 그러나 아직 GaN 단결정 성장이 어려워 고가에 머물고 있는 단점이 있다. 칩 공정의 혁신의 일환으로 한 장의 웨이퍼로부터 다량의 칩을 얻기 위하여 사파이어 기판의 대구경화가 중요하다. 또한 광 추출 효율 향상을 위해 다양한 패턴기판이 개발되고 있으며, 패턴 디자인에 의한 광 추출 효율 향상 연구가 진행 중이다.

사파이어 이외의 기판으로는 GaN, SiC 등의 기판이 사용되고 있으나 이들을 대체할 신물질 단결정 연구는 부족하여 hexagonal 구조, 적은 격자부정합, 높은 열 및 전기전도도, 유사한 정도의 열팽창계수를 갖는 단결정 신물질의 탐색연구가 필요하다.

에피 성장 기술에서는 내부양자효율의 향상, 광 추출 효율의 향상을 위해 다양한 기술이 연구되고 있다. 기판 대형화에 따라 양질의 대구경 에피 성장 연구, 양산을 위한 공정 시간 단축 등도 중요한 이슈이다.

공정 기술에 있어서는 단위공정 기술이 각 공정장비별로 최적화되어야 하고, 양산성 있는 공정과 칩 구조의 확보도 중요한 이슈이다. 열 특성이 좋은 LED 제조를 위

해서는 수직구조 LED, 웨이퍼레벨패키지(WLP), 칩 스케일 패키지(CSP) 기술이 이슈가 되고 있다.

## 가. 국내 주요 LED 기업의 연구동향

국내 LED 기업은 LED lighting fixture를 생산하는 기업을 통해 해외시장 진출을 본격화하고 있다. 삼성 LED와 서울반도체는 미국과 유럽의 점유율이 높은 조명기업과 제휴 또는 공조를 진행 중이다. 삼성LED, 서울반도체, LG이노텍 등 국내 그린 LED 기업들은 효율저하 원인 규명과 대안기술 확보 등을 통해 국내 제품 경쟁력 확보를 위해 연구개발에 꾸준한 투자를 하고 있으며, 고비용 공정의 간소화와 저가격 양산 기술 개발을 통한 저가격화를 위해 집중 투자 중이다.

국내 기업들도 소재에서 완제품까지 경쟁력을 확보하기 위해서 수직계열화를 추진 중이며, 특히 삼성LED의 경우 세계 최초로 LED 업계에서 전 공정 수직계열화를 이루어 일본 스미토모화학과의 합작사를 설립하였고 LED 잉곳 및 웨이퍼를 안정적으로 공급 받아 기존 기술 경쟁력 외에 원가 경쟁력까지 확보, 글로벌 시장 지배력을 키우고 있다.

## 나. 해외 주요 LED 기업의 연구동향

LED Major 업체들이 시장 접근성 확대 및 시장 선점, 모든 단계에서의 특허 확보, LED 조명 시스템 제공 능력 확보 등에 중점을 두고 웨이퍼, 칩, 패키지 등 일괄생산체제를 구축하고 있는데, 소자업체와 협력체제 구축 등을 통해 전 공정 수직계열화를 완성하였다.

Nichia는 2008년 100[lm/W]의 백색 LED 상용화에 성공하였으며, 연구실 수준에서는 169[lm/W], 2009년 250[lm/W]를 발표함으로써 세계 최고 수준의 LED 기술 역량을 보유하고 있다. 크리(Cree), 오스람(Osram opto semiconductor), 도요다 고세이(Toyoda Gosei)도 2008년 100[lm/W] 백색 상용화에 성공하였으며 오스람의 경우 150[lm/W] 급 LED 칩의 개발에 성공하였다.<sup>(2)</sup>

## 2 . 적외선 열화상 계측기술의 연구 동향

적외선 열화상 계측 기술은 광범위한 적용과 편리성으로 최근에 많은 각광을 받고 있는 검사 방법이다. 적외선 검사방법은 물체의 단위 면적당, 단위시간당 방출되는 복사에너지 즉, 복사 에미턴스(Radiant emittance)의 차이를 영상화하여 물체의 온도를 측정하는 방법이다. 일본 비파괴 검사 협회 규격(NDIS 3005)에 의하면 적외선 카메라와 적외선 열화상 기술의 구분은 물체로부터 방사되는 적외선 강도분포를 영상으로 표시하는 것을 적외선 카메라로 정의 하고, 이 강도분포를 온도로 환산하여 표시하는 기능이 부과되어 있는 것을 적외선 열화상 기술이라고 정의 하고 있다. 적외선 열화상 카메라는 1930년대부터 군사용으로 개발되기 시작하였고, 제2차 세계대전 당시 일본과 독일에서 적외선 탐지기술을 연구하기 시작한 이래 전승국들 역시 군사용/민용의 적외선 열화상 카메라의 핵심 기술인 적외선 센서 개발에 박차를 가하였다. 초전형 적외선 센서와 비 냉각형 적외선 열화상 시스템에 대한 연구와 개발은 영국의 GEC-Marconi 연구소와 Malvern Institute를 중심으로 1960년대부터 본격적으로 시작되었으며, 미국에서는 DOD의 DARPA를 중심으로 1970년대부터 군사적인 목적으로 연구개발이 본격화되었다. 1995년도까지 미국의 Texas Instrument 와 영국의 GEC-Marconi에서 군사적인 용도와 상업적인 용도의 시제품을 경쟁적으로 발표한 바 있다. 또한 스웨덴의 AGEMA, 미국의 Inframatrix, FSI, Indigo 4개사가 FLIR사로 흡수 합병이 되었고, 이어서 프랑스의 Cedip사와 미국의 FLIR사로 양분되어 있던 주요 시장을 또 다시 FLIR사가 Cedip사를 합병하여 주요시장의 90%이상을 점유하고 있는 실정이다.

1950년대 초반에 검출재질의 개발과 냉각방식의 도입으로 짧은 시정수를 갖는 소자가 개발되면서 활성화되었다. 초기의 적외선 열화상 기술은 단일 또는 소수의 적외선 검출소자를 이용하여 1차원으로 측정영역을 스캐닝 하여 열화상을 구성하였으며, 고성능 검출소자에 의해 0.1℃의 온도분해능을 구현할 수 있었다. 그러나 스캐닝 방식에 의한 열화상의 구현은 시간소요, 시간에 따른 온도장의 변화, 이동물체의 온도변화 등의 문제가 있었다. 또한 적외선 검출소자가 질소 냉각방식으로 적외선 열화상 시스템이 대형이고 재현성이 우수하지 못하였다. 1980년대 후반부터는 적외선 검출소자가 2차원 배열(array) 방식으로 온도를 계측하는 시스템이 개발되었다. 어레이 센서의 도입은 기존 주사방식에 비하여 열화상 데이터의 동시성이 월

등히 향상되었다. 1990년대에는 어레이 센서의 화소(Pixel)수도 증가하고 검출소자로부터 전자신호의 획득기술이 진보하여 동시성이 우수하면서도 정밀한 온도분포 화상을 고속, 고분해능으로 계측하는 것이 가능해졌다. 현재 InSb (Indium Antimonide) 검출소자를 이용하고 있는 적외선 열화상 카메라의 경우 노이즈 등가 온도차(Noise equivalent temperature difference : NETD)가 0.020 °C 이하이고 영상 획득속도(Frame rate)는 사용하는 카메라의 해상도에 따라 다르게 된다. 최근 상용 제품의 경우 640×512 화소와 420 Hz이며 화소수를 1/4로 감소 할 경우에 프레임 율은 약 4 배가 된다. 최근 수년간 적외선 열화상 카메라의 개발은 비냉각 방식으로 급격히 진보하고 있으며 비냉각 방식의 적외선 검출소자 개발은 적외선 열화상 카메라의 소형화, 경량화 및 저가격화를 가능하게 하고 있어 차후에 검사 분야의 응용과 관련하여 현장성을 고려한 비파괴검사 분야의 적용 가능성을 제시하고 있다.

비파괴 검사 기술 분야의 표준화는 ISO/TC 135에서 주관하고 있으며, ISO/TC 135 / SC 8은 적외선 열화상 비파괴검사 분야 국제 표준 규격 분과로서 국제 간사를 한국의 표준과학연구원에서 수행하고 있어 글로벌 경제 체제에서 표준화 된 기술을 우리가 선도하고 국내·외의 표준화를 선도적으로 이끌어 나갈 수 있는 분위기 조성이 완료된 상태이며 관련한 포럼의 활성화를 통하여 산업체의 적극적인 참여를 독려하는 상황인 관계로 적외선 열화상 비파괴검사의 산업 적용을 위한 연구개발 추진의 적기로서 판단된다.

물체 표면 온도 분포 계측에 기초한 비파괴평가·모니터링 기술은 적외선열화상의 응용이 성공을 얻은 분야 중 하나이다. 적외선열화상에 의한 비파괴평가기술은 결함평가를 위한 비파괴검사 기술과 적외선응용측정 기술로 크게 나뉜다. 전자는 결함의 존재에 기인하는 재료 표면의 온도변화 영역을 검출·측정함으로써 그 변화의 원인인 결함을 검사하는 열적 비파괴검사 방법이다. 또한 후자는 재료에 하중이 부과되었을 때 열탄성효과에 의한 온도변동을 적외선열화상에 의해 계측함으로써 재료에 작용되고 있는 응력분포를 가시화 계측하는 것이다.<sup>(3)</sup>

### 3 . 연구 필요성

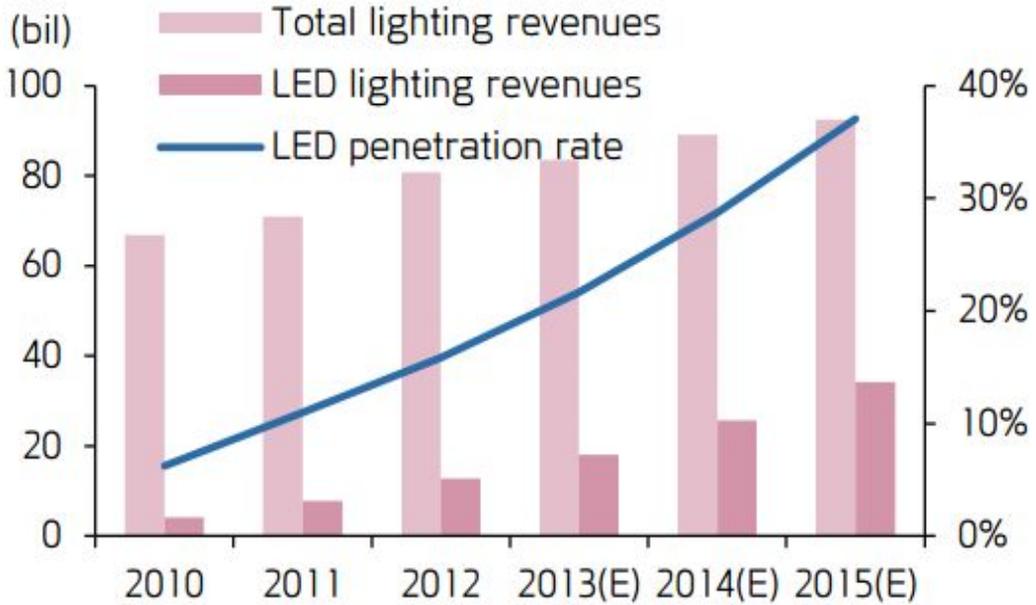
세계 각국 정부는 비효율적인 조명시스템을 금지하거나 단계적으로 폐지하는 정책을 시행하고 있다. 백열전구의 경우 대부분의 에너지가 빛이 아닌 열에너지로 방출되어 효율이 낮다. 백열전구는 전력 사용량의 5%만 빛을 내고, 95%는 열로 발산하며, 수명도 1,000시간으로 짧아 경제적으로 비효율적이다. 안정기내장형 램프는 수은 및 아르곤가스를 함유하고 있어 환경적 이슈에 노출되어 있기 때문에 궁극적으로 LED로 대체될 전망이다.

유럽과 일본은 이미 2012년 모든 백열전구의 생산과 판매를 전면 중단했고, 미국과 중국도 단계적으로 중단조치를 취해가고 있다. 한국의 경우, 2014년부터 백열전구의 생산과 수입이 전면 금지되고 단계적인 기준강화와 함께 고효율 조명기기로의 전환이 추진되고 있다. Table 1-1은 미국, EU, 일본, 호주, 중국, 한국 등 주요 국가별 백열전구 규제 정책을 나타내고 있다.

Table 1-1 Regulatory policy for incandescent bulbs by major countries

국가	날짜	내용
미국	2012년 1월	100W 백열전구 판매 금지
	2013년 1월	75W 백열전구 판매 금지
	2014년 1월	40W 60W 백열전구 전면 판매 금지
EU	2009년 9월	100W 이상 백열전구 판매 금지
	2010년 9월	75W급 백열전구 판매 금지
	2011년 9월	60W급 백열전구 판매 금지
	2012년 9월	40W, 25W급 백열전구 판매 금지
일본	2012년	백열전구 생산, 판매, 사용 금지
호주	2009년 11월	팅스텐 일반 백열전구 등 판매금지
	2010년 10월	40W 이상 백열전구 등 판매금지
	2011년 1월	반사장치가 없는 할로젠램프 판매금지
중국	2012년 10월	25W 이상 백열전구 판매금지
	2013년 10월	반사장치가 있는 백열전구 및 할로젠램프
	2012년 10월	100W 이상 백열전구 판매, 수입 금지
	2014년 10월	60W 이상 백열전구 판매, 수입 금지
	2016년 10월	15W판매, 수입 금지
한국	2014년 1월	백열전구 생산, 수입 전면 금지

Fig. 1-1은 글로벌 LED 조명 시장 전망을 나타낸 것으로 조명시장은 2013년 180억 달러에서 2015년 343억 달러로 연평균 38%의 성장률을 기록할 전망이다, 전체 조명 시장에서 LED가 차지하는 비중 또한 2013년 21%에서 2015년 37%까지 증가할 전망이다.

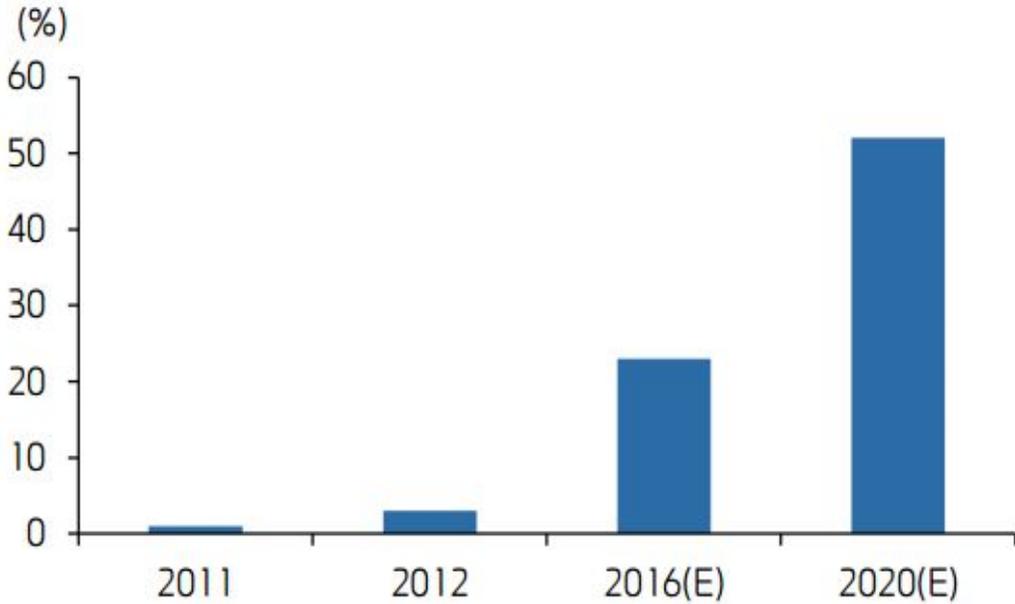


( Ledinside, 키움증권 )

Fig. 1-1 Global LED Lighting Market Forecast

Fig. 1-2는 글로벌 LED 조명 침투율 전망을 나타낸다. 전체 조명에서 LED 조명이 차지하는 비율(침투율)은 2012년 3%에서 2016년 23%, 2020년 52%로 늘어날 것으로 예상된다.

글로벌 조명시장의 수요처별 환경을 보면, 주거용 LED 조명은 각국 정부의 백열등 퇴출효과가 가시화되는 2011년 7%에서 2016년경 50%까지 확대, 오피스용 LED 조명은 2011년 6%에서 2016년 30%로 증가, 실외용 LED 조명은 2011년 12%에서 2016년 45%로 성장이 예상된다.



( Mckinsey, 키움증권 )

Fig. 1-2 Global LED lighting penetration forecast

본 연구는 LED 통합조명시스템을 대상으로 수행하였다. 현재 LED 조명 모듈의 건전성 평가는 비파괴 검사 종류 중 열화상 검사(IRT: Infrared Thermography Testing)가 이루어지고 있다. 본 실험에서는 통합조명시스템의 120W 급 LED 조명 모듈과 방열판을 적외선 열화상 카메라와 써머커플(Thermocouple)을 이용하여 열분포를 측정하여 열화상 카메라와 써머커플에서 계측된 각각의 데이터를 비교하여 건전성을 평가하고자 한다.

### 제 3 절 연구 목적

전 세계적으로 에너지절약과 환경문제가 큰 화두로 떠오르면서 고효율, 친환경 제품을 요구하는 소비자들의 목소리가 높아지고, 조명분야에서도 녹색조명으로 일컬어지는 LED 조명과 함께 공장등의 대체 조명에 대한 관심이 뜨겁다. 현재 산업 현장에서 사용되는 조명은 메탈 할라이드 램프(Metal halide lamp, MHL)등과 같은 효율이 낮은 조명이 대부분을 차지한다. 최근 몇 년 LED 조명에 대한 사회적 기대가 컸지만 아직까지 제품에 대한 건전성을 확보하지 못하고 가격마저 비싼 편이라 보급이 예상보다 더딘 상황이다. 현재 산업등에 적용되는 기존 조명은 재점등 시간이 길며, 낮은 내구성으로 문제가 많고, 조명 재교체의 번거움으로 인해 공장의 제조, 생산 불량률이 높아지는 문제점으로 이어질 수 있다. 향후 공장과 같은 산업현장에서도 인간친화적인 조명 환경 개선이 필요하다. LED 조명의 경우 향후 경쟁력 있는 방열소재 확보와 최적화된 방열구조를 개발하는 것이 LED 조명 산업에서의 경쟁 당락에 결정적인 영향력을 발휘한다. 방열기술 적용을 통한 LED 조명의 수명 및 신뢰성을 확보하고 경량화로 시장경쟁력을 갖춘 LED 전용 등기구 개발이 필요하다.

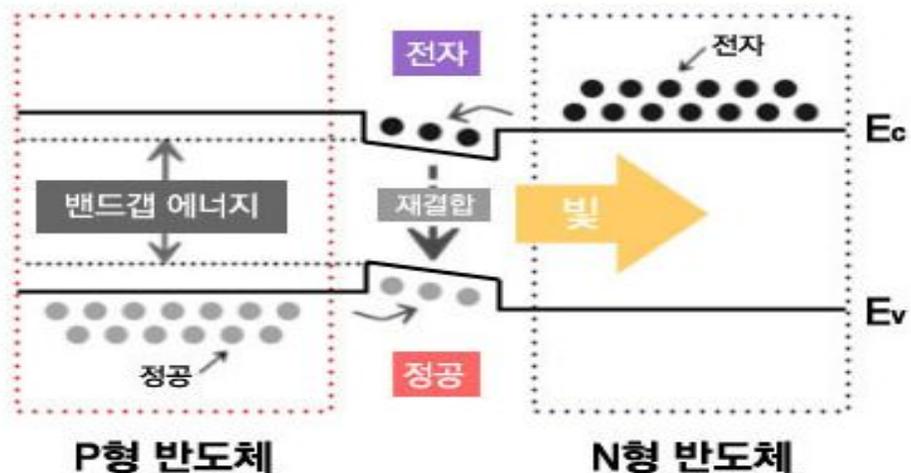
본 연구에서는 현재 산업현장에서 사용되는 메탈 할라이드 램프(MHL)등을 대체할 원격제어방식을 적용한 120W 급 LED 통합조명시스템을 제안한다. 또한 원격제어방식을 적용한 LED 통합조명시스템 최적설계와 건전성 평가를 통해 LED 조명산업에서 우리나라가 글로벌 리더로 도약할 수 있는 절호의 기회를 제공하고, 아직은 기술개발 등 시장여건이 성숙되지 않은 상황에서 향후 LED 조명 시장에서 성공하기 위한 방안 자료로 활용되었으면 한다.

## 제 2 장 이 론

### 제 1 절 LED 조명 개념 및 특성

#### 1 . LED 조명

LED는 전기에너지를 빛에너지로 변환시켜주는 ‘광반도체’이며 LED 원리는 Fig. 2-1과 같다. LED는 크게 2가지 구조 물질로 이루어져 있다. 양(+)의 전기적 성질을 가지고 있는 p형 반도체와 음(-)의 성질을 가지고 있는 n형 반도체가 바로 그것이다. 전자(Electron)가 많아 음의 성격을 띤 n형 반도체와 전자의 반대 개념인 정공(Hole)이 많아 양의 성격을 띤 p형 반도체가 얇은 층 형태로 붙어 있다. 이 두 물질은 서로 붙어있어도 큰 반응이 없다가 전기에너지 즉, 순방향으로 전압·전류를 흘려주게 되면, 수 볼트의 전압으로 전류가 흘러 발광한다. 이 때 (+)와 (-)가 만나 에너지를 발생시키는데 이 에너지가 빛의 형태로 방출되는 것이 LED가 발광하는 원리인 셈이다.

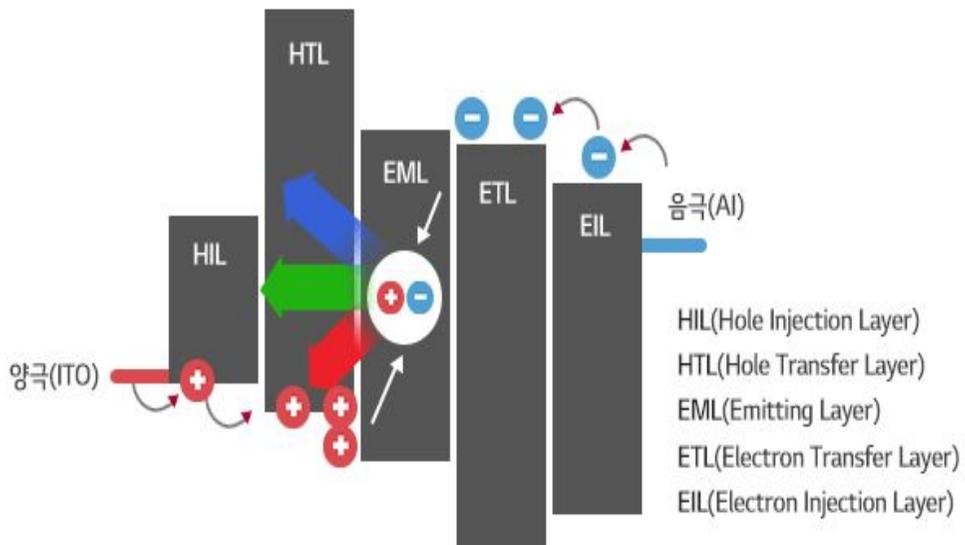


( 삼성반도체이야기, 2013, LED란 무엇일까? )

Fig. 2-1 LED Principle

n층의 전자와 p층의 정공이 결합하면서 전도대(Conduction Band,  $E_c$ )와 가전자대(Va lance Band,  $E_v$ ) 사이의 에너지 준위( $eV$ ) 차이에 따라 에너지를 발산하는데, 이 에너지 준위 차이인 밴드갭 에너지( $E_g$ )에 따라 빛의 색상이 정해진다. 즉, 에너지 차이가 크면 단파장인 보라색 계통의 빛을 나타내고, 에너지 차이가 작으면 장파장인 붉은색 계통의 빛을 나타낸다. 또한, 어떤 구조의 화합물을 쓰느냐에 따라 LED 빛의 색깔이 달라지기도 하는데 이는 화합물의 재료에 따라 에너지 준위( $eV$ )차이가 달라지기 때문이다.

반면, OLED는 LED처럼 스스로 빛을 내지만, 과정은 조금 다르다. Fig. 2-2는 OLED 물질을 나타낸다. 전류가 흐르면 전자(-)주입층과 정공(+ )주입층의 전자와 정공이 운송 층의 도움을 받아 발광 층에서 만나 빛을 내는 방식이다. LED와 빛을 내는 방식에서 다소 차이가 있다. 즉, OLED 전극에 전압을 가하면 Anode에서는 Hole이 주입·운송되고 Cathode에서는 Electron이 주입·운송되어 발광층(EML) 내에서 재결합하게 되며, 이때 생성된 Exciton이 기저상태로 전이하면서 빛을 내게 된다.



( LG화학, 2016, OLED물질 )

Fig. 2-2 OLED materials

하나의 백색 LED에서 발생하는 광속(luminous flux)은 20[mA]에서 약 1.5 ~

2[lumen] 정도인데, 조명으로 사용하기 위해서는 100[lumen] 이상이 되어야 하므로 대략 60개 정도의 LED칩 조합이 필요하다. LED 조명 시스템의 성능 좌우하는 요인은 점등 시 발생하는 열의 방산(放散)문제인데 일반 LED에서 입력 전력대비 광 출력은 약 15 ~ 20%가 되고, 나머지는 대부분 열로 변환된다. 이때 발생한 열은 조명의 수명을 단축할 뿐만 아니라 조명효율까지 떨어 뜨리고, 광도 및 색도를 크게 변화시켜 조명 성능의 안정도를 크게 저하시키는 요인이 된다. 이와 같은 이유로 소자의 LED칩의 접합부위에서 발생하는 열을 방출시켜 열 저항을 최소화 하는 것이 지금의 LED 조명 시스템의 가장 큰 과제이다. 또한 LED는 작은 전압변화에 큰 전류와 전력이 변화하는 특성이 있고, 주변온도변화에 따른 동특성이 크게 변화하는 특성이 있어 공급전류를 적절히 제어하는 전원장치가 필수적이다.

같은 종류의 LED에서도 회로 방식에 따라 전체 소비전력 및 특성의 차이가 발생되므로 최적설계를 위해서는 시스템 측면에서 조명용 LED 모듈 설계기술은 매우 중요하다. LED 전원장치는 기본적으로 목표로 하는 LED 시스템에 따라 설계 및 사양이 종속되지만 일반성을 갖는 전원장치 모듈 또는 IC를 별개로 개발하여 추가적인 기능을 다양하게 포함하여 광범위하게 사용할 수 있다. 따라서 수명이 길고, 시스템의 안정된 광출력과 신뢰성을 보장받기 위해서는 LED 조명시스템 기술개발이 필수적이다.

LED 조명시스템은 집적된 LED 광원(LED Array)을 중심으로 전원장치(Ballast), 방열판(Heat Sink), 광학장치(Lens, Diffuser) 등으로 구성된다. LED 조명시스템은 LED 광원 자체의 여러 장점에도 불구하고 이를 적용한 시스템 설계를 위해서는 몇 가지 요인을 고려하여야 한다.

조명기구의 성능과 내구성을 유지하기 위해 주변온도를 고려해 정격 허용전류 내에서 일정한 광도 유지가 가능하도록 전원구동장치를 설계하여야 한다. 일반적인 LED 조명기구는 직류 수심[V]의 정전류원으로 구동되며, 이 경우 주위온도가 상승하면 광도가 저하되고 허용전류도 감소한다. 이러한 조명기구를 고온의 옥외에 설치할 경우 광도 저하 및 허용전류 감소에 의한 과전류로 치명적인 손상을 줄 수 있다.

작은 점광원과 높은 지향성을 가진 LED를 다수 결합하여 만드는 조명기구는 사용자에게 글레어(glare)를 초래하여 불쾌감 및 피로감을 줄 수 있다. 따라서 일반조명용 제품으로 응용을 위해서는 용도에 맞는 배광을 가질 수 있도록 적절한 렌즈 및 조명기구가 설계되어야 하며, 또한 다수의 LED를 집적화하면서 발생하는 국부적

열 발생과 이를 처리하는 기술이 시스템성능을 크게 좌우하게 된다.

## 2 . LED 조명의 특성

Table 2-1은 LED조명과 기존 조명의 특성을 비교 분석한 표이다. 이들 각각의 요소들에 의해 열이 발생되고, 발생한 열은 케이블을 둘러싼 매질을 통해 외부로 방산된다. 케이블에서 발생하는 손실은 3가지 유형으로 도체손실, 유전체손실, 시스템손실로 나누어 볼 수 있다.

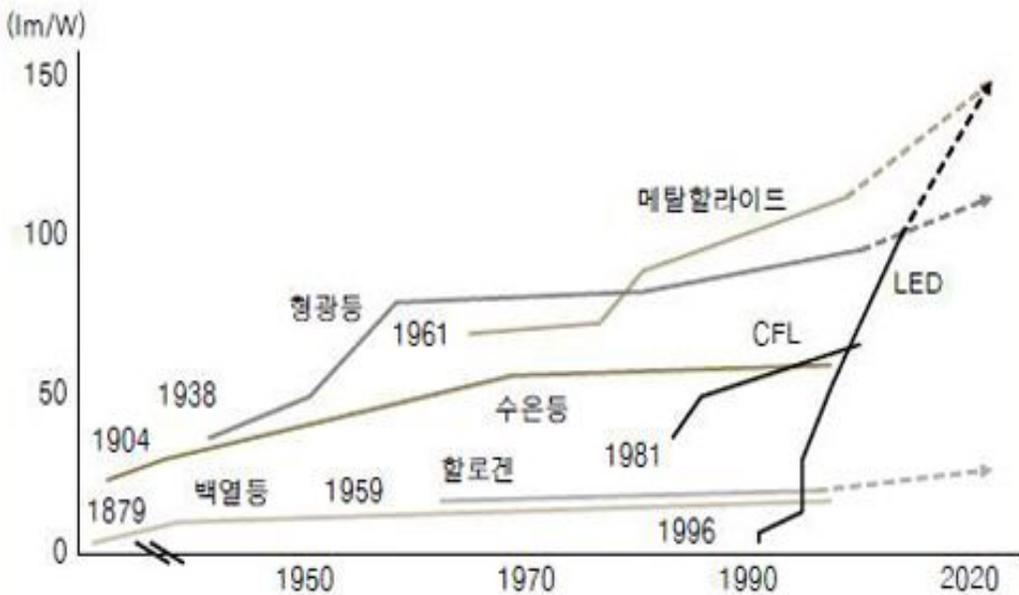
Table 2-1 Comparison of LED lighting with existing lamps

특성항목 \ 광원	LED 조명	백열등	형광등
특징	점광원	점광원	선광원
광원 효율 (lm/W)	100	20	100
연색상 (Ra)	90	90	80
수명 (시간)	80,000	1,000	20,000
응답성 (스위칭 속도)	100 ns 이하	0.15 ~ 0.25초	1~2초
온도-광출력	온도의존성 작음	온도의존성 작음	온도의존성 작음
노이즈	없음	없음	있음
다색성	가능	불가능	부분적 가능
색온도	4,600~ 15,000 K	2,400~ 3,000 K	4,200~ 6,500 K
소비전력 (W)	5.4	60	20
디밍	가능	*제한적 가능	*제한적 가능

기존의 조명과 비교하여 LED 조명이 차세대 조명으로 주목받고 있는 이유는 아래 내용에서 보는 것과 같이 저전력, 고효율, 긴 수명, 친환경 소재 사용, 효율적 공간 사용, 광출력 제어와 빠른 응답, 그리고 다양한 연출 효과 같은 특성을 가지고 있기 때문이다.

## 가. 저전력, 고효율

LED 조명의 최대의 장점은 광변환 효율이 높아 소비 전력이 낮다는 점이다. 현재 LED 광원은 백열등 전력 소비량에 20% 정도 수준에 불과하다. Fig. 2-3의 LED 광원 효율 개선 그래프를 보면 이러한 광효율이 계속해서 개선되고 있으며, 최근 몇 년 사이에 LED 광원의 효율 개선이 급속하게 이루어졌고, 향후에도 이런 추세가 지속될 것으로 예견된다. 특히 미국, 유럽, 일본 등 선진국에서는 150[lm/W] 광효율을 갖는 LED 광원 개발을 정부가 주도적으로 추진하고 있다.



( LG 경제연구원 분석, LED 조명, 미래의 빛이 되려면 )

Fig. 2-3 LED light source efficiency improvement

## 나. 긴 수명

LED 조명은 백열등보다는 약 80 ~ 100배, 형광등보다는 약 10배 이상의 긴 수명을 가지고 있다. 현재 시장에서 판매되는 LED 조명의 수명이 평균 약 8만 시간이라고

할 때, 하루에 13시간 동안 LED 조명을 매일 켜다고 가정했을 경우 소비자는 한번 구입한 LED 조명을 약 17년이라는 시간동안 사용할 수 있다는 계산이 나온다. 그렇기에 긴 수명이 상대적으로 비싼 LED 조명의 가격 약점을 보완할 수 있다고 생각한다. 따라서 LED 조명의 가격 절감 노력과 함께 에너지 효율을 높이는 연구가 필요하다.

## 다. 친환경 소재

LED가 주목받는 또 다른 이유로는 LED 조명을 사용하면 환경을 보호할 수 있다는 장점이 있다. 환경규제로 백열등이 강제 퇴출 될 경우, 이 자리를 대신할 광원 중 가장 손꼽히는 광원이 형광등이다. 형광등은 효율도 좋고, 수명도 길며, 가격도 저렴하기 때문이다. 하지만 기존 조명시장의 가장 큰 비중을 차지하고 있는 형광등은 수은(Hg)을 포함하고 있어 환경을 오염시킨다는 단점을 가지고 있다. 이는 형광등이 저압의 수은을 유리관에 주입한 뒤 양쪽 전극에서 전자와 수은을 충돌시켜 자외선을 방출시키고, 이렇게 방출된 자외선을 유리관의 형광 물질과 다시 충돌시켜 빛을 내는 원리이기 때문이다. 반면에 LED는 수은을 비롯한 다른 환경 오염물질을 포함하고 있지 않다. 따라서 백열등의 대체재로 형광등보다는 LED의 손을 들어주는 추세이다.

## 라. 공간 효율성

LED 칩의 크기는 대략 0.25[mm<sup>2</sup>]로 쌀알 크기보다 작다. 또한 칩을 포함한 패키지의 넓이도 대략 21[mm<sup>2</sup>], 높이는 보통 5[mm] 미만이며, LED 조명의 두께는 1[cm] 이하로 생산이 가능하다. LED 조명을 사용하게 되면 그만큼 실내 공간이 넓어지는 효과를 볼 수 있다. 또한 기존 조명과 비교하여 조명의 형태를 다양하게 가공할 수 있다는 장점을 가지고 있어 LED 조명을 사용할 경우 실내 공간 활용 효율을 높일 수 있다. 최근에는 냉장고, 에어컨, 프린터, 자동차 등의 굵은 외면을 따라 조명을 설치할 수 있는 활용도가 점점 늘어나고 있는 추세이다.

## 마. 광출력 제어와 빠른 응답

LED 조명의 광출력 제어하기 위해 인가되는 전압의 크기는 일정하게 하고 펄스폭 변조 (Pulse Width Modulation, PWM) 방식을 사용한다. PWM 방식은 광출력 제어에 용이하다. 기존 백열등 또는 형광등의 경우 빛을 발산하기 위해서는 전원 공급 후 빛을 발산하기까지 일정한 시간이 소요된다. 이에 반해 LED 조명은 전원 공급과 동시에 빛을 발광하게 된다. 이러한 특성 때문에 다양한 응용 분야에 활용되고 있다.

## 바. 다양한 연출 효과

LED 조명은 다양한 색상과 밝기 제어를 통해 다양한 조명 효과를 연출할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 디지털 조명인 LED가 기존 아날로그 조명과 차이를 보이는 또 하나의 포인트는 지능형 제어가 가능하다는 점이다. 기존 조명은 하나의 한정된 색상으로 고정된 조명을 연출할 수 밖에 없는데, 기존 조명 중에서도 비교적 컬러나 밝기에서 자유도를 가지는 형광등의 경우 색온도(color temperature)가 다른 형광등을 디밍(Dimming)하거나, 켜는 형광등 개수를 변화시키거나, 다른 컬러의 형광등을 조합해서 변화를 추구할 수는 있다. 그러나 이를 위한 전용 안정기의 가격이 워낙 고가이고, 이를 위한 공간이 많이 필요하며, 실제 표현할 수 있는 범위도 한정되어 있어 사실상 유명무실 했었다. 반면 LED 조명은 다양한 컬러, 밝기, 디밍 등으로 역동적인 조명을 연출할 수 있다. 그래서 인간의 생체 주기나 시간, 기분에 따라 빛의 세기, 색상, 밝기, 색온도 등을 변화시킬 수 있다.

### 3 . LED 조명의 한계

고효율, 저전력, 친환경적 특성 등 다양한 장점에도 불구하고 기존 조명을 LED 교체하는 저해 요소로 작용하고 있는 주된 이유는 LED 조명의 높은 가격으로 생각된다. LED 조명의 대중화를 위해서는 LED 조명의 장점에 대한 홍보뿐만 아니라 경제적인 측면에서의 접근이 필요하다. LED 조명의 경제적인 비용을 평가하는데 있어 가장 일반적으로 사용되고, 소비자가 이해하기 쉬운 것은 투자 회수 기간이다. 투자 회수 기간이란, 어떤 설비에 대한 초기 투자 비용을 회수하는데 필요한 기간을 일컫는다. 이를 LED 조명에 적용한다고 하면 형광등을 대신하여 LED 조명을 사용할 때 이득을 얻기 시작하는 기간을 말한다. 아래 Table 2-2는 1,000개의 형광등을 LED로 교체 시 투자 회수 기간을 나타낸 표이다. 계산을 용이하도록 조명 사용 시간을 매일 15시간, 30일/월, 전기요금을 100원/1[kWh]로 통일하여 가정하였다.

Table 2-2 Payback period when replacing LED lights with fluorescent lamps

구분	비교 형광등 (A社)	형광등 대체용 LED 조명등 (B社)	형광등 대체용 LED 조명등 (C社)
소비전력[W]	32	20	20
가격[원]	2,500	82,500	80,000
수명[시간]	8,000	50,000	50,000
투자회수기간[3년]	-	9.2년	9.2년

( 서울특별시, 2011, 에너지 절감형 LED 사무실 조명 설계 가이드라인 )

A社에서 판매중인 32W급 형광등을 기준으로 B사와 C사에서 판매중인 32W급 형광등 대체용 LED 조명등 (LED TUBE TYPE)의 투자 회수 기간을 초기 투자비용, 전기 요금, 교체 비용만을 고려하여 계산한 결과 각각 9.2년이라는 값을 얻었다. 하루 15시간을 사용하였을 경우 LED 조명의 수명을 기준으로 계산하면 9.2년 마다 한 번씩 교체해야 하므로 LED 조명등 교체를 통한 실질적인 이득은 없는 셈이다. 간단한 계산을 통하여 얻어진 결과값이라고 하더라도 투자 회수 기간을 줄이기 위한 노력이 절실하다. 투자 회수 기간은 초기 투자비용과 소비 전력에 영향을 받게 되고, 초기 투자비용의 LED 조명의 가격과 직결되는 부분이다. LED 조명의 가격은 단기간에 줄

일 수 있는 부분이 아니라 투자 회수 기간을 줄여 에너지 효율적이며 친환경적인 LED 조명을 빠르게 확산시키기 위해서는 소비 전력을 줄이는 방안을 연구해야 한다.

#### 4 . LED 접합온도 및 열저항

LED의 수명에 영향을 미치는 인자는 LED의 접합온도( $T_J$ )이다. LED의 접합온도는 주위의 온도( $T_A$ ), 열방출 통로의 열저항( $R_{th,J-A}$ ) 및 소모되는 전력( $P_D$ )에 의해 결정된다. 관계식은 다음과 같다.

$$T_J = T_A + R_{th,J-A} \times P_D = T_A + R_{th,J-A} \times (I_F \times V_F) \quad ( 2-1 )$$

소모전력( $P_D$ )은 LED에 인가하는 입력전류( $I_F$ ) 및 전압( $V_F$ )의 곱이다. 접합온도를 결정하는 요인 중 열저항(Thermal Resistance)은 패키지의 재료, 구조에 의해 결정된다. 열저항( $R_{th}$ )은 다음식과 같다.

$$R_{th} = \frac{1}{\rho} \times \frac{L}{A}$$

$$\begin{aligned} \rho &: \text{Thermal conductivity}(W/mg \cdot K) & ( 2-2 ) \\ L &: \text{Length}(m) \\ A &: \text{Cross section}(m^2) \end{aligned}$$

열저항은 열전도도( $\rho$ , Thermal conductivity) 및 열통로의 단면적에 역비례하고 열통로의 길이에 비례한다. 따라서 LED 패키지 설계시 위의 사항을 고려하여 설계하여야 한다.

접합온도의 측정은 직접 접합영역에서 측정이 불가능하며 솔더 포인트의 온도( $T_s$ )를 측정하고 접합온도와 솔더 포인트 사이의 열저항을 측정하여 계산할 수 있다. 접합온도 측정에 사용되는 식은 다음과 같다.

$$T_J = T_s + R_{th,J-S} \times P_D \quad ( 2-3 )$$

아래 Fig. 2-4는 LED의 접합온도를 측정하기 위한 테스트 장치이다. Power supply, Thermocouple, PCB, LED로 구성되어 있다.

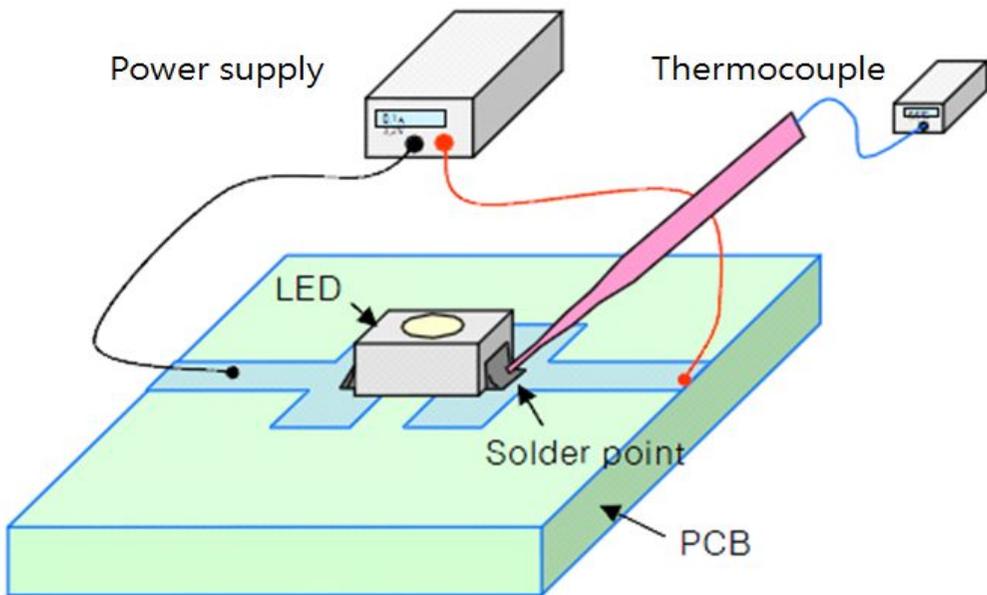


Fig. 2-4 Test jig for LED junction temperature measurement

PCB 솔더 패턴 위에 LED 패키지를 실장한다. 전류를 인가하고 전류 및 전압을 측정할 수 있는 Power supply와 솔더 포인트의 온도를 측정하기 위한 Thermocouple이 필요하다.

## 5 . 방열판(Heat-Sink)

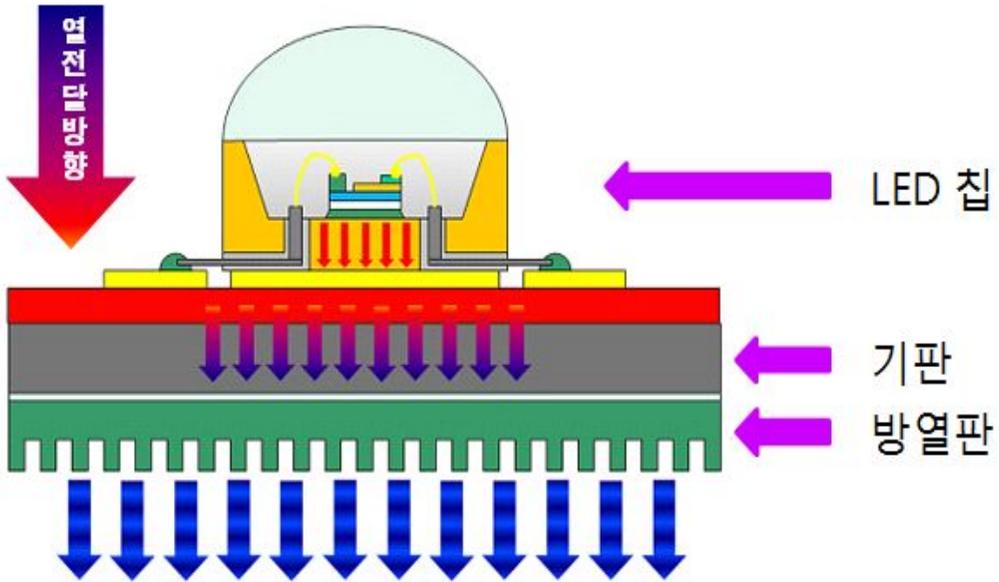


Fig. 2-5 LED package heat dissipation chart

Fig. 2-5는 LED 패키지 방열 흐름도를 나타낸다. LED는 소자의 온도가 올라갈수록 수명이 감소하고 LED의 발광효율이 떨어진다. 방열판은 LED 소자에서 발생하는 열을 흡수하고 방출하여 LED 소자를 보호한다.

LED 조명에서 방열은 크게 부품 단계의 열 설계와 시스템 열 설계로 구분된다. 부품 열 설계는 사용되는 부품 및 소재의 열 특성을 높여 방열 기능을 강화하는 것이다. LED 조명에서는 방열판은 물론 PCB, 케이스, 접착제 등 사용되는 모든 소재가 제품의 방열기능에 영향을 미친다. LED 칩에서 발생한 열이 PCB로 전도되고 이 열이 다시 방열판으로 이동한 후 공기와의 대류작용을 통해 외부로 빠져 나가는 일련의 과정에서 모든 부품에 열이 전도되기 때문이다.

따라서 LED 조명을 구성하는 부품은 열전도성을 높이는 것이 관건이 된다. 그리고 케이스나 방열판과 같은 외부 소재의 경우에는 열전도성뿐 아니라 열 방출도 중요한 요소로 작용한다. 방열판의 모양과 표면적은 열방출의 중점적 요소로 매우 중요하다. 일반적으로 방열판이 넓은 표면적을 가지거나 핀이 많거나 Plate가 두꺼울

경우 열이 더 잘 빠지게 된다.

방열판으로 전도된 열은 공기의 대류작용을 통해 외부로 배출된다. 따라서 대류작용이 원활하게 진행될수록 제품의 방열 특성은 향상되게 된다. 방열판과 공기가 만나는 면적이 많을수록 대류를 통한 열방출량이 커지기 때문에 대부분의 방열판은 ‘핀’이라 불리는 요철 형태의 구조를 가지고 있다. LED 조명의 외부가 매끈하지 않고 주름져 있는 형태로 제작되는 이유가 바로 이 때문이다.

핀의 설계에 있어서 핀의 두께 및 핀과 핀 사이의 간격의 최적치를 찾는 것이 중요한 부분이다. 공기에 닿는 면적을 늘리기 위해 지나치게 촘촘하게 핀을 설계할 경우, 리사이클 현상이 나타나 오히려 공기로 전도된 열이 다시 방열판을 통해 내부로 전달될 우려도 있기 때문이다. 핀의 간격뿐 아니라 두께를 적정하게 조율해 설계해야 한다.<sup>(4)~(11)</sup>

## 제 2 절 적외선 열화상 기술의 개요

모든 물질을 이루고 있는 기본 단위인 원자들은 절대 온도 0[K](-273.16℃, -459.72°F) 이상에서 미세한 진동을 하고 있다. 이러한 원자들의 진동에너지는 적외선 영역에서의 에너지와 동일하다. 즉, 절대 온도 0[K] 이상에서 모든 물체는 적외선을 방출한다. 물체에서 방출되는 복사 에너지의 강도는 온도 및 복사되는 전자기파의 파장에 따라서 달라진다. 일반적으로 온도가 높을수록 많은 양의 복사 에너지를 방출하며, 이러한 이유로 적외선을 열선이라고도 부른다.

열화상(Thermography)은 빛이 갖는 다양한 파장대역으로부터 적외선 파장대역 중에서도 1.3[μm]으로부터 12[μm] 범위의 적외선을 적외선 검출소자인 센서를 통해 물체 혹은 대상체로부터 방사되어지는 적외선을 탐지하여 온도 혹은 그 자체를 화상으로 보여주는 기술이다. 지난해 메르스, 에볼라, 지카바이러스 등에 확산으로 신종 감염병의 위기로부터 국민을 보호하기 위해 공항이나 항만의 출입국 시 얼굴의 열을 실시간으로 감지하여 이상 발열정도를 나타내는 기술은 우리가 일상생활에서 가장 흔하게 접할 수 있는 thermography 기술이다. 이를 발전시킨 적외선 열화상 기술은 단순한 온도뿐만 아니라 검출된 적외선을 이용하여 비파괴 진단 및 검사, 고장분석, 응력해석을 통한 피로파괴, 의료 임상진단, 바이오 및 식품저장, 기능성 의류 및 화장품 분야 등에 응용되고 있다. 또한, 고도로 집적화된 적외선

열화상 이미지는 군수산업 및 항공우주에서도 활용되어 항공기의 야간정찰, 기갑 부대의 야간탐지, 해군의 원거리 적군 탐지, 우주 신호 탐사에 운용되어 왔으며 현재는 비파괴 탐지 기술의 한 영역으로 확고히 자리 잡으면서 지속적으로 그 범위가 확대되고 있다.

## 1. 적외선(Infrared Radiation)

Table 2-3 Infrared classification with wavelength

Infrared Ray	NIR (Near Infrared Ray)	SWIR (Short Wavelength Infrared Ray)	MWIR (Mid Wavelength Infrared Ray)	LWIR (Long Wavelength Infrared Ray)
Wavelength	0.7 ~ 1.1 $\mu$ m	1.1 ~ 2.5 $\mu$ m	2.5 ~ 7.0 $\mu$ m	7.0 ~ 15.0 $\mu$ m

열화상 측정 및 적외선 광선에 활용되는 적외선 에너지는 전자기 스펙트럼의 일 부분으로 가시광선과 유사한 형태의 특성을 나타낸다. Table 2-3은 파장에 따른 적외선 분류를 나타낸 것이다. 이러한 적외선은 빛의 속도로 공간을 이동하며 반사, 굴절, 흡수 및 방사 등의 현상을 나타낸다. 적외선 에너지의 파장은 가시광선에 비해 상당히 길어서 0.7[ $\mu$ ]에서 1000[ $\mu$ m] 사이의 길이를 가진다. 모든 물체는 온도의 작용으로서 적외선을 복사(방사)한다. 적외선 열화상 측정 기법은 대상체에서 방출되는 적외선 열에너지를 검출하고 측정하기 위해 사용된다. 열 혹은 적외선 에너지는 파장이 너무 길어 육안으로 탐지할 수 없으므로 비(非)가시광선이며 가시광선과 달리 적외선 환경에서는 절대 영도를 초과한 온도의 모든 사물이 열을 방출한다. 즉, 모든 물체가 적외선을 복사한다는 의미이다. 이러한 적외선 에너지는 원자와 분자의 진동과 회전으로 발생한다. 물체의 온도가 높을수록 더 많은 움직임이 발생하고 결국 더 많은 에너지를 복사한다. 이 에너지가 적외선 열

화상 카메라에 감지되는 것이다. 적외선 열화상 카메라는 온도를 보는 것이 아니라 열의 복사, 즉 열에너지를 감지하는 것이다. 절대영도에서 모든 물체는 최저의 에너지 상태를 나타내며, 따라서 적외선 복사도 최소 수준으로 유지된다.

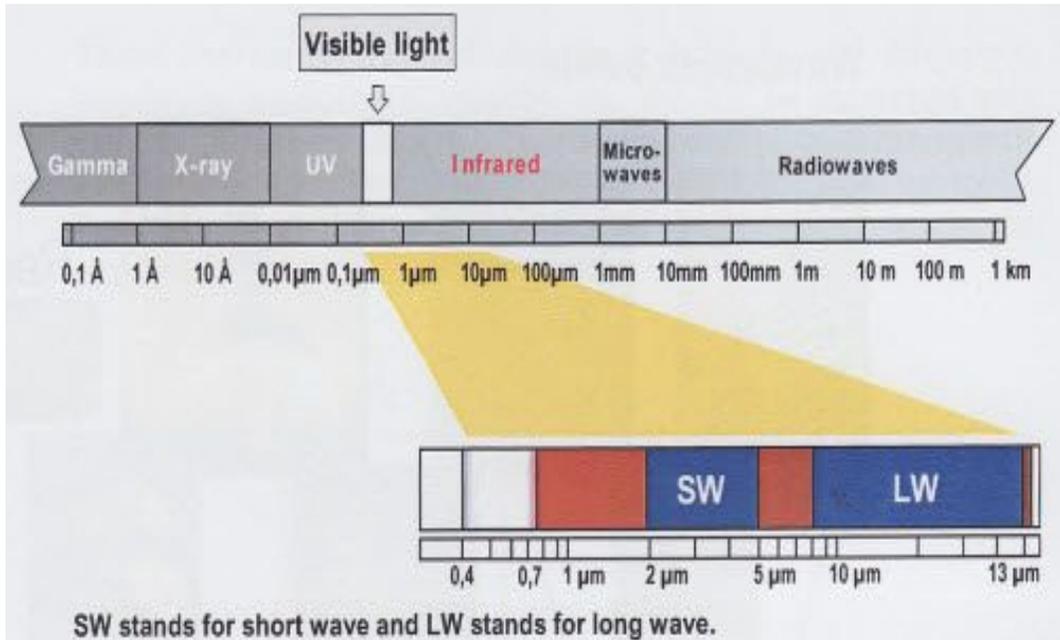


Fig. 2-6 The electromagnetic spectrum

적외선 복사는 Fig. 2-6에서와 같이 전자기 복사의 일종으로 가시광선보다 긴 파장을 가지고 있음을 알 수 있다. 다른 형태의 전자기 복사로는 X-ray, 자외선, 라디오파 등이 있다. 전자기 복사는 주파수 혹은 파장에 의해 범위가 정해진다. 전자기 스펙트럼은 대역(band)이라고 부르는 많은 파장의 영역으로 나눌 수 있다.

적외선 열화상 카메라는 1.3[μm] ~ 12[μm] 대역을 사용한다. 여기서 단파(SW : Short wave) 영역은 2[μm] ~ 5[μm]의 대역에서 복사가 검출될 수 있는 범위를 말하며, 장파(LW : Long wave) 영역은 8[μm] ~ 12[μm]의 대역의 복사가 검출될 수 있다. 그리고 중간에 5[μm] ~ 8[μm]의 대역에서는 대기에서의 낮은 투과율에 의해 전달률이 0%를 나타내고 있으므로 적외선 검출이 불가능하다. 또한 SW 영역에서는 고온의 적외선 검출이 용이하고 LW 영역에서는 저온의 적외선 검출이 용이하다. Fig. 2-7는 다른 파장 대역에서의 대기 투과를 나타낸 것이다.

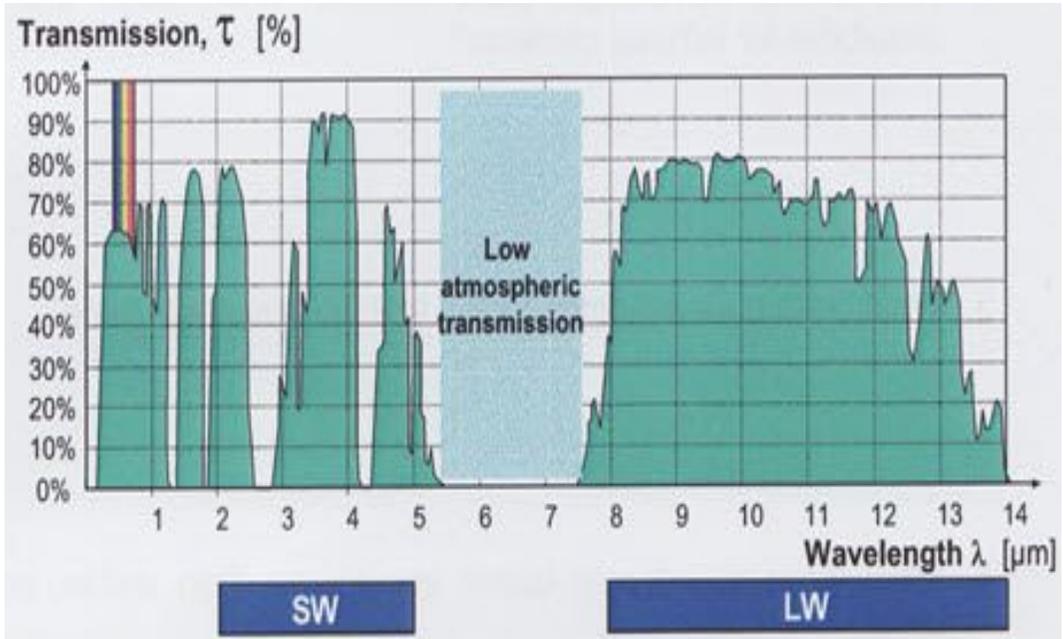


Fig. 2-7 Atmospheric transmission in different wavelength bands

## 2. 열화상 원리 및 이론

모든 물체는 절대온도 제로 켈빈(0 Kelvin) 이상에서 적외선 복사에너지를 방출한다. 복사란 전도와 대류가 고체, 액체, 기체 등의 매질을 이용하여 열 이동을 하는 것과는 달리 매질을 통하지 않고 복사에 의해 열을 이동하는 것을 말한다. 적외선 열화상 측정 원리는 Fig. 2-8에서 보이는 것처럼 물체 표면에서 방출되는 적외선을 검출하여 그 물체의 온도분포가 높은 곳은 장파장의 적색으로, 낮은 곳은 단파장의 청색으로 나타낸 열화상이다. 따라서 열적으로 가열된 재료를 적외선 카메라를 통해 구조물의 표면온도 분포를 화상으로 알 수 있을 뿐 아니라 물체의 각 지점에 대한 온도분포까지 측정이 가능하다.

적외선 열화상 측정 순서를 살펴보면 다음과 같다.

- Infrared energy는 imager의 광학렌즈를 통과한다.
- Energysms imager sensor에 모아진다.
- Sensor는 infrared energy를 electronic signal 변환한다.

- 열 영상은 물체 표면의 온도를 수천 개의 점으로 높낮이에 따라 표현된다.

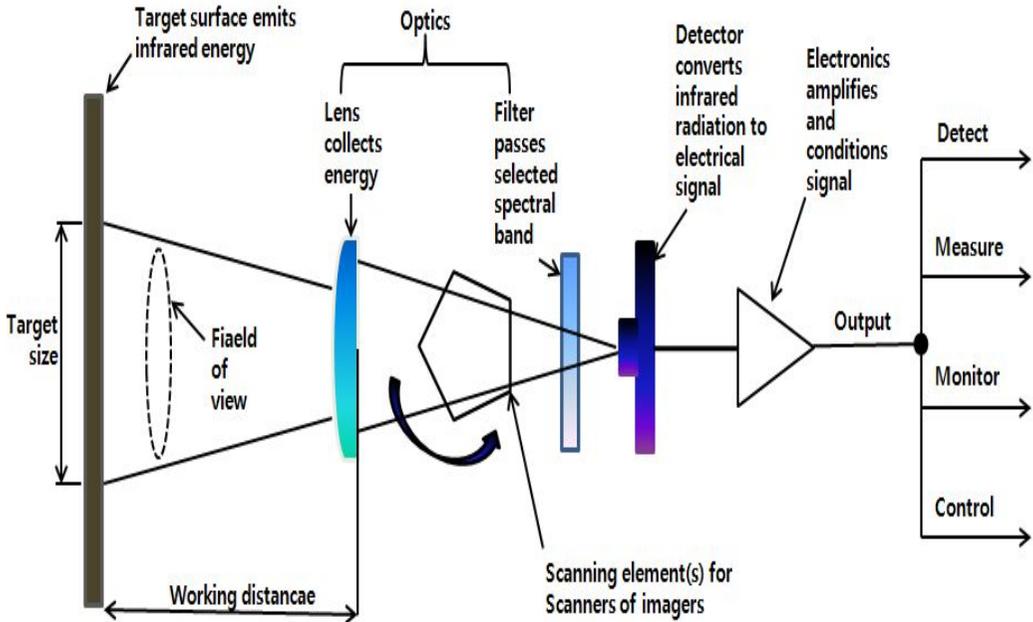


Fig. 2-8 IR camera with addition of scanning element for imaging

적외선 열화상 기술에서는 결함은 적외선 이미지에서 결함이 차지하고 있는 화소 수(pixel)로 크기를 대략적으로 추정할 수 있다. 일반적으로 결함의 크기측정을 위해서는 먼저 지시자를 이용하여 적외선 카메라의 화각에 따라 단위 화소에 대응하는 실제 길이를 구하고, 단위 화소에 대응하는 길이를 결함이 차지하는 화소수에 곱함으로써 결함의 크기를 산정하는 방법을 사용한다. 즉, 결함의 크기 [mm]  $D$  는 식 ( 2-4 )와 같이 표현된다.

$$D = M \times \left( \frac{L}{P} \right) \quad ( 2-4 )$$

여기에서,  $L$ 은 지시자(calibrator)의 길이[mm],  $P$ 는 지시자의 길이에 대응하는 화소수(pixel),  $M$ 은 결함이 차지하는 화소수(pixel)이다.

물질을 이루고 있는 입자(전자, 이온, 원자, 분자)들은 미세한 진동에 의해 복사

에너지를 방출한다. 이러한 열복사는 기체나 액체, 고체 사이에서 차이점이 존재한다. 복사에너지의 운반을 설명하기 위해서는 두 가지 접근 방법 즉, 광자 복사와 전자파를 고려하는 방법이 있다. 광자 에너지  $W$ 는 물질내부의 진동 특성으로 인해 다음과 같이 식( 2-5 )로 표현될 수 있다.

$$W = \frac{hc}{\lambda} \text{ joules} \quad ( 2-5 )$$

여기서  $h$  는 Plank 상수( $6.625 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ )이고,  $c$  는 빛의 속도( $2.998 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ )이다. 상기 식으로부터 광자 에너지는 파장에 반비례한다. 따라서 파장이 짧은 복사는 많은 광자 에너지를 포함한다. 그러므로 파괴력이 큰 감마선이나 X선과 같은 파장이 짧은 복사를 피하려고 하는 것은 당연하다. 복사열 전달은 유한한 온도의 모든 표면이 전자기파 방식으로 에너지를 방출하여 생기는 열전달 현상으로, 유한한 온도의 물질에 의하여 방사(emission)되는 에너지로 진공에서 열 손실이 없으므로 가장 잘 이루어진다.

전자기파는 주파수  $f$  와 파장  $\lambda$ 에 의하여 표현되며, 하나의 매체 속에서 이들 두 성질은 다음과 같이 식( 2-6 )과 관계가 있다.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad ( 2-6 )$$

파장의 일반적인 단위는 마이크로미터( $\mu\text{m}$  ;  $1\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$ ), 나노미터( $\text{nm}$  ;  $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ), 앙스트롬( $\text{\AA}$  ;  $1 \text{\AA} = 10^{-10} \text{ m}$ )이다. 1864년 물리학자인 James Clerk Maxwell은 전하를 가속하거나 전류를 바꾸면 전기와 자기장이 생긴다고 가정하였다. 빨리 움직이는 장을 전자기파 또는 전자기복사(electromagnetic radiation)라고 부르며 이는 원자나 분자 내에서 전자의 분포가 변화되었을 때 물체가 방사하는 에너지이다. 1887년 Heinrich Hertz는 실험을 통해 이러한 파장이 존재함을 입증하였다. 전자기파는 다른 파장처럼 에너지를 전하고 모든 전자파는 빛의 속도로 전파된다. 파장이나 전파속도와 달리 전자파의 주파수는 출처(source)에만 관계되며 파가 통과한 매체와는 무관하다. 복사에서는, 1900년 Max Planck가 양자원리(quantum theory)에서 제안한 것과 같이, 전자기복사를 광자

(photon)나 양자(quantum)라고 하는 불연속적인 에너지 묶음이 전파되는 것이라고 생각하면 도움이 된다.

이상적인 표면으로부터의 열복사가 일어날 경우 방출 가능한 최대 속은 그 표면 온도의 네제곱에 비례한다. 이를 스테판-볼츠만(Stefan-Boltzmann) 법칙이라 하고 식( 2-7 )과 같이 나타낸다.

$$E = \epsilon \sigma T_s^4 \quad ( 2-7 )$$

- $\epsilon$  : 방사율(emissivity), 복사 물성치,  $0 \leq \epsilon \leq 1$
- $T_s$  : 표면의 절대온도, K

여기서,  $\sigma$ 는 스테판-볼츠만(Stefan-Boltzmann) 상수이며  $5.67 \times 10^{-8}$  이고 단위는  $W/m^2K^4$ ,  $T_s$ 는 표면의 절대온도로 단위는  $K$  또는  $R$ 이다.

복사열이 완전히 흡수되는 흑체(black body)의 복사강도를 기술한 플랑크(Planck) 법칙에 의해 물체로부터 방출되는 전체에너지는 스테판-볼츠만 법칙으로부터 흡수율 1이므로( $\epsilon = 1$ ), 흑체에 대해 식( 2-8 )과 같다.

$$E_b = \sigma T^4 (W/m^2) \quad ( 2-8 )$$

상기 식에서 적외선에너지는 전자기적 스펙트럼의 일부로써 가시광선과 유사하게 거동하며 광속으로 우주공간을 달리고 반사, 굴절, 흡수, 방사될 수 있다. 빛의 흡수는 다음 법칙에 따른다. 즉, 입사광의 강도를  $I_0$ , 투과광의 강도를  $I$  라 하면,  $I = I_0 e^{-\alpha x}$  이다. 여기서  $x$ 는 통과한 두께,  $\alpha$ 는 감약계수이다. 그러나  $N_\alpha$ 는 같은 물질이라도 빛의 파장에 따라 다른 색이 생기게 된다. 빛의 굴절률은 일반적으로 파장의 함수로써 무한대의 파장에 대한 굴절률  $n_\infty$ 는 그 물질의 유전율  $\epsilon$ 의 제곱근과 같다. 즉,  $n_\infty^2 = \epsilon$ 이다. 물체에 입사한 복사에너지는 빛의 성질에 의해 물체로부터 3가지 형태로 나타난다. 조사된 복사열(incident flux :  $\Phi_i$ )은 일부 흡수(absorption)가 될 수도 있고, 일부는 물체에 의해 반사(reflection)되고, 일

부는 물체를 투과(transmission)할 수도 있다. 일반적인 경우  $\Phi_i$ 의 흡수, 반사, 투과는 파장( $\lambda$ ), 방향( $\phi, \theta$ ), 온도(T)에 의존한다. 이러한 에너지는 에너지 보존의 법칙에 따라 식( 2-9 )와 같이 유도된다.

$$\Phi_i = \Phi'_r + \Phi_a + \Phi_t \quad ( 2-9 )$$

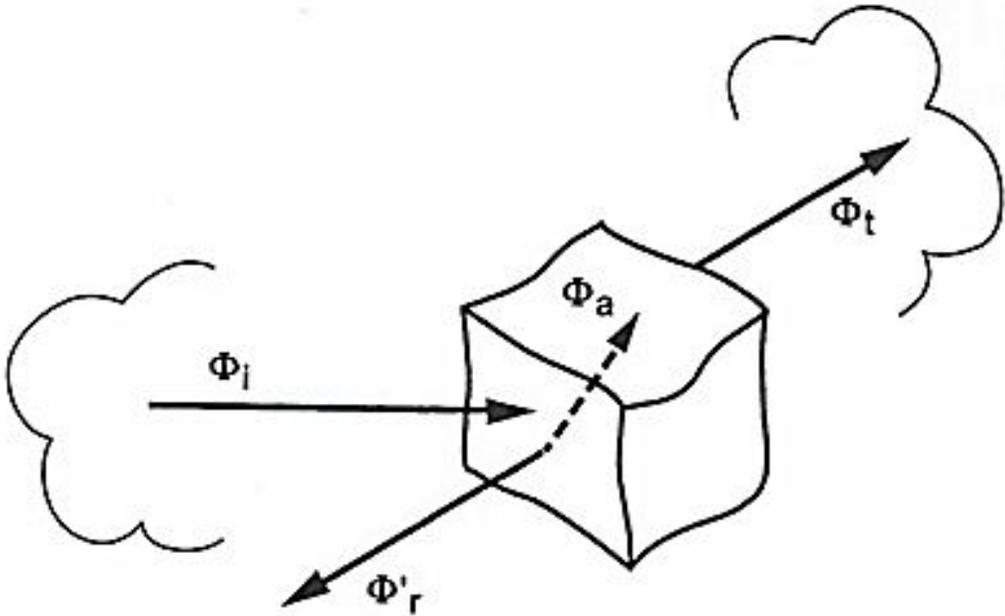


Fig. 2-9 The flux incident  $\Phi_i$  is equal to the flux reflected  $\Phi'_r$ , absorbed  $\Phi_a$ , and transmitted  $\Phi_t$

상기 식( 2-9 )의 물체에 입사한 복사 에너지로부터, 흑체로부터 방사된 에너지는  $W_{bb}$ 이고 이상적인 흑체 방사체라는 것은 실제로 존재하지 않으며 실제 방사된 에너지가  $W_{abj}$ 이면, 물체의 방사율  $\epsilon$ 는 다음과 같다.

$$\epsilon = \frac{W_{abj}}{W_{bb}}, \text{ 여기서 } 0 \leq \epsilon \leq 1 \quad ( 2-10 )$$

식( 2-10 )으로부터 적외선 열화상에 적용되는 방사율은 적외선 카메라에 의해 사용되어지는 적외선 파장간격에서 발생하는  $\epsilon_\lambda$ 의 평균값으로 서로 다른 물체의 온도에 따라 적절한 방사율의 예측이 중요하다.

파장 흑체 방사력은 절대온도  $T$ 에서 단위시간당, 단위면적당 그리고 단위 파장  $\lambda$ 에서 흑체가 방사하는 복사이다. 흑체 방사도  $L_{\lambda,b}$ 는 1901년 Max plank에 의하여 양자이론과 관련하여 개발되었다.

$$L_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{2hc_0^2}{\lambda^5 [\exp(hc/\lambda KT) - 1]} \text{ W m}^2 \mu\text{m}^{-1} \text{ sr}^{-1} \quad ( 2-11 )$$

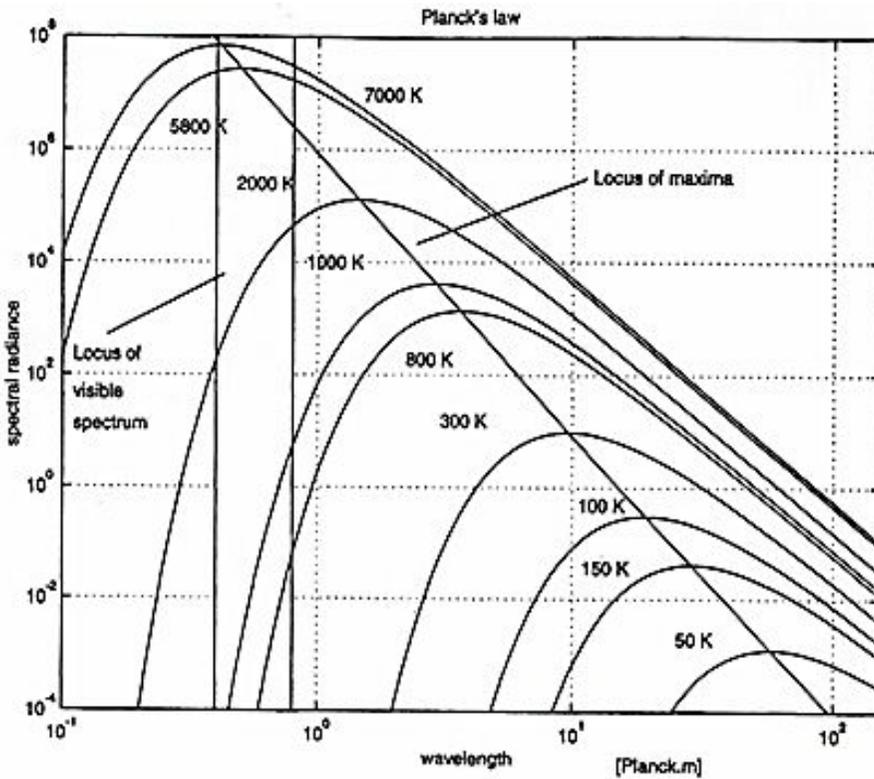


Fig. 2-10 Spectral radiance of a blackbody(Planck's law)

Fig. 2-10에서 보면 주어진 온도에서 파장에 따라 방사가 달라짐을 알 수 있다. 식( 2-11 )에서 첫 번째와 두 번째 복사 상수를 써서 나타내면 다음과 같다.

$$L_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 [\exp(c_2/\lambda T) - 1]} \quad W \, m^2 \, \mu m^{-1} \, sr^{-1} \quad ( 2-12 )$$

여기서,  $C_1 = 2\pi hc_0^2 = 3.742 \times 10^8 W \cdot \mu m^4/m^2$ ,  $C_2 = hc_0/K = 1.439 \times 10^4 \mu m \times K$  이다.

앞서 언급한 바와 같이 흑체(blackbody)는 완벽한 방사체이다. 흑체는 투과율이 제로(0)이며 반사율 또한 제로(0)이다. 키리히호프 법칙(Kirchhoff's law)에 의하면, 이러한 흑체의 방사율은 1이다. 사실 흑체는 가시광선 방사에 대해 처음 정의되었다. 가시광선 상에서는 어떤 물체가 빛을 전혀 반사하지도 투과하지도 않을 경우 검은색으로 보이게 된다. 따라서 이러한 물체가 흑체라고 불리게 되었다. 회색체(graybody)는 모든 파장에 걸쳐 1.0 이하의 일정한 방사율을 나타내는 물체를 지칭한다. 실물(realbody)은 파장에 따라 방사율이 달라지는 물체를 지칭한다.

적외선 열화상 카메라는 특정 파장에서 발생하는 적외선 방사 에너지를 감지한다. 온도값을 얻기 위해 앞에서 설명한 결과치를 흑체를 사용하여 만들어낸 교정표와 비교한다. 이 경우 대상물체가 회색체라는 가정이 포함되어 있다. 대부분의 경우 이 가정은 사실이고 의미 있는 측정치에 충분히 가까운 값을 구할 수 있다. 불투명한 물체의 경우 방사율과 반사율은 상호 보완되는 것으로 방사율이 높다는 것은 반사율이 낮다는 말이고 그 반대도 마찬가지다. 적외선 방사율은 열역학적으로 열역학 제1법칙인 에너지 보존의 법칙에 의해 다음과 같다. 흡수율( $\alpha$ )과 방사율( $\epsilon$ )의 값은 같으며 식( 2-13 )에서 흡수되는 적외선  $\alpha$ (흡수율),  $\epsilon$ (방사율), 투과하는 적외선  $\tau$ (투과율), 반사되는 적외선을  $\rho$ (반사율)라고 하면 물체에 입사되는 적외선 성분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha + \tau + \rho = 1 \quad (\alpha \geq 0, \rho \cdot \tau \leq 1) \quad ( 2-13 )$$

불투명체로 물체가 적외선을 투과하지 않을 때  $\tau = 0$ 이 되고 방정식이 식( 2-11 )과 같이 간단히 나타낼 수 있게 되며,  $\alpha = 1 - \rho$ 에서 반사율을 알면 흡수율도 알

수 있다.

$$\alpha + \rho = 1 \quad ( 2-14 )$$

식( 2-14 )는 매우 중요한 사실을 보여준다. 앞서 말한 것과 같이 간단하게 말하면 높은 방사율은 낮은 반사율을 의미한다. 반대로, 높은 반사율은 낮은 방사율을 의미한다. 열화상 카메라 사용자들은 방사율이 가능한 최대로 높은 것을 선호한다. 이는 목표 대상체로부터 반사되는 방사에너지의 대부분을 가장 정확하게 읽을 수 있기 때문이다. 하지만 방사율이 낮아질 경우 측정오차는 점점 커지게 된다.

계산식에 의하면 목표물의 방사율이 0.5 이하로 내려갈 경우 측정오차는 수용할 수 없을 정도로 높아지게 된다. 다양한 방사율(emissivity)표가 있지만 방사율은 추측하기가 쉽지 않다. 물체의 형상에 따라서도 방사율이 달라진다. 반투명체의 경우 두께에 따라 방사율이 달라진다. 이외에도 방사율에 영향을 주는 요소들로는 보는 각도, 파장 및 온도 등이 있다. 방사율의 파장에 따른 차이는 적외선 열화상 카메라의 종류에 따라 같은 물체에 대해 서로 다른 방사율을 나타낼 수 있다는 의미이다. 사실, 이 경우 두 가지 모두 다 옳은 값으로 볼 수 있다.

일반적으로, 절연체(전기적 비전도체)는 0.8 ~ 0.95의 상대적으로 높은 방사율을 나타낸다. 도색이 잘된 금속도 포함된다. 산화되지 않은 금속의 경우 약 0.3 이하의 방사율을 나타내므로 측정 자체를 하지 말아야 한다. 산화된 금속의 경우 0.5 ~ 0.9의 방사율을 나타내는데 그 값의 범위가 너무 커서 측정에 큰 문제점으로 부각된다.

산화된 정도는 물체의 방사율에 중요한 요인이 된다. 산화의 정도가 높을수록 방사율이 높아진다. 불투명한 물체의 경우, 방사율 및 주변(반사된)온도를 알고 있는 경우라면 적외선 열화상 카메라를 이용한 온도 측정값이 수 % 이내로 정밀한 값을 얻을 수 있다. 올바른 온도를 측정하기 위해서는 적외선 열화상 카메라는 물체로부터 방사되는 에너지로 인한 부분만을 추출해 낼 수 있어야 한다. 최근의 적외선 열화상 카메라는 이러한 기능을 가지고 있다. 반사에 의한 오차부분을 제거한 후 물체의 방사율에 따라 그 값을 변경 처리한다.

적외선 열화상 카메라는 외부의 광원에서부터 대상 물체에 반사 되어진 적외선 파장을 검출하여 Stefan-Boltzmann Law에 의한 온도와 파장의 관계식을 이용하여

적외선 detector로부터 검출된 적외선 파장을 온도의 함수로 나타내어 온도의 고저를 화상으로 보여주는 것이다.

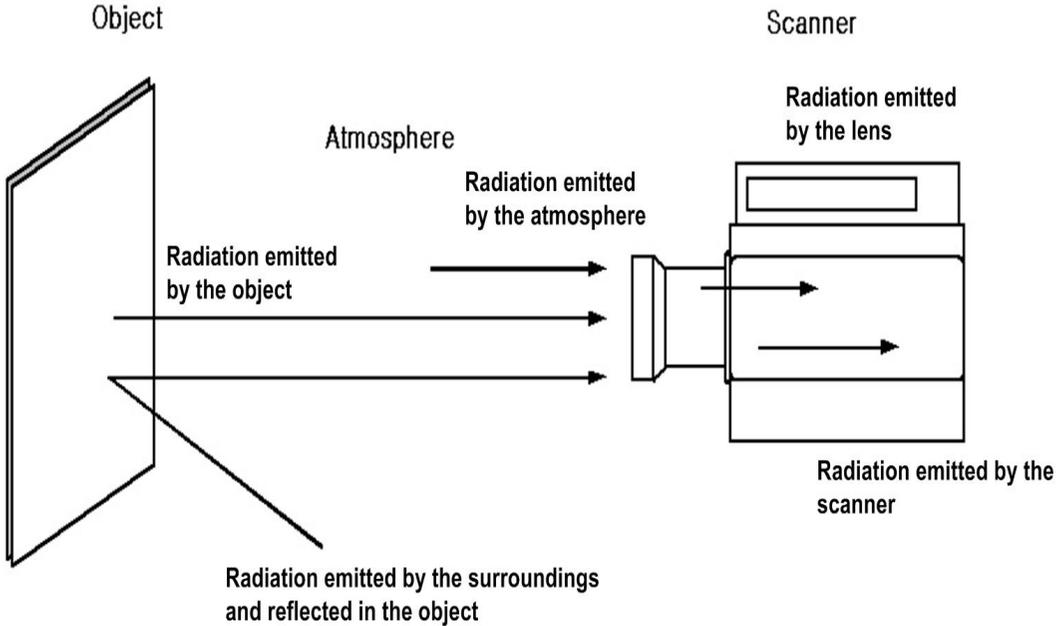


Fig. 2-11 Radiation contributions to the general measurement situation

대기와 물체 방사율에 영향을 미치는 보정은 열상에 존재하는 부수적인 방사에너지와 대기에 의해 감쇄된 피사체의 방사에너지뿐만 아니라 주위로부터의 방사에너지, 즉 대기 자체에서 방사된 방사에너지와 대기에 의한 감쇄와 물체에서 반사되어진 방사에너지로 존재한다. 피사체 방사에너지 강도는 존재하지 않는 완전한 흑체 방사율의 함수와 같으며, 열 측정 공식은 식( 2-15 )에서와 같이 표현된다. 여기에서 첫 번째 항은 피사체의 방사, 두 번째 항은 주위에서 반사된 방사, 세 번째 항은 대기에서의 방사를 나타내고 있다.

$$I_m = I(T_{obj}) \times \tau \times \epsilon + \tau(1 - \epsilon) \times I(T_{amb}) + (1 - \tau) \times I(T_{atm}) \quad ( 2-15 )$$

### 제 3 절 적외선 열화상 탐상 기법

적외선 열화상 비파괴검사는 2가지의 다른 접근법인 수동적 방법(Passive method)과 능동적 방법(Active method)으로 크게 구분할 수 있다. 능동 서모그래피는 외부 가열이나 냉각 등에 의해 열 유동이 생산되어진다. 이러한 열 유동에 의해 일시적 또는 지속적인 자극에 의해 표면의 온도 패턴을 분석함으로써 내부 결함까지 측정할 수 있다.

#### 1. 수동적 방법(Passive method)

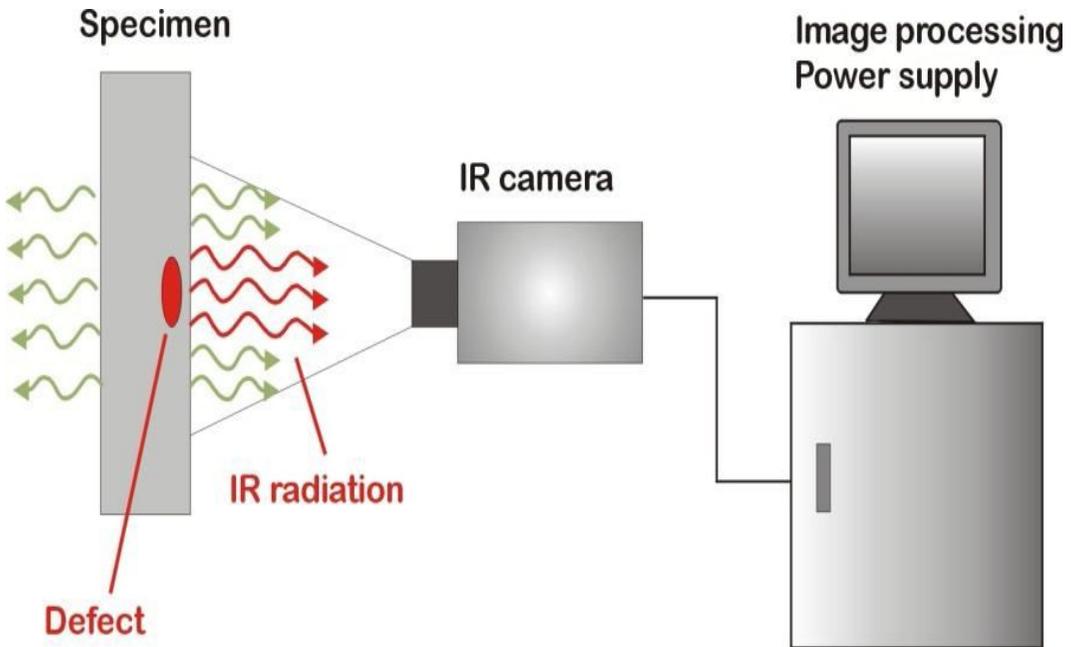


Fig. 2-12 Passive method (jenoptik ag)

Fig. 2-12의 수동 기법은 가열이나 냉각이 적용되지 않고, 측정 대상으로부터 자연스럽게 방사되고 있는 적외선 에너지를 검출하는 일반적인 측정방법이다. 수동적 열화상 기법은 일반적으로 온도 패턴을 기초로 산업 공정 및 제도 단계에서의 평가 및 모니터에 적용된다.

수동적인 방법으로의 결함탐지는 검사에 앞서 온도가 환경에 따라 일정하다. 따라서 시험 대상체는 결함 부위에서 기록할만한 온도를 제공하기 위해 가열되거나 냉각되어야 한다. 이 방법은 제어할 수 없는 에너지(태양)와 상호작용으로 대상체가 방사하는 적외선 에너지를 측정하여 분석하는 기법으로 적외선을 방출하는 모든 물체에 해당하는 사항으로 그 물체가 방출하는 고유의 적외선량을 감지하여 화상으로 나타낸다. 또한, 수동적 방법은 물체 고유의 상태를 파악하는데 사용되는 가장 기본적인 방법으로 측정 대상체의 정량적인 미시적 정밀도를 요구하는 분야보다는 거시적인 측정법에 속한다.

## 2. 능동적 방법(Active method)

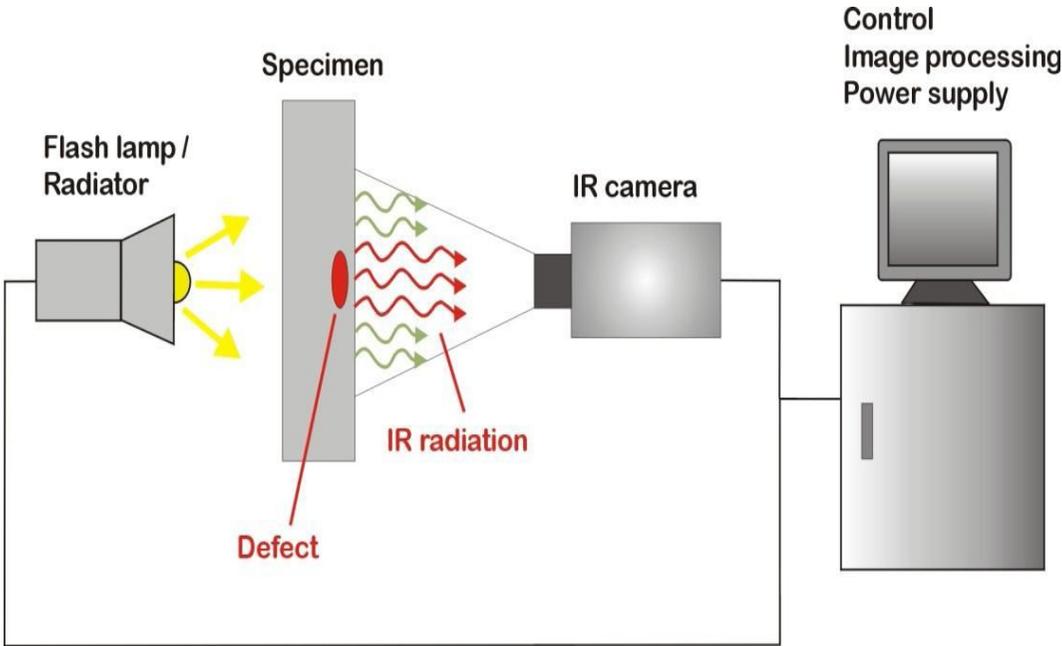


Fig. 2-13 Active method (jenoptik ag)

Fig. 2-13의 능동적 검사기법(Active method)은 수동적 검사기법과 달리 검사체 고유의 적외선량에 의존하지 않고 제어 가능한 에너지를 입사하고 그 반응으로 검사체가 방사하는 적외선 에너지를 측정하여 분석하는 기법이다. 이러한 검사기법은 물체표면 방사율, 주변온도, 측정각도, 풍속, 거리, 형상에 따른 영향을 제어하여

검사자가 얻고자 하는 결과를 정밀하게 얻을 수 있는 장점이 있다. 능동형 검사기법으로는 대표적으로 광적외선, 진동, 마이크로웨이브, 초음파, 와전류 등 에너지의 입사 종류에 따른 분류와 제어 방법에 따른 분류로 나뉠 수 있는데 이러한 검사기법을 통하여 검사체로부터 얻을 수 있는 결과 값이 더욱 정밀해지는 효과가 있다. 또한, 전류를 흘리는 방법이나 전류의 ON/OFF를 궁리하여 고장 위치를 알기 쉽게 하는 방법도 이루어지고 있다. 액티브(능동)방식은 일반적으로 측정 대상물에는 전혀 열이 가해지지 않아 온도 분포가 없거나 온도 또는 온도차가 매우 미소한 경우 외부로부터 열을 가함으로써 측정 대상물의 표면의 미세 결함(크랙 등)이나 내부 결함(내부 크랙이나 보이드 = 공극)을 온도 분포로써 부상시켜 검출하는 방법이다. <sup>(12)~(24)</sup>

# 제 3 장 제안된 LED 조명 시스템 최적설계 및 건전성 평가

## 제 1 절 제안된 LED 조명 시스템 설계 및 개발

### 1 . 1.5kW 급 LED 전원 모듈 설계

기존 LED 조명등에 정전압 방식만이 사용되어 광출력이 균일하지 않고 흐려지거나 밝아졌다는 반복하게 되는 문제점이 발생하였고, 전압구동방식에 따른 전력손실 발생 및 부하전류 편차에 의한 일정 광출력 제어에 어려움 문제점이 있었다. 이에 Fig. 3-1과 같이 LED 등기구로의 안정적인 DC전류 공급을 위해 정전류 제어방식으로 설계하여 안정적인 전류를 공급하였다.

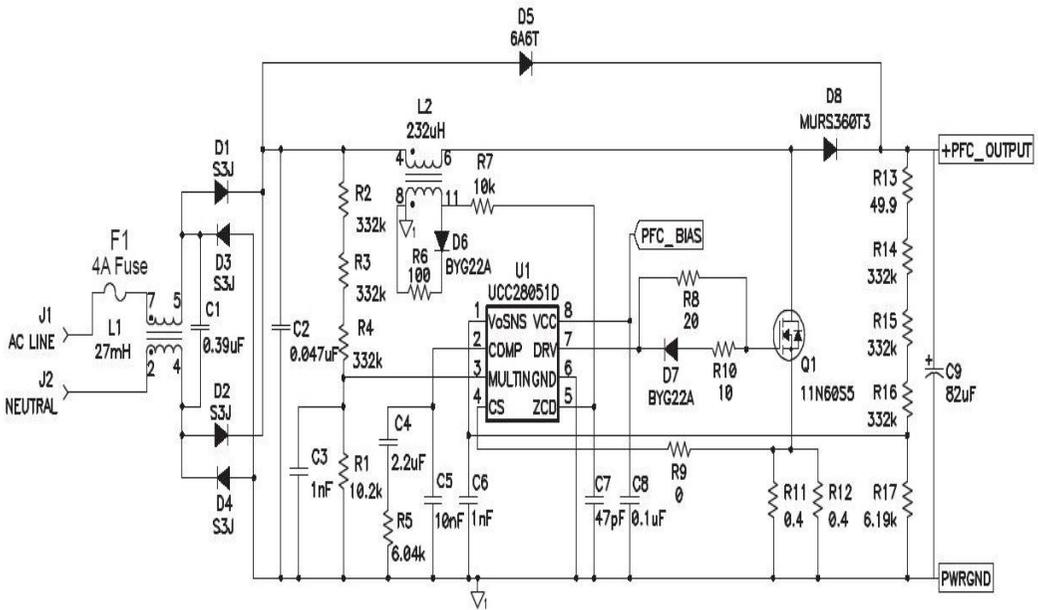


Fig. 3-1 Power supply module for LED module (Generic)

정전류원 회로의 특정 바이어스 전류값을 이용하여 부하단의 트랜지스터 게이트 단자를 제어함으로써 LED의 순방향 전류를 직접 제어하여 정전류로 공급해 전류의 떨림으로 인해 존재하던 손실을 줄여 전력 사용이 절감된다. 또한 Driver IC 내부 정전류 회로를 사용하고, 구동 전류의 편차를 최소화하여 구동 전류에 의한 오류가 거의 없었다. Fig. 3-2는 LED 구동회로 Block Diagram이다.

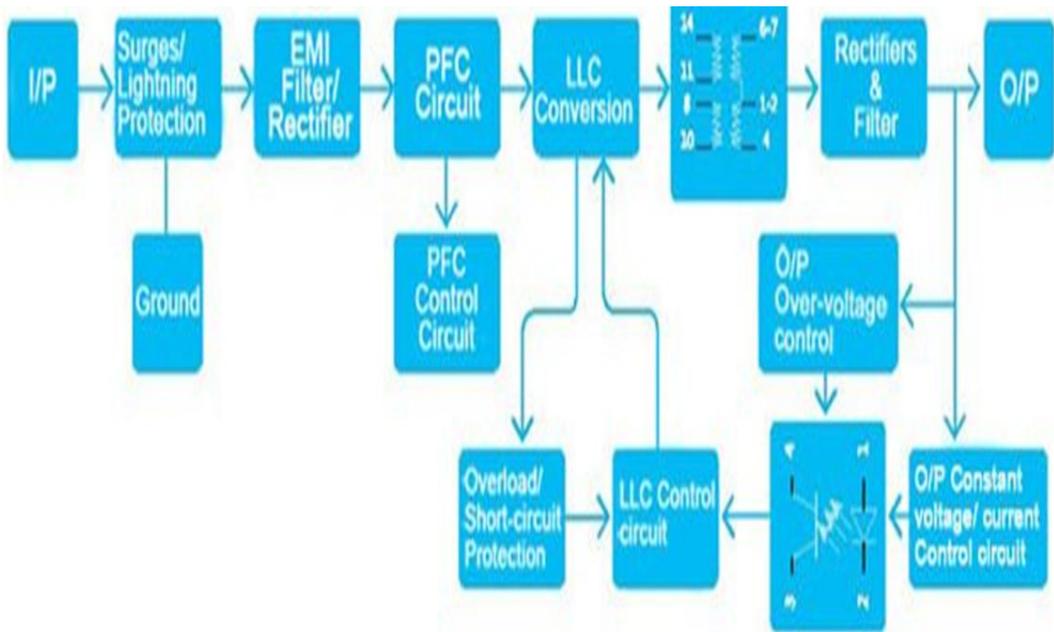
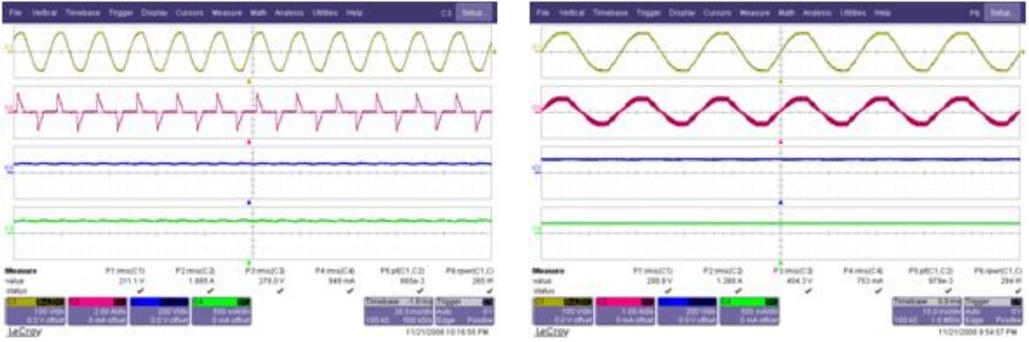


Fig. 3-2 LED Driver Circuit Block Diagram

LED 전원공급 모듈의 고효율을 위해 고역률 전원 모듈 설계가 Key-point이며, 이는 PFC IC를 이용한 역률 보정을 통해 전력 효율 개선을 향상 시키고, AC-DC부의 역률을 보정하여 안정된 전류를 공급, 전력소비량을 줄이고 불필요하게 낭비되는 전류가 열로 전환되어 온도가 상승되는 것을 막을 수 있다. 또한, 온도 상승을 낮추면 그에 따라 소음과 전자파도 동시 줄일 수 있는 이점이 있다. 아래 Fig. 3-3은 PFC 미적용과 PFC 적용을 나타냈다.



(a) PFC does not apply

(b) PFC apply

Fig. 3-3 PFC appearance

Fig. 3-4는 PFC 회로 개념도이다. 입력되는 전류를 정전류 모드 제어방식으로 입력전류가 정현파가 되도록 스위치의 시비율을 시간에 따라 가변 제어하는 방식으로 설계하였다. 입력전류 및 전압을 검출하여 입력전류가 입력전압에 따라가는 제어루프를 따로 두고, 출력전압 Regulation을 구성하였다.

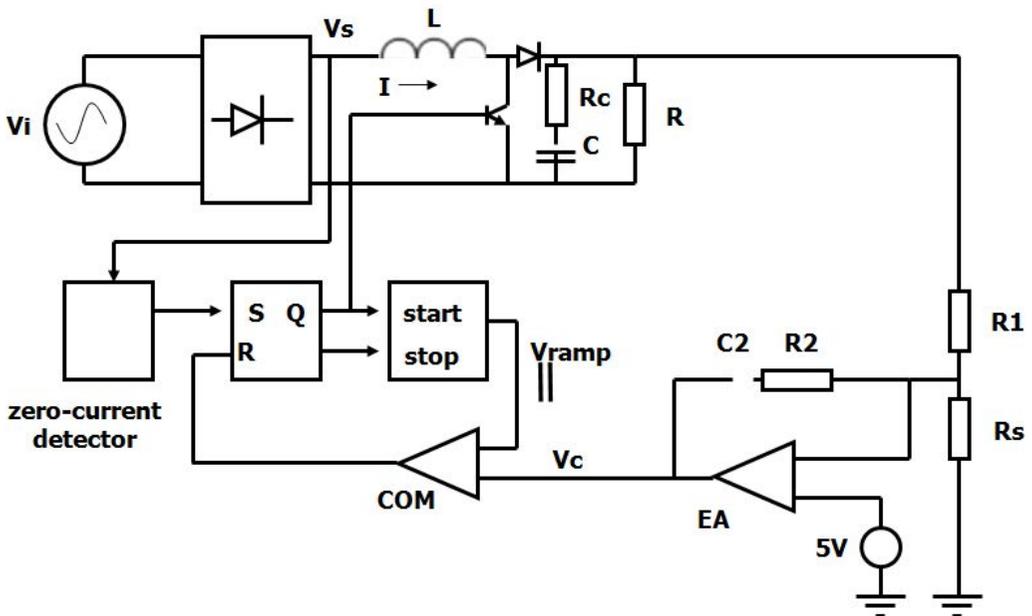


Fig. 3-4 PFC circuit schematic diagram

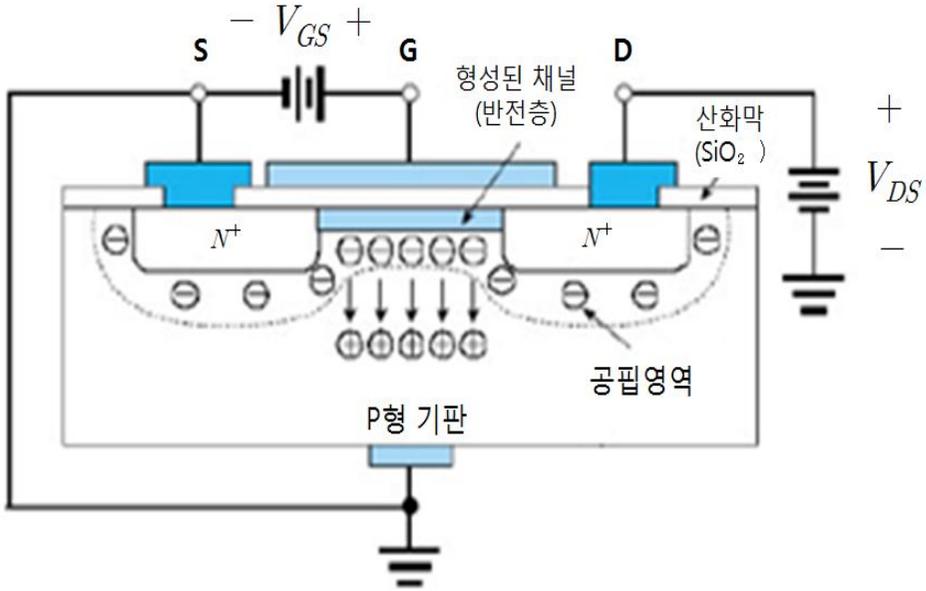


Fig. 3-5 1.5kW-class power supply module control method

Fig. 3-5는 1.5kW 급 전원 모듈 제어 방식을 나타낸다. 1.5kW 급 전원 모듈은 반도체 FET를 사용하여 램프에 공급되는 전류량을 조절하여 밝기를 제어한다. 1차 전원 공급장치를 이용하고, 2차 출력을 제어하는 방식으로 0 ~ 100%까지 10단계로 나눠 밝기를 제어한다. 안정적인 동작을 위해 시스템 전체의 방열을 고려하는게 중요하다. Fig. 3-6은 120W 급 LED 전원공급모듈 회로 간략도를 나타내었다.

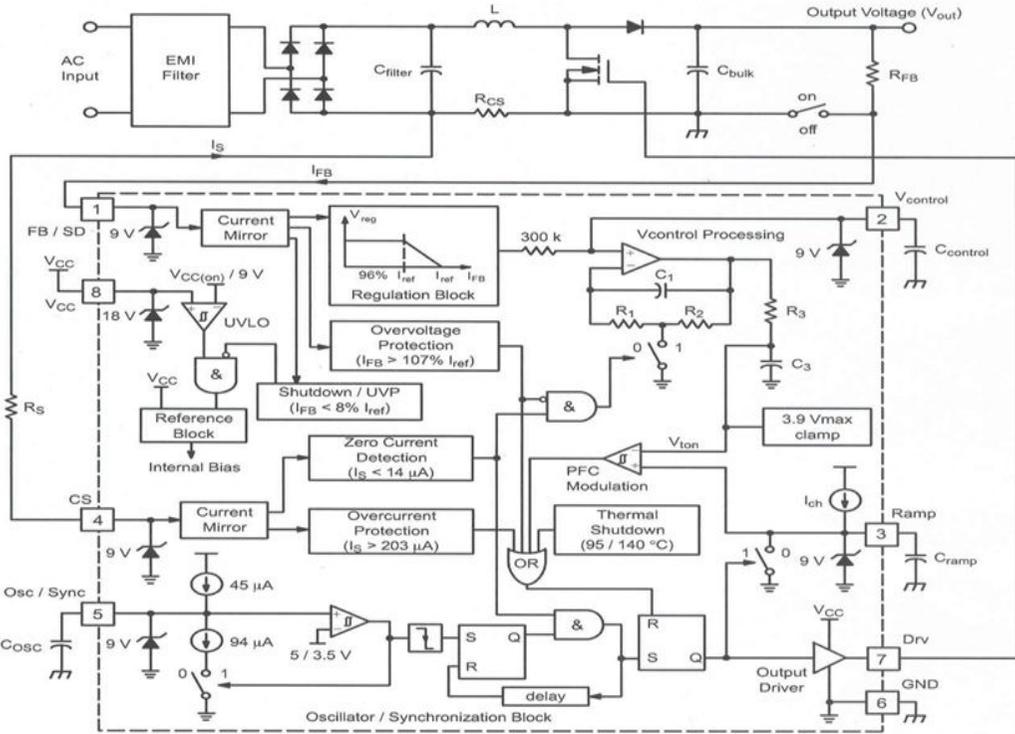


Fig. 3-6 120W-class LED power supply module circuit diagram

## 2 . 120W급 LED 조명등 모듈 설계

### 가. LED 칩 1EA 발열량

LED칩은 발열량이 높기 때문에 효과적인 방열대책의 마련이 필요하다. LED칩의 온도가 지나치게 높아질 경우 칩 자체, 또는 패키징 수지가 열화될 가능성이 있기 때문이다.

120W 급 LED 조명등 모듈을 설계하기 앞서 LED 칩 1개(EA) 발열량(heating value)을 먼저 알아보았다. 실험에 사용된 LED 칩의 정격전압은 2.8[V] ~ 3.4[V]이다. LED 칩 1개에 3.2[V] 전압을 주고 적외선 열화상 카메라를 이용하여 30분간 온도를 측정하였다. Fig. 3-7은 LED 칩 1EA이고, Fig. 3-8은 LED 칩 1EA의 열화상 카메라를 이용해 온도를 측정하는 모습이다. 실험 시 실내 온도는 18°C를 유지하였다.

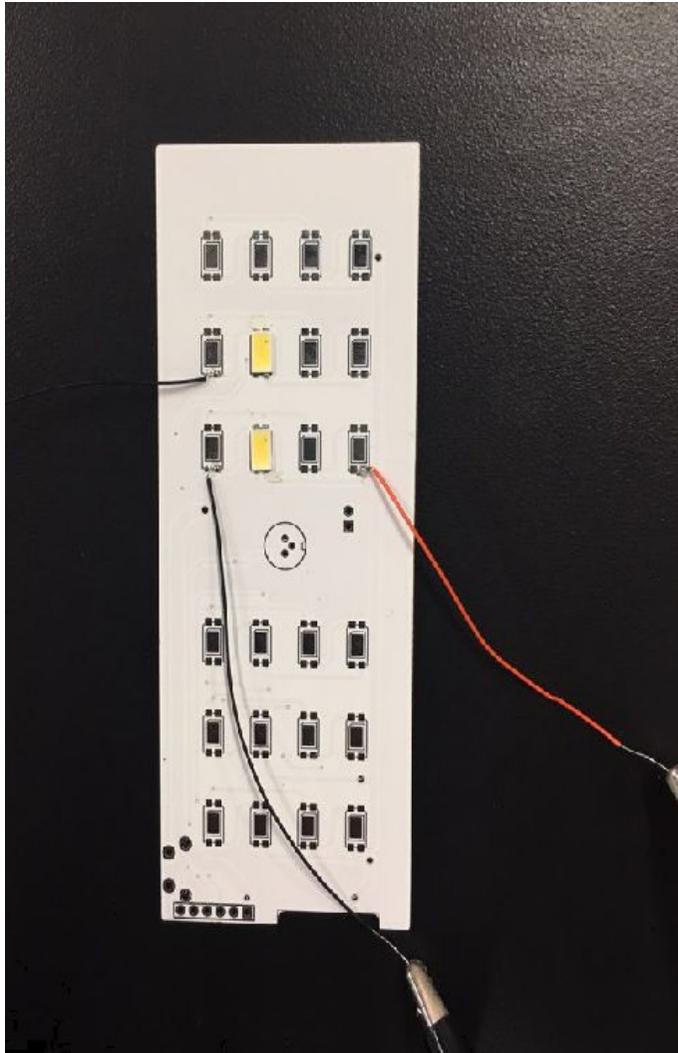


Fig. 3-7 LED chip 1EA



Fig. 3-8 LED chip 1EA for thermal imaging camera temperature measurement

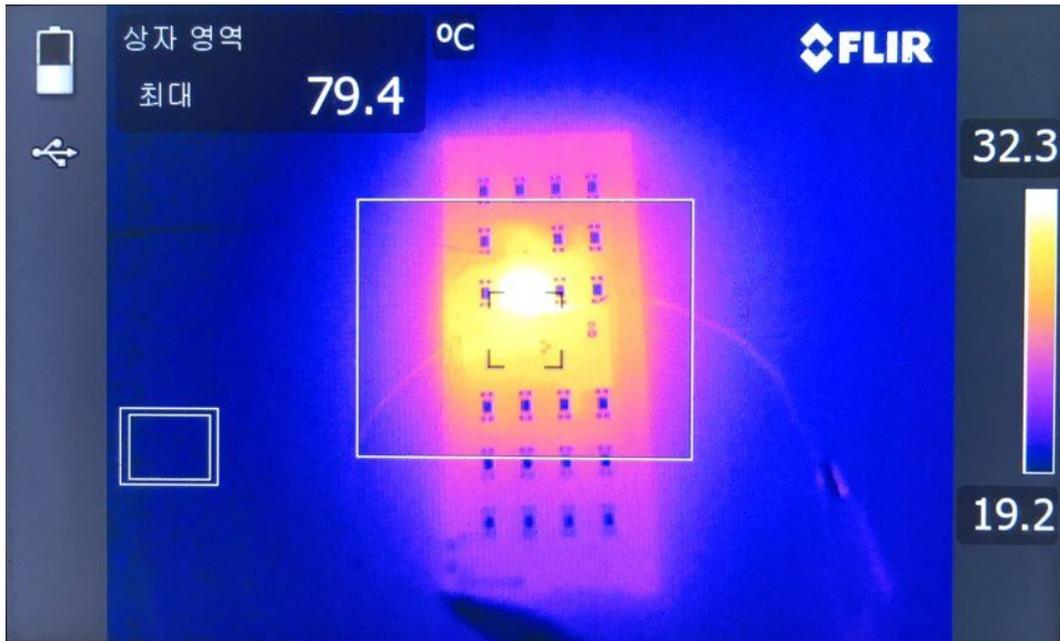


Fig. 3-9 LED chip 1EA for thermal imaging

Fig. 3-9는 LED 칩 1EA 열화상 모습이고, Fig. 3-10은 LED 칩 1EA 발열부를 중심으로 가로 스플라인(Spline) 그래프를 얻었다. 온도 측정 결과 LED 칩 발열부에서 온도가 약 90℃까지 올라가는 걸 확인하였다. 본 실험에 목적은 LED 칩 1EA의 최고 온도를 확인하여, 120W급 LED 조명 모듈 최적설계를 위함이다.

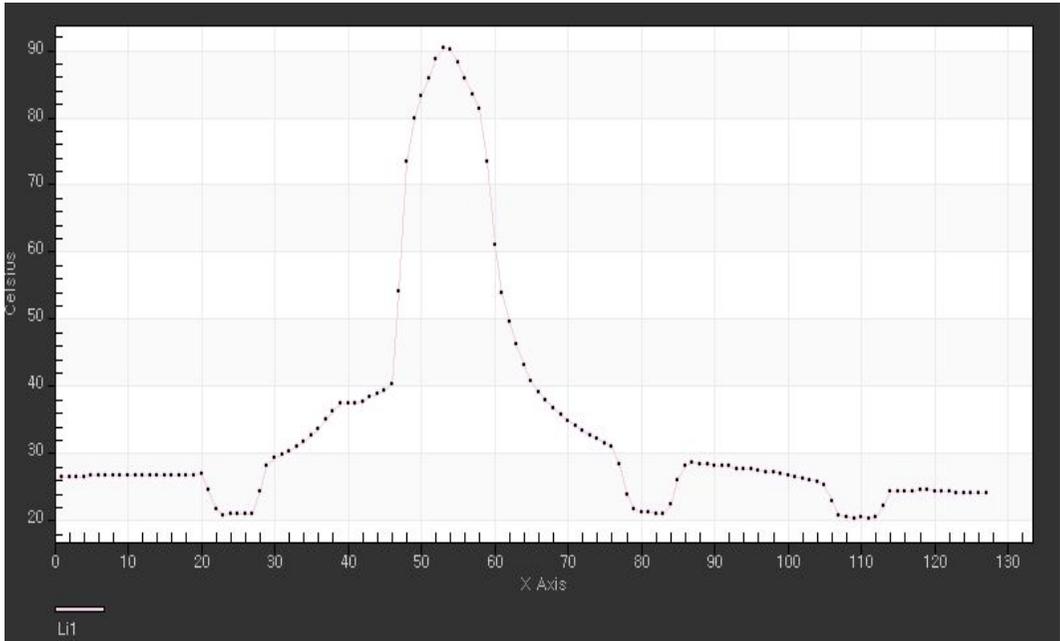


Fig. 3-10 LED chip 1EA for thermal imaging temperature graph (Spline)

### 나. 120W 급 LED 조명 모듈 설계

120W 급 LED 조명등 모듈 최적설계를 위해 식( 3-1 )을 통해 120W 급 최적의 LED 조명이 되려면 98EA LED 칩이 필요함을 알 수 있다.

$$\begin{aligned}
 1.5 W \times 98 &= 147 W \times 0.8 && ( 3-1 ) \\
 &= 117.6 W
 \end{aligned}$$

식( 3-1 )에서 0.8을 곱하는 이유는 안전율을 감안해 소비전력을 20% 낮추어 설계

하였다. 계산결과 117.6W가 나와 대략 120W 급 LED 조명 모듈을 설계하였다.

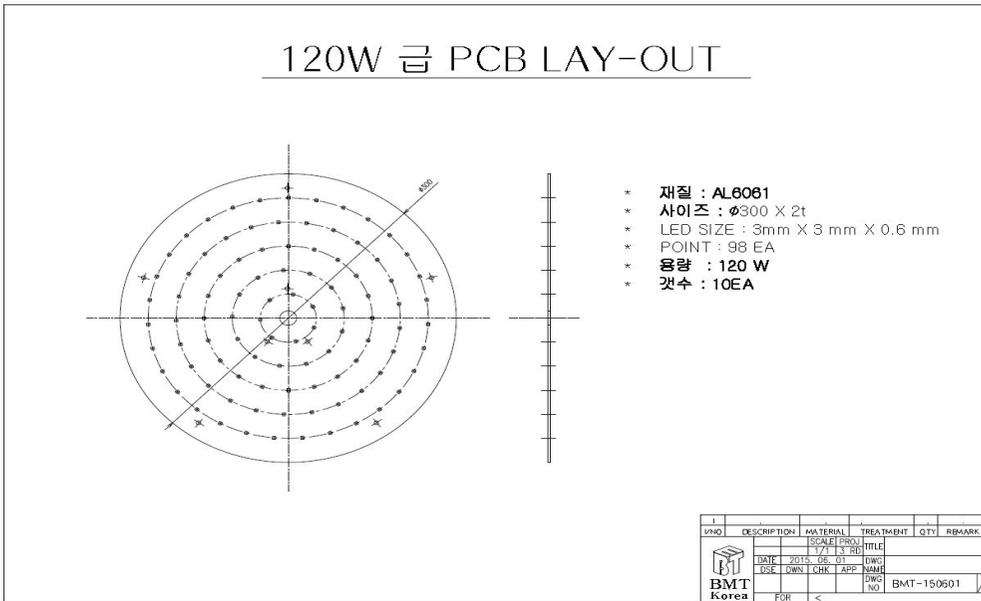
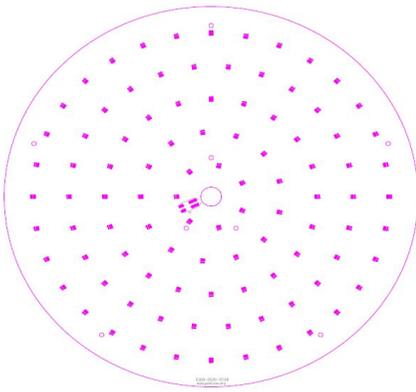
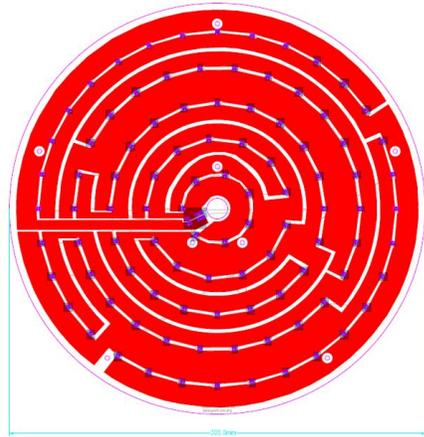


Fig. 3-11 120W-class PCB Layout

고출력 LED 모듈은 COB(Chip-On-Board)형태로 한 개의 모듈에 여러 개에서 수십 개의 LED 칩을 패키징한 형태로 제작된다. Fig. 3-11은 120W 급 LED PCB Lay-out 이다. 120W 급 PCB 재질은 AL6061이라고 불리는 소재이며, 사이즈는  $\Phi 300 \times 2t$ , LED 사이즈는  $3mm \times 3mm \times 0.6mm$  이다. LED Chip Point는 98EA이고 용량은 120W 급이다.



(a) LED 98EA PCB before



(b) LED 98EA PCB after

Fig. 3-12 LED 98EA PCB before and after

Fig. 3-12는 LED 98EA PCB(Printed Circuit Board, 인쇄 회로 기판) 전과 후의 모습이다. PCB는 회로 설계를 근거로 회로부품을 접속하는 전기배선을 배선 도형으로 표현하여 이에 합당한 방법을 통하여 절연 상에 전기도체를 재현하는 것이다. 또한 여러 개의 Component를 장착해서 연속하여 동작할 수 있게 회로를 동선으로 만들어 개별 Component끼리 연결시켜 놓은 것이다. Fig. 3-13과 같이 PCB를 이용한 120W 급 LED 조명 모듈을 제작하였다.

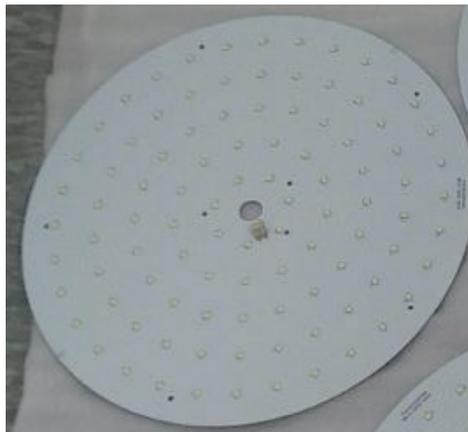


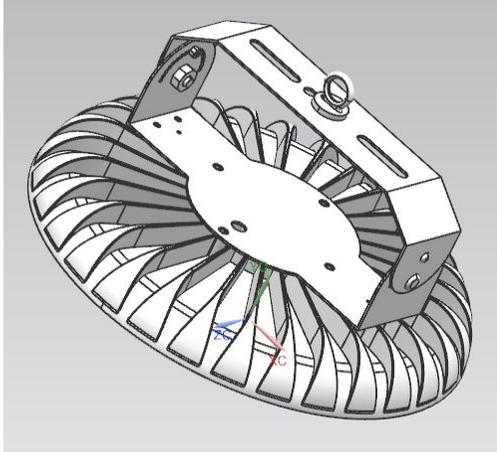
Fig. 3-13 120W LED lighting module

### 3 . Heat-Sink 최적설계

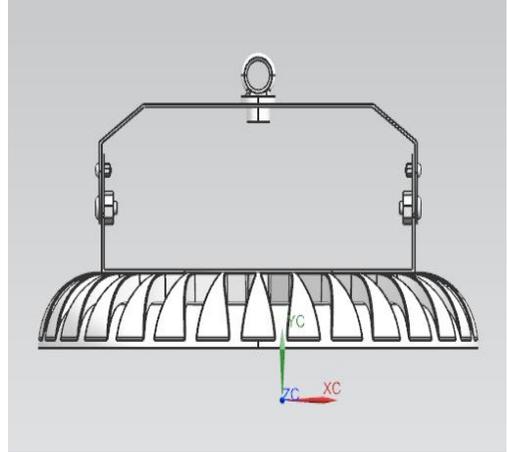
LED 모듈은 기존 조명들과 달리 인가에너지 대비 70~85%가 열에너지로 전환되므로, 사용 중에 내부에서 발생하는 열로 인해 LED칩의 온도가 상승하여 발광효율이 떨어지고 에너지 소모가 커지며, LED 칩과 주변 회로들의 수명이 짧아지는 문제가 있다. 따라서 모듈 내부에서 발생하는 열을 효과적으로 배출하기 위한 방열기술을 개발하는 것이 LED칩 제조분야의 주요과제로 부상하고 있다. 또한 LED 칩 내부에서 발생하는 열을 얼마만큼 빨리, 효율적으로 방열시키는가에 따라 LED의 광 효율과 수명이 좌우되므로, 칩 내부의 방열에 따른 열을 효율적으로 배출하고, 방열시키기 위한 다양한 형태의 방열기술에 대한 연구가 필요하다.

LED 모듈은 기판위에 칩이 올라가고 PCB(Printed Circuit Board)가 히트싱크에 접착되어 여러 층으로 이루어지는 구조이다. LED 모듈의 효율을 100으로 가정할 때 등기구의 효율은 50%정도 밖에 되지 않는다. 따라서 광원인 모듈의 온도 상승으로 10~20%의 효율이 상실되기 때문에 모듈로부터 빠르게 열을 빼낼 수 있는 열전도성 소재를 사용하고 방열판 또는 조명 하우징으로 열을 전달하여 방열시키는 것이 필요하다.

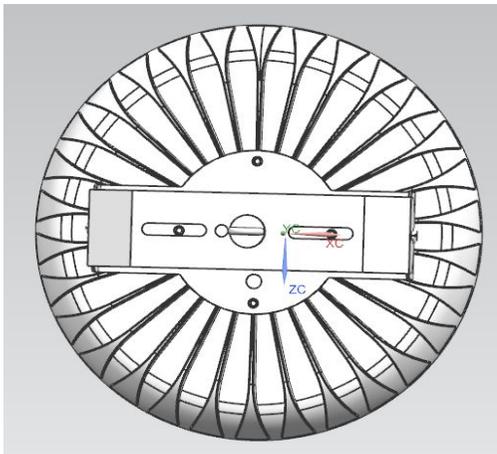
LED 모듈을 사용할 때 방열하는 모듈의 사용 효율을 높이기 위해 다양한 형태의 방열판을 장착되게 되고, 모듈의 방열부와 방열판 사이의 열 저항을 줄이기 위해서 열전달물질(Thermal Interface Material, TIM)인 열전도 그리스를 도포하고 조립하게 된다. 이때 다양한 종류의 열전도 그리스는 제조사에 따라 가격 및 열전도도가 다르다. 따라서 열전도 성능이 우수한 열전달물질을 사용하여 열 저항을 최소화시켜서 열전달을 향상시키는 것이 장치의 성능 및 수명 향상에 무엇보다 중요하며, 열전도성이 우수한 열전달물질이 요구된다.



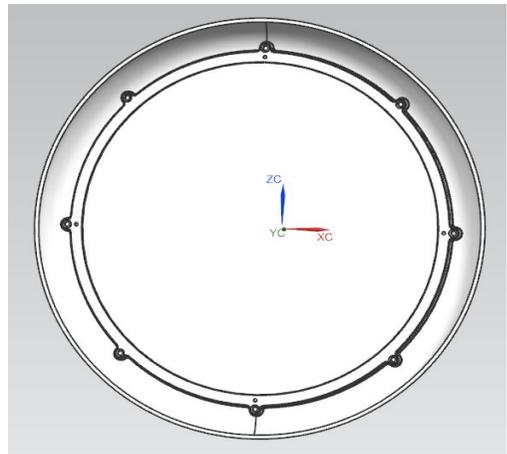
(a) Left side view



(b) Front view



(c) Ground plan



(d) Rear view

Fig. 3-14 Heat-Sink 3D drawings

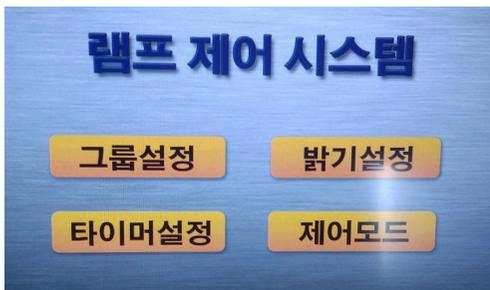
Fig. 3-14는 Heat-Sink 3D 도면으로 좌측면도, 정면도, 평면도, 후면도 등 다양한 각도에서 Heat-sink의 모습을 나타내었다. COB(Chip-on-Board) 타입의 고출력 LED 모듈의 방열을 위해서 알루미늄 재료의 방열판을 설계 및 제작하였다. 실제 설계한 제품은 Fig. 3-15와 같다.



Fig. 3-15 120W-class LED Heat-Sink

## 4 . GUI 및 원격제어 프로그램

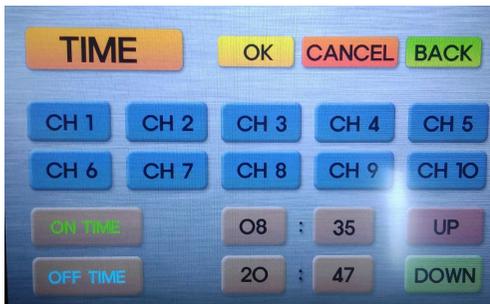
GUI(Graphical User Interface)는 프로그램의 접근성을 용이하게 하고 사용자가 혼동되지 않게 편하게 사용하는데 목적이 있다. LED 등기구와 컨버터를 분리시켜 각각 구역의 작업환경에 따른 각기 다른 조도시스템에 적용하였다. 역률보상 및 거리에 따른 가변된 파워를 주입하여 통합적이고, 안정적인 등기구를 설계하였다. 또한 고효율(역률 보상) 및 외부 낙뢰 보호회로 설계 및 노이즈 및 전자파 유입 차단 필터를 추가 설계하였다.



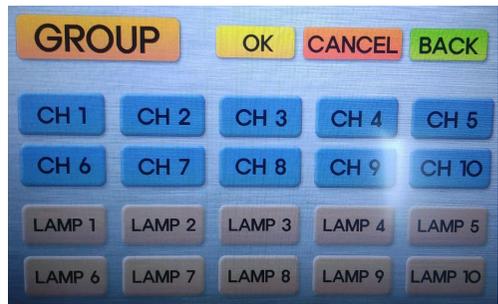
(a) Main



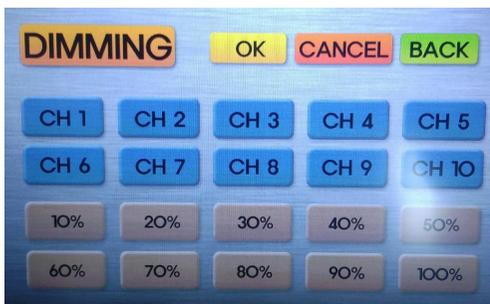
(b) SUB 1



(c) SUB 2



(d) SUB 3



(e) SUB 4



(f) Manual key

Fig. 3-16 GUI Configuration

Fig. 3-16은 GUI 구성을 나타낸 것으로 (a)는 조명 제어 시스템으로 메인화면을 나타낸다. 그룹설정, 밝기설정, 타이머설정, 제어모드 총 4가지로 구성되며 모든 항목을 설정할 수 있고 혹은 한가지 항목만 설정할 수 있다. (b)는 SUB 1으로 CH 1부터 CH 10까지 각각의 조명을 On/Off 제어가 가능하고, 디밍제어(0% ~ 100%)가 가능하며 1단계 12W부터 10단계 120W 제어가 가능하다. (c)는 SUB 2로 CH 1부터 CH 10까지 설정된 각 그룹별 시간설정이 가능하다. (d)는 SUB 3으로 각 채널당 1 ~ 10개까지 그룹설정이 가능하다. (e)는 SUB 4로 각 그룹당 디밍 설정이 가능하다. (f)는 매뉴얼키로 (a) ~ (e)의 터치동작 불응시 매뉴얼로 설정이 가능하다.

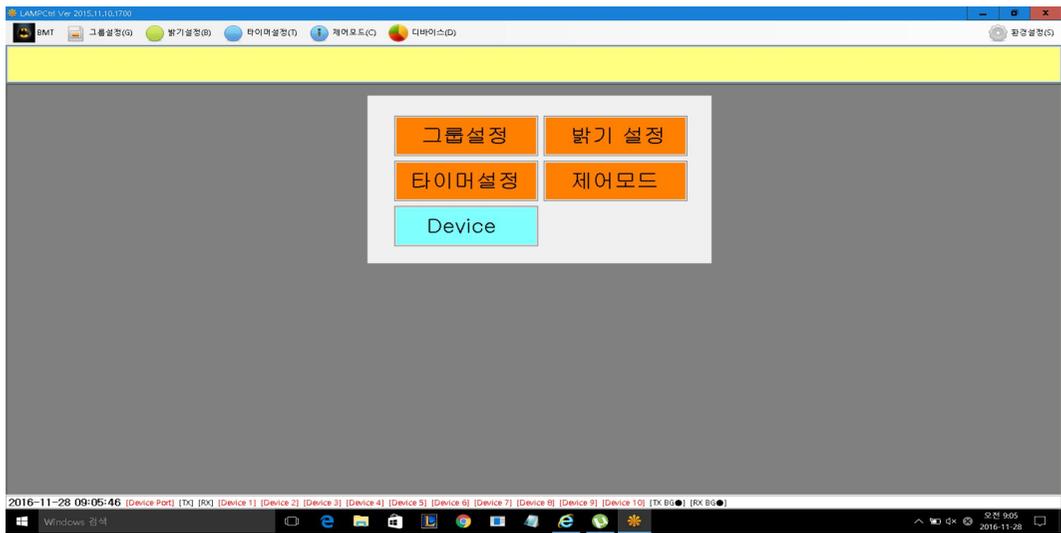


Fig. 3-17 Program Configuration

Fig. 3-17은 프로그램 구성으로 메인은 서브메뉴로만 구성되어 있고, 하위는 그룹설정, 디밍설정, 시간설정(타이머 기능), 공간설정(구획설정), 디바이스(연결 확인) 등으로 구성되어 있다.

## 제 4 장 실험 및 연구결과 분석

### 제 1 절 실험 장치 및 실험 방법

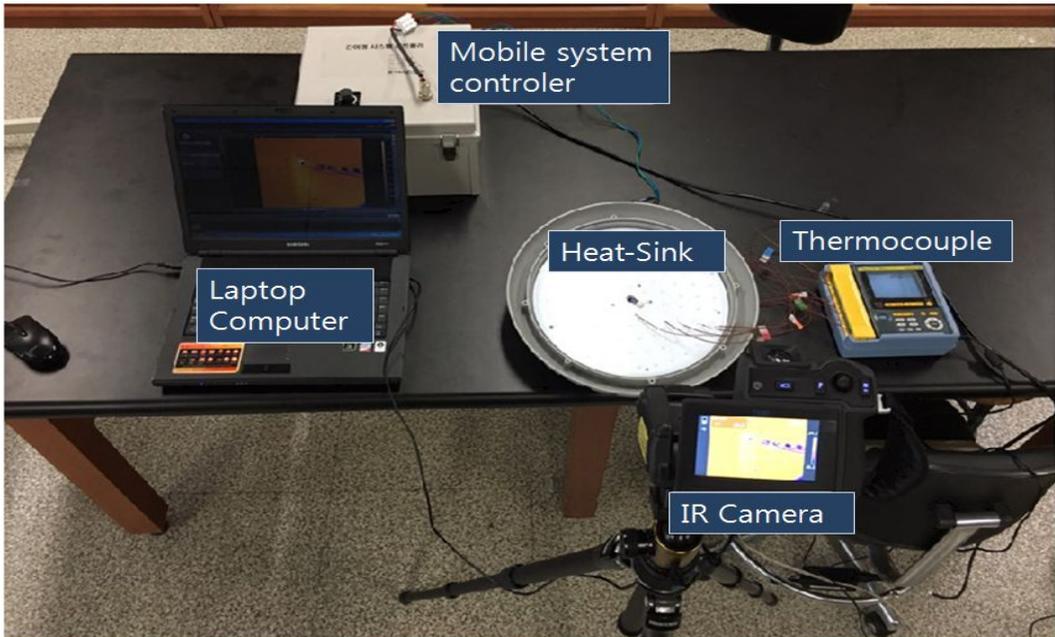


Fig. 4-1 Test jig Configuration

Fig. 4-1과 같이 실험장치 전체 시스템 구성을 하였으며 LED 통합조명시스템 최적설계에 앞서 먼저 LED 칩 1EA의 발열량을 알아보았다. 120W 급 LED 모듈과 마찬가지로 PCB 기판에 LED 칩 1EA를 납땀해 제작하고 30분가량 LED 칩 1EA에 3.2[V] 전압을 주어 최고온도를 측정하여 계산식을 이용해 120W 급 LED 조명 칩의 최적 개수가 98EA 임을 확인하였다. 제작한 120W 급 LED 조명을 적외선 열화상 카메라와 써머커플(Thermocouple)을 이용해 동일 조건에서 2시간 후 LED 모듈과 Heat-sink 뒷부분의 온도분포를 이미지 데이터와 그래프를 통해 확인하였다. 실험에 사용된 적외선 열화상 카메라는 FLIR T640 모델이며, 써머커플은 Yokogawa사의 XL100 모델이다.

## 제 2 절 Heat-Sink 방열 검증 결과

Fig. 4-2는 LED 모듈에 발열부인 램프부분에 대한 온도분포를 촬영하기 위한 장비구성 모습이다. 정확한 온도분포 비교를 위해 적외선 열화상 카메라와 써머커플(Thermocouple)을 적용하여 실험하였다. 실험 시스템 주변 온도는 19℃로 일정하게 유지하여 실험을 수행하였다. 또한 온도 변화에 민감하기에 해가 진 오후에 실험을 수행하였고, 적외선 열화상 카메라와 Heat-sink의 거리를 50cm 이내로 하여 2시간 동안 촬영하여 640\*480의 해상도로 이미지 데이터와 그래프를 획득, 분석하였다.

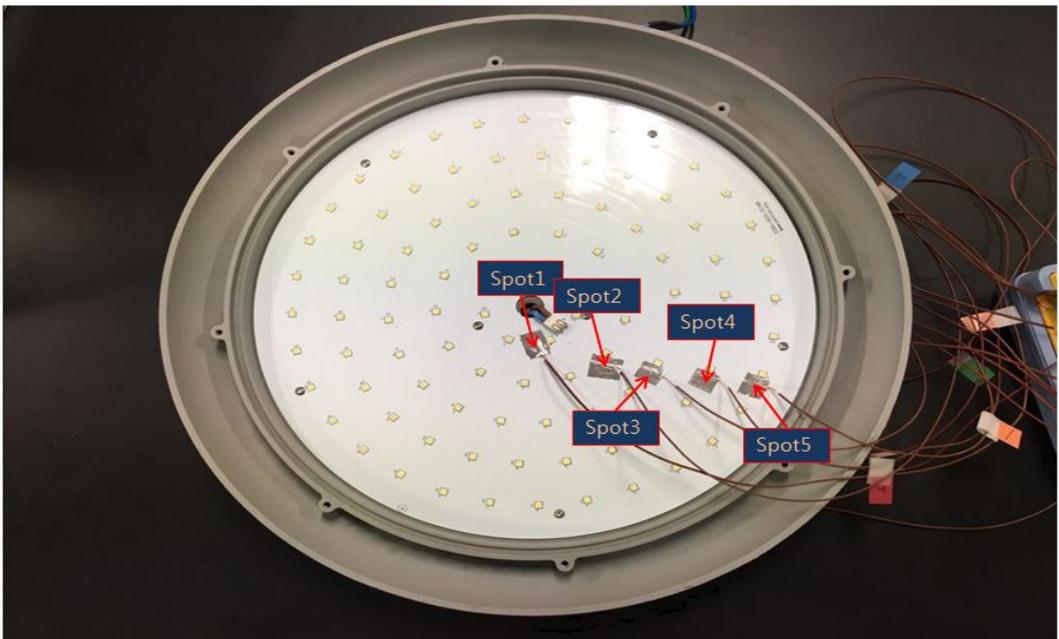


Fig. 4-2 Thermocouple wire attachment to LED module

Fig. 4-2는 LED 발열부에 열화상 스팟(Spot)과 같은 위치로 열전대 와이어를 부착하였다. 정확한 온도 측정과 열손실을 최소화하기 위해 알루미늄 테이프를 이용해 열전대를 고정하였다. 써머커플의 열전대 1~5번은 전면 LED 부분에 부착하고, 6~10 번은 Heat-Sink 뒷면에 부착하였다.

Fig. 4-3 ~ Fig. 4-7은 열전대를 붙인 곳 바로 옆 Spot 5군데를 찍어 120분(min) 간 30분 간격으로 열화상 카메라를 이용해 촬영한 열화상 이미지이다. Fig. 4-3은

열화상 이미지는 전류가 흐르고 20초 후 촬영한 이미지이다. Spot1의 온도는 23.9℃, spot2는 23.5℃, spot3은 24.4℃, spot4는 24.4℃, spot5는 23.5℃를 나타낸다. 시간이 얼마 지나지 않아 온도가 크게 오르지 않음을 확인하였다. Fig. 4-4는 30분이 지난 후 촬영한 이미지이다. 최저온도 60.6℃, 최고온도 61.9℃로 Fig. 4-3에 비해 약 3배로 온도가 크게 증가하였다. Fig. 4-5는 60분이 지난 후 촬영한 이미지이다. 최저온도 65.3℃, 최고온도 66.0℃로 Fig. 4-4와 비교했을 때 약 5℃ 이상 온도가 증가했음을 확인하였다. Fig. 4-6은 90분이 지난 후 촬영한 이미지이다. 최저온도 66.2℃, 최고온도 67.1℃로 Fig. 4-5와 비교했을 때 약 1℃ 정도 증가했음을 확인하였다. Fig. 4-7은 120분이 지난 후 촬영한 이미지이다. 최저온도 65.7℃, 최고온도 66.8℃도로 Fig. 4-6과 비교했을 때 크게 달라짐이 없음을 확인하였다.

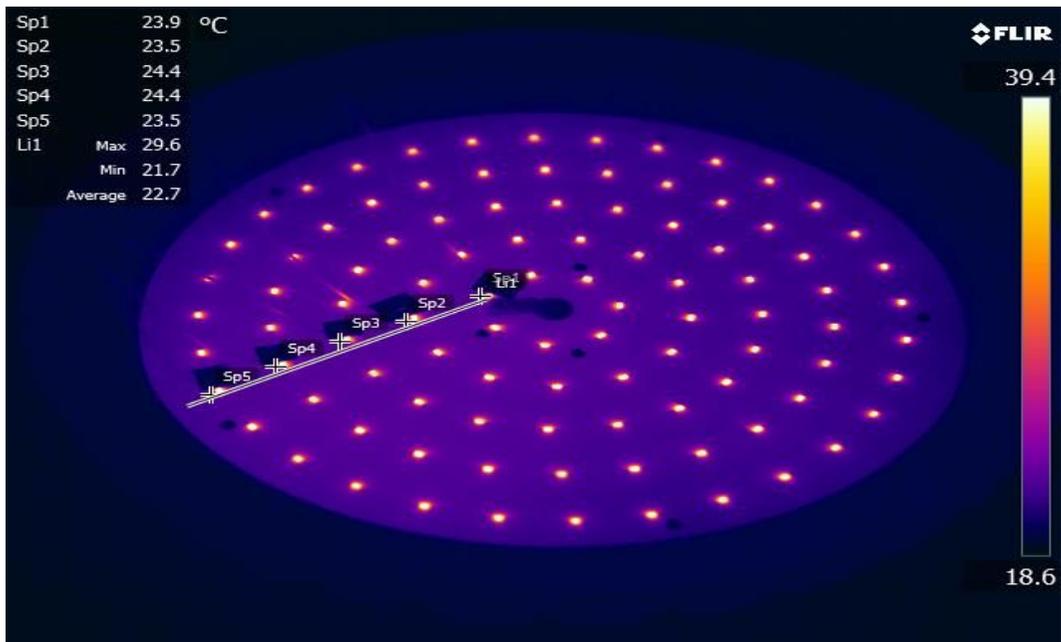


Fig. 4-3 Thermal image after 20 seconds

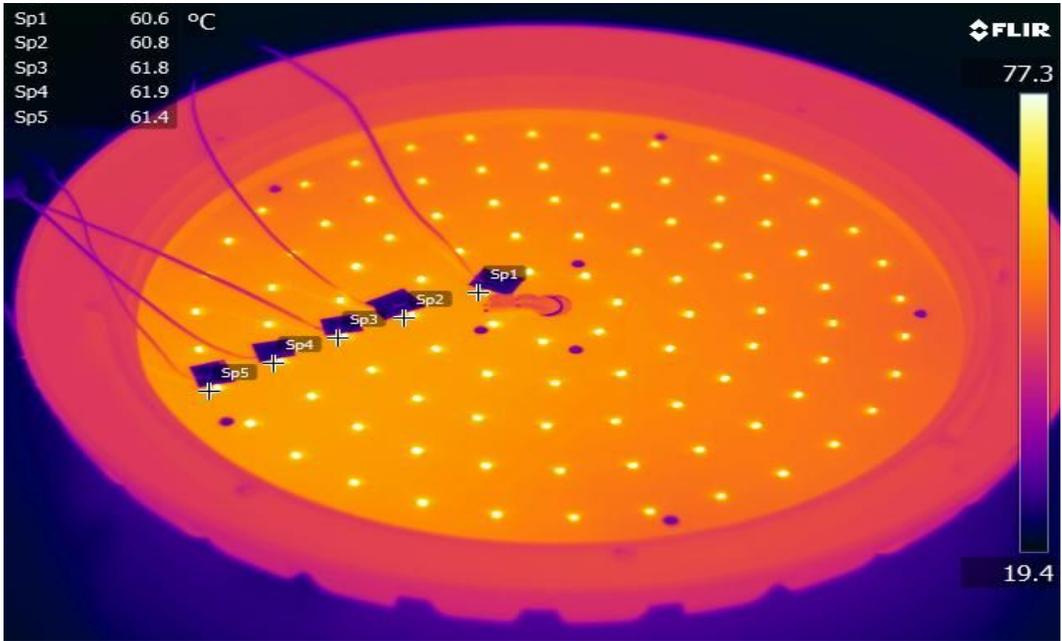


Fig. 4-4 Thermal image after 30 minutes

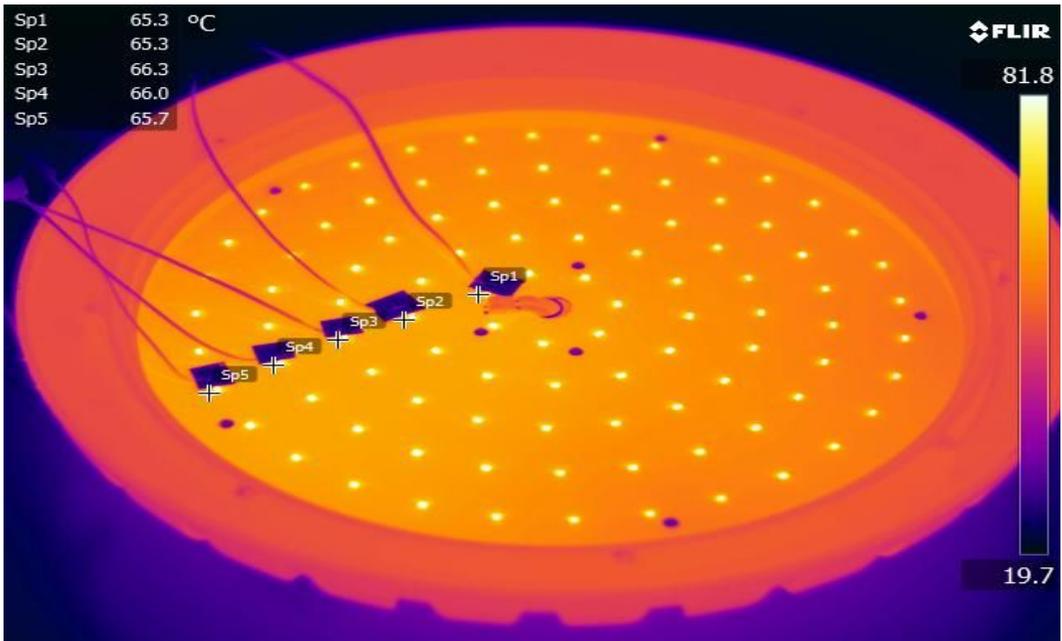


Fig. 4-5 Thermal image after 60 minutes

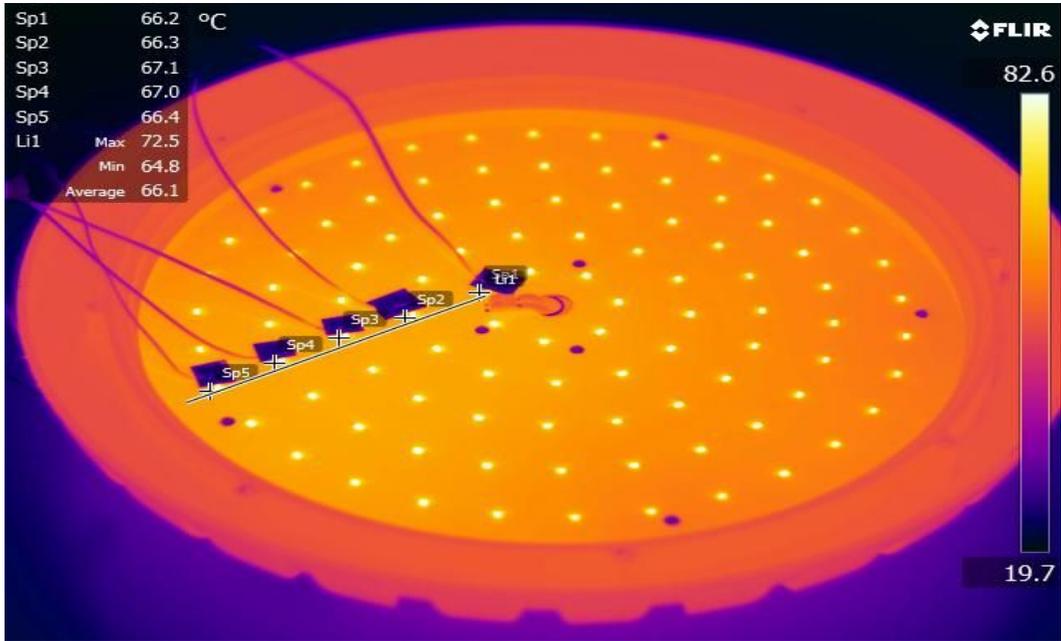


Fig. 4-6 Thermal image after 90 minutes

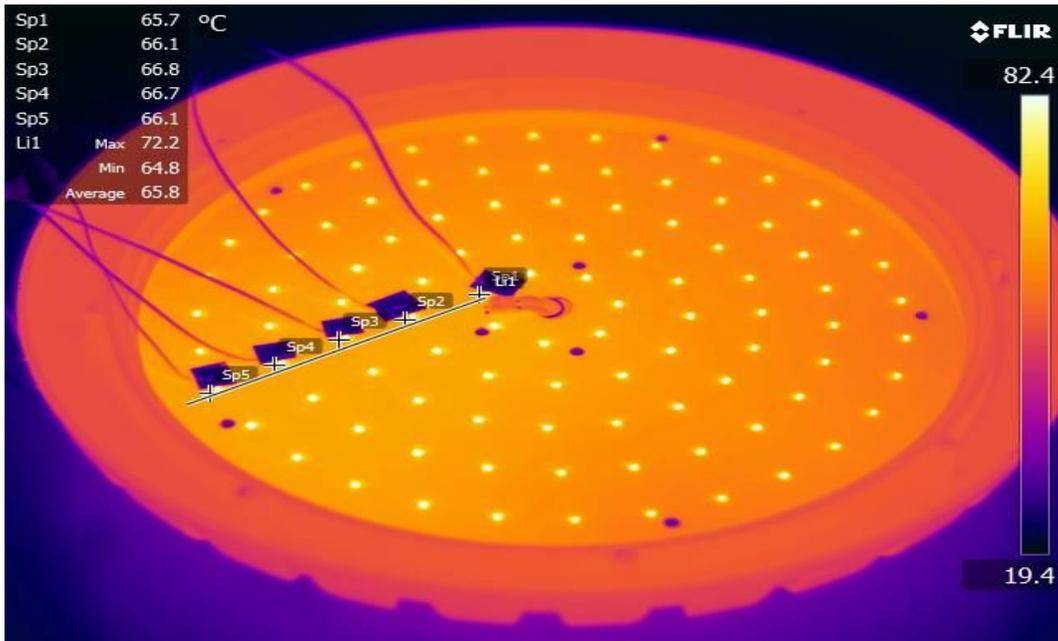


Fig. 4-7 Thermal image after 120 minutes

Fig. 4-8은 Fig. 4-3 ~ Fig. 4-7까지 열화상 이미지에 Spot1 ~ Spot5까지 온도분포를 시간 흐름에 따라 그래프로 나타낸 것이다. 확인 결과 Spot1, Spot2, Spot3, Spot4, Spot5가 비슷한 온도변화가 있었고, 1시간 후부터는 실험 시작 2시간이 지나도 약 65°C에서 온도변화가 거의 없음을 확인하였다.

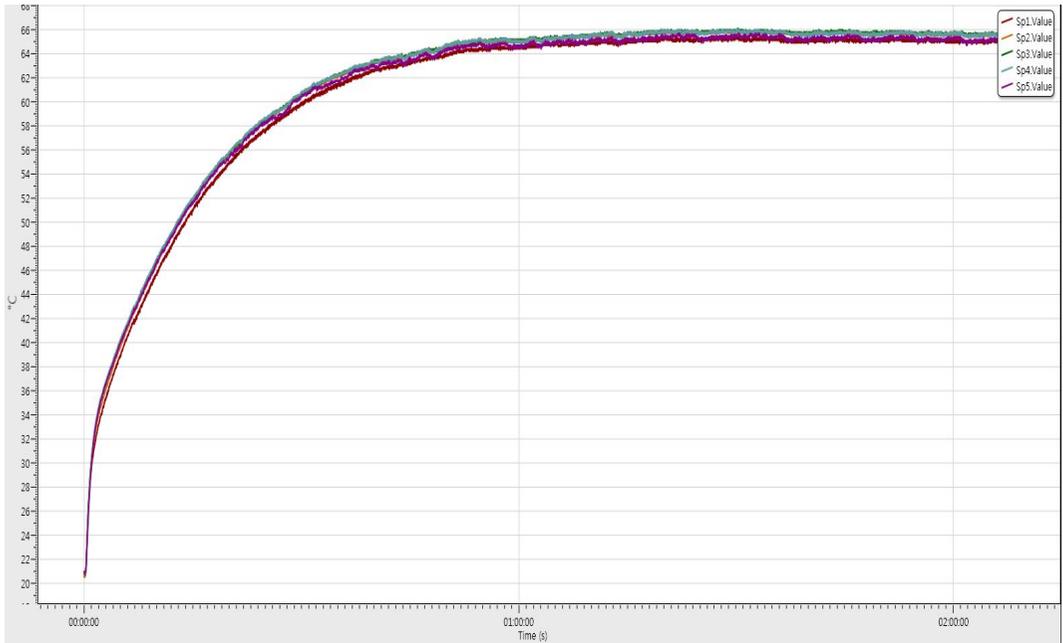


Fig. 4-8 LED module thermal image graph

Fig. 4-9의 그래프는 LED 모듈 열화상 Spot과 같은 자리에 써머커플(Thermocouple)을 이용해 획득한 그래프이다. 열화상 카메라와 비교를 위해 동일 조건에서 실험을 시작하였고, Fig. 4-9의 그래프도 마찬가지로 실험 시작 1시간 후 60°C에서 크게 변함없이 일정함을 확인하였다. Fig. 4-8의 열화상 카메라를 이용해 획득한 그래프와 Fig. 4-9의 써머커플을 이용해 획득한 그래프를 비교하면 서로 크게 다르지 않음을 확인할 수 있다. 약간의 차이는 열화상 카메라로 획득한 그래프와 써머커플에서 획득한 그래프가 약 5°C의 온도차이가 있을 뿐이다.

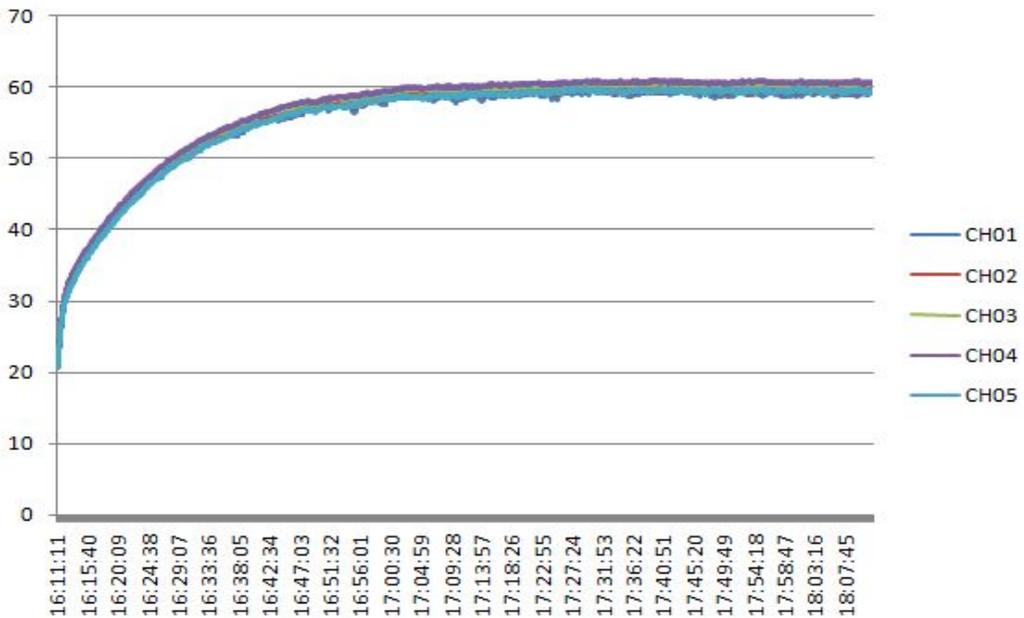


Fig. 4-9 LED module thermocouple graph

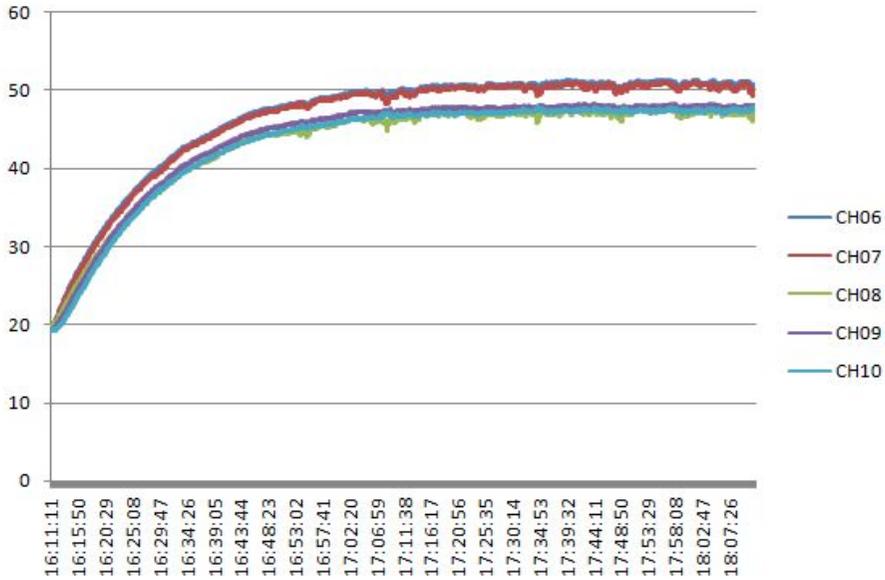


Fig. 4-10 Heat-Sink thermocouple graph

Fig. 4-10의 그래프는 앞전에 언급한 120W 급 LED 모듈 방열 실험에 Heat-sink 뒷 부분에 6 ~ 10번까지 써머커플을 이용해 획득한 그래프이다. CH06번부터 Heat-sink 중심부터 CH10번의 Heat-sink 끝부분까지 온도 측정결과 중심부인 CH06, CH07번이 약 50°C임을 확인하였고, 가장자리인 CH08, CH09, CH10번은 약 47°C가 됨을 확인하였다. Heat-sink도 LED 모듈과 마찬가지로 1시간 후부터는 온도가 일정하게 유지됨을 확인하였다. 써머커플(Thermocouple)의 데이터로 본다면 120W 급 LED 모듈의 방열시 Heat-Sink와 약 10°C정도의 차이를 보였다.

### 제 3 절 120W 급 LED 조명 효율 검증 결과

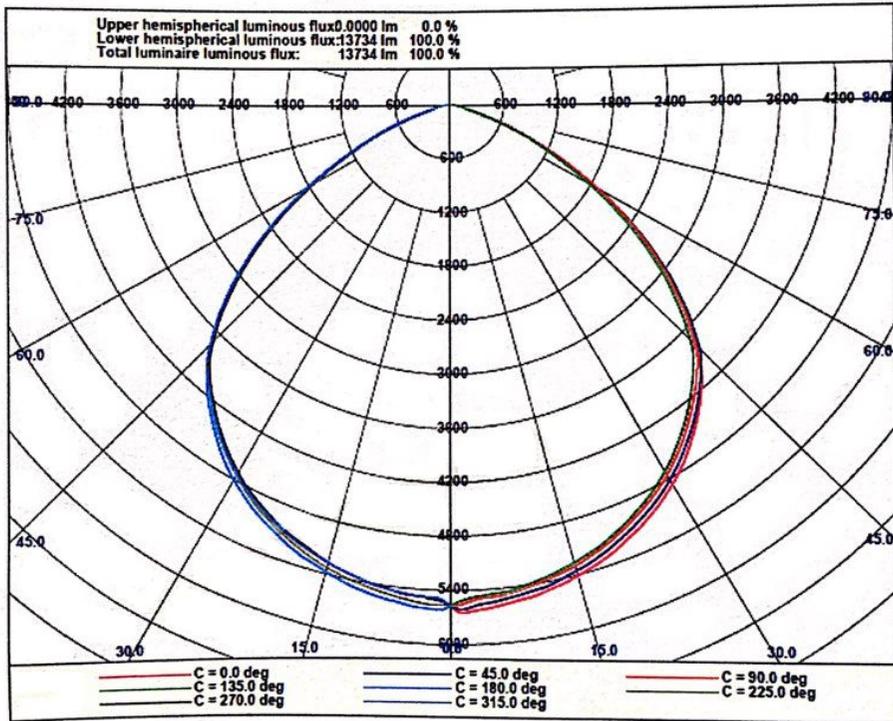


Fig. 4-11 Light distribution curve

Fig. 4-11은 120W 급 LED 조명등의 배광곡선을 나타낸 것이다. 배광곡선은 광원에서 나오는 광도분포를 나타내는 곡선을 말한다. Fig. 4-11의 배광곡선을 보면 0° 일 때 5600[lm], 15° 일 때 5400[lm], 30° 일 때 4800[lm], 45° 일 때 3800[lm], 60° 일 때 1800[lm]임을 알 수 있으며, 배광곡선이 좌우대칭을 이루므로써 빛이 고르게 퍼져나가는 것을 확인할 수 있다.

## 제 5 장 결 론

에너지절약과 환경문제가 사회적 이슈로 대두되면서 유해가스가 없고 수명이 길며 광효율 또한 지속적으로 발전하고 있는 LED 광원의 관심이 뜨겁다. LED는 고효율, 저전력, 긴 수명, 친환경 등의 이유로 기존의 조명방식에서 LED 조명등으로 전환의 필요성이 언급되고 있다. 하지만 LED 조명등의 발열문제가 심각해 큰 걸림돌이 되고 있다. 본 논문에서는 원격제어방식을 적용한 LED 통합조명시스템 최적설계와 건전성 평가를 하였다. 정확한 온도분포 비교를 위해 적외선 열화상 카메라와 써머커플(Thermocouple)을 적용하였다. 적외선 열화상 기술을 바탕으로 검사공정과 관련한 생산성을 향상하고 향후 기술 경쟁력을 갖춘 선진 비파괴검사 기술을 정착하여 산업전반에 대하여 검사 기술을 향상시키기 위한 연구를 수행하였다. 이에 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1. 적외선 열화상 카메라와 써머커플(Thermocouple)을 이용하여 120W 급 LED 조명등의 발열부의 온도분포를 측정한 결과 시동 후 약 1시간 후부터는 크게 온도 변화가 없이 일정하게 유지하였으며, 이때 적외선 열화상 카메라의 온도가 약 65℃, 써머커플의 온도가 약 60℃로 약 5℃정도의 차이를 보였다.
2. 써머커플(Thermocouple)을 이용하여 120W 급 LED 조명등의 Heat-sink 뒷부분 온도분포를 측정한 결과 약 1시간 후부터는 발열부와 마찬가지로 크게 온도 변화 없이 일정하게 유지하였으며, 이때 써머커플의 온도가 약 48℃임을 확인할 수 있었다.
3. 본 연구를 통해 최적설계한 120W 급 LED 조명등을 2시간 가량 동작시켜 방열 특성을 비교해 본 결과 현저하게 우수한 방열을 확인하였다. 향후 조명등의 Heat-sink의 재질 등을 고려해 무게 감량, 디자인 등을 개선하고자 한다.
4. LED 조명등 뿐만 아니라 산업 전반에 걸쳐 적외선 열화상 검사 시스템을 적용 가능성을 확인하였다.

## REFERENCE

1. 황명근, 박재환, 임종민, 이장원, “친환경 고효율 LED 조명” .
2. 비피기술거래, “LED 산업분석 보고서” .
3. 노치성, “하이브리드 기어의 FEM해석 및 적외선 열화상기법을 적용한 건전성 평가” , 2016년 학위논문.
4. 이용식, “(LED 조명 응용기술)LED스마트 조명시스템 응용 방향, 2016년 학위 논문.
5. 유란희, “IRT기법을 이용한 하이브리드 자동차용 리튬 이온 배터리의 결함에 관한 건전성 평가” , 2016년 학위논문.
6. 정봉만, 정학근, “LED 조명기술 현황과 전망” , 조명·전기설비학회지 제20권 제1호, 2006. 2, pp.31~37.
7. 송호철, “고효율 LED 조명을 위한 50W COB LED 모듈 방열 설계에 관한 연구” , 2016년 학위논문.
8. 조영태, 이충호, “CNT 열전달 물질에 의한 50W LED의 방열 성능평가” , 한국 기계가공학회지, 제13권, 제6호.
9. 신희재, “탄소복합재의 강도평가 및 비파괴검사” , 2013년 학위논문.
10. 송영민, “LED 기술 및 특허동향 조사”
11. 김치현, “LED 조명 미래의 빛이 되려면” , 2009. 06.

12. 양동조, “원격모니터링기법과 열화상계측기술을 이용한 태양에너지시스템 신뢰성 평가, 2006년 학위논문.
13. 정윤수, 노치성, 이경일, 김재열, “초음파 적외선열화상 기법을 적용한 모터 코어의 신뢰성 평가”, 한국기계가공학회지, 제15권, 제4호, pp.60~66.
14. 노치성, 정윤수, 이경일, 김재열, “스퍼 기어의 FEM 해석 및 IRT 기법을 적용한 건전성 평가”, 한국윤활학회지, Vol.32, No.4, August 2016, pp.113~118.
15. 위철양, “열화상 비전을 이용한 C/C소재 Disk Brake Rotor 비파괴검사 시스템 개발, 2014년 학위논문.
16. 김성현, “적외선 열화상 기술을 적용한 풍력발전기 친환경 부품소재의 비파괴 신뢰성 평가”, 2012년 학위논문.
17. 최승현, “적외선 열화상 진단기술을 적용한 가스터빈 1단 버킷의 건전성 평가”, 2008년 학위논문.
18. 양용하, “초음파 서모그래피를 적용한 내연기관 피스톤의 비파괴 신뢰성평가”, 2010년 학위논문.
19. 정지영, “에너지 발전형 LED 모듈의 열전달 경로 해석과 Heat sink 설계 최적화”, 2016년 학위논문.
20. 김희준, “조광 및 색온도 제어 가능한 LED 조명 구동회로 개발”, 2008. 06.
21. 장현, 서정세, 이중섭, “LED 조명등 히트싱크 형상과 배열에 따른 방열특성에 관한 연구”, 한국기계가공학회지, 제 12권, 제3호.
22. 조영태, “동도금 EP방열판에 의한 소형LED조명등 방열”, 한국생산제조시스템학회지 Vol.20 No.1 2011. 2. pp.81~85

23. 윤병우, 송종관, 박장식, 권홍배, “수공냉 대류방식을 이용한 1.2kW급 LED 조명등 개발”, 한국전자통신학회 논문지 제10권 제5호 (2015년 5월), pp.615~622.

24. 조영태, “엔지니어링 플라스틱의 LED조명 방열판 적용”, 한국기계가공학회 지, 제 12권, 제 4호, pp.61~68.

## 감사의 글

어느덧 짧지 않은 대학원 생활을 마무리하며 지난 시간들을 돌이켜보니 많은 아쉬움과 후회가 남습니다. 학업적 성취에 있어서의 아쉬움만이 아닌, 고마운 많은 분들께 감사의 마음을 제대로 전하지 못했기에 더욱 그러한 것 같습니다. 제가 이렇게 성장하기까지 오랜 시간이 걸렸지만 그 세월 속에서 직·간접적으로 힘이 되고 방향을 잡아주셨던 많은 분들께 감사의 말씀을 전하고자 합니다.

먼저 석사 과정 동안 학업과 연구에 매진할 수 있도록 열과 성의를 다하여 아낌없는 격려와 지도를 해주신 김재열 교수님께 진심으로 감사드립니다. 바쁘신 와중에도 시간 내주시어 심사를 맡아주신 김경석 교수님, 김지훈 교수님께도 머리 숙여 깊은 감사를 드립니다.

대학원 생활을 하는 동안 무수히 많은 일들이 있었고, 이를 통해 많은 것들을 배우고 성장할 수 있는 소중한 시간이 될 수 있도록 도와주신 나노계측메카트로닉스 실험실 선배님들과 후배님께 깊은 감사드립니다. 저를 위해 많은 도움과 아낌없는 조언을 해주며 물심양면으로 도와주시고 챙겨주신 최승현 선배님, 김성현 선배님께 감사의 말을 전하고 싶습니다. 힘든 일, 즐거운 일 모두 함께 겪은 고가진 형, 이경일 형, 그리고 자준이, 려이에게도 고맙다는 말을 전합니다. 그 동안의 즐거운 추억들이 영원하길 바라며, 나노계측메카트로닉스 실험실에 소속된 모든 분들의 앞날이 늘 화창했으면 합니다.

부족한 자식 항상 곁에서 믿어주시고 응원해주시는 아버지와 어머니, 큰누나, 둘째 누나, 막내 누나, 큰 매형, 작은 매형, 조카 은성이에게도 이 자리를 통해 늘 감사하고 사랑한다는 말을 전합니다. 이제는 이러한 가족들의 은혜에 조금이나마 보답할 수 있도록 노력하겠습니다.

마지막으로 일일이 언급하지 못했지만 그 동안 저를 아끼고 도와주신 모든 분들께 다시 한번 진심으로 감사드립니다.

2016년 11월 정윤수