creative commons

COMMONS DEED

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

dCollection

[UCI]I804:21031-000002299170

공학석사 학위논문

에너지 발전형 LED 모듈의 열전달 경로 해석과 Heat sink 설계 최적화

2016 년 8 월

부경대학교 과학기술융합전문대학원

LED융합공학전공

정 지 영

공학석사 학위논문

에너지 발전형 LED 모듈의 열전달 경로 해석과 Heat sink 설계 최적화

지도교수 유 영 문

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2016 년 8 월

부경대학교 과학기술융합전문대학원

LED융합공학전공

정 지 영

정지영의 공학석사 학위논문을 인준함

2016 년 8 월

主 審 최 희 락 (印)

委 員 유 영 문 (印)

委 員 김 종 수 (印)

목 차

제 1 장 서 론 ····· 1

1.1 연구 배경 및 목적 ····· 1

1.2 선행 연구 ····· 3

1.2.1 고온 온도차 열전발전 연구 ····· 3

1.2.2 저온 온도차 열전발전 연구 ····· 4

1.2.3 LED와 열전소자의 융합 ····· 4

제 2 장 관련 이론 ····· 7

2.1 LED(Light-Emitting-Diode) 조명 ····· 7

2.1.1 LED 조명의 특징 ····· 7

2.1.2 LED 조명의 열관리 ····· 9

2.2 에너지 수확 ····· 11

2.2.1 태양광 발전 (Photovoltaic) ····· 12

2.2.2 초전효과 에너지(Pyroelectric energy) ····· 12

2.2.3 압전효과 에너지(Piezoelectric energy) ····· 12

2.2.4 마찰전기 에너지(Triboelectric energy) ····· 13

2.3 열전소자 ····· 14

2.3.1 펠티에 효과 (Peltier effect) ····· 14

2.3.2 제베크 효과 (Seebeck effect) ····· 14

2.3.3 열전소자의 최대 전력 ····· 18

2.4 열저항 ····· 22

2.4.1 열전소자의 열저항 ····· 22

2.4.2 LED의 열저항과 구조함수 ····· 25

제 3 장 실험방법 ····· 30

3.1 LED 광학엔진모듈의 설계 및 제작 ····· 30

3.2 열전소자의 선정 ····· 35

3.2.1 열전소자 실험 방법 ····· 35

3.2.2 열전소자 예비 실험 ····· 37

3.3 열전소자 삽입형 LED 엔진모듈 설계 ····· 40

3.3.1 열전소자의 열저항 특성 실험 ····· 40

3.3.2 LED 엔진 모듈의 열특성 실험 ····· 42

제 4 장 실험 결과 및 고찰 ····· 44

4.1 열전소자 온도변화에 따른 열저항 변화 ····· 44

4.2 엔진 모듈의 적합성 평가 ····· 46

4.3 LED 엔진 모듈의 방열특성 분석 ····· 49

4.4 열전소자의 발전 전력 분석 ····· 53

4.5 LED 엔진 모듈의 광특성 비교분석 ····· 59

제 5 장 결 론 ····· 61

참고문헌 ····· 62

Abstract ····· 65

표 차 례

표 3.1 실험에 사용된 LED 패키지의 성능 ····· 31
표 3.2 자체 제작 모듈의 광학적 특성 ····· 32
표 3.3 기존 업체 모듈의 광학적 특성 ····· 33
표 3.4 각 모듈의 접합온도와 열저항 ····· 34
표 3.5 실험에 사용된 열전소자의 성능 ····· 35
표 3.6 열전소자 종류에 따른 발전량 ····· 38
표 3.7 열전소자 개수에 따른 발전량 ····· 38
표 3.8 히트싱크 유무에 따른 발전량 ····· 38
표 4.1 고온부 온도(T_h) 변화에 따른 출력 전력 변화와 열저항 값 ····· 45
표 4.2 저온부 온도(T_c) 변화에 따른 출력 전력 변화와 열저항 값 ····· 45
표 4.3 LED 엔진 모듈의 정격 전류 인가 시 열저항 ····· 46
표 4.4 LED 광학엔진모듈의 각 계면의 열저항 ····· 47
표 4.5 LED모듈에 열전소자가 부착된 모듈의 각 계면의 열저항 ····· 48
표 4.6 핀 두께 2 mm 고정 후 개수를 변화시켰을 때의 LED 온도 ····· 51
표 4.7 핀 개수 17개 고정 후 두께를 변화시켰을 때의 LED 온도 ····· 51
표 4.8 핀 두께 1 mm 고정 후 개수를 변화시켰을 때의 LED 온도 ····· 51
표 4.9 열전소자의 부하 변화에 따른 출력 전력 ····· 56
표 4.10 열전소자 삽입 전 후 LED 엔진 모듈의 광 특성 ····· 59

그 림 차 례

그림 1.1 열전소자의 활용 예 ····· 2
그림 2.1 백색 LED를 구현하는 다양한 방법 ····· 8
그림 2.2 60W LED램프의 가격과 효율 경향 ····· 8
그림 2.3 LED 방열의 개념도 ····· 10
그림 2.4 에너지 하비스팅의 예 ····· 11
그림 2.5 마찰 전기 발전의 메커니즘 ····· 13
그림 2.6 열전소자의 에너지 변환의 동작 원리 ····· 16
그림 2.7 열전소자의 제베크효과 ····· 16
그림 2.8 열전재료의 캐리어 농도에 따른 특성 ····· 17
그림 2.9 한 개의 열전쌍으로 구성된 열전소자와 부하저항 ····· 18
그림 2.10 열전소자의 I-V 출력 그래프 ····· 20
그림 2.11 열전소자의 일반적인 발전 특성 그래프 ····· 20
그림 2.12 열전소자의 구조에 따른 열저항 등가모델 ····· 22
그림 2.13 LED 전류변화에 따른 전압 변화 그래프 ····· 26
그림 2.14 LED에 미세전류 인가 시 전압과 접합온도 변화 ····· 26
그림 2.15 LED 광학엔진모듈의 임피던스 모델 ····· 28
그림 2.16 열저항 측정 시스템 (T-3ster) ····· 29
그림 3.1 제작된 LED 광학엔진모듈 ····· 30
그림 3.2 실험에 사용된 LED 패키지(Philips lumileds luxeon TX) ····· 31
그림 3.3 자체 제작 LED 광학엔진모듈의 색좌표 ····· 32
그림 3.4 자체 제작 LED 광학엔진모듈의 스펙트럼 ····· 32
그림 3.5 각 모듈의 구조함수 측정 결과 ····· 34
그림 3.6 LED 광학엔진모듈의 출력전력 측정을 위한 실험 구성 ····· 36

그림 3.7 열전소자 발전량 측정을 위한 전자 로드 ····· 36
그림 3.8 최종 선정된 열전소자 (50690-502) ····· 39
그림 3.9 온도에 따른 열전소자 내부 열저항 측정 실험 장치 ····· 41
그림 3.10 한국도로공사 표준 LED 광학엔진모듈 외형 치수 요구사항 ·· 42
그림 3.11 열전소자가 적용된 Heat sink 형상 ····· 43
그림 4.1 LED 광학엔진모듈의 구조함수 ····· 47
그림 4.2 LED 광학엔진모듈에 열전소자가 부착된 구조함수 ····· 48
그림 4.3 LED 엔진 모듈의 구조함수 ····· 49
그림 4.4 모듈의 해석 결과 ····· 52
그림 4.5 열전소자의 온도 분포 ····· 52
그림 4.6 열전소자 삽입 전 한국도로공사 표준형 LED 엔진 모듈 ····· 53
그림 4.7 열전소자 삽입 후 한국도로공사 표준형 LED 엔진 모듈 ····· 54
그림 4.8 LED엔진 모듈의 열전 발전량 측정 실험 구성 ····· 55
그림 4.9 LED엔진 모듈의 열전 발전량 그래프 ····· 57
그림 4.10 LED 엔진 모듈의 광속과 광효율 저하 비율 ····· 60
그림 4.11 LED 엔진 모듈의 스펙트럼 변화 ····· 60

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

지구 온난화의 주범인 온실가스 감소를 위한 노력이 전 세계적으로 진행되고 있다. 온실가스 감축을 위한 국제적 협약은 1997년 기후변화에 관한 UN 규약의 교토 의정서가 채택 되었고 2005년부터 발효 되었다. 화석연료 사용에 의한 CO_2 배출은 전력생산, 수송, 가정 및 산업용 에너지 발전 등에서의 배출이 전체 배출의 50%를 차지한다. 이를 감축하기 위해서는 에너지의 효율적 사용과 더불어 화석 에너지를 대체할 신재생 에너지원의 개발이 중요하다. 신재생 에너지 기술은 화석에너지의 고갈, 지구온난화와 같은 환경문제가 대두되어 환경 친화적 에너지 공급원으로써 다양한 연구와 개발이 이루어지고 있다. 그 중에서 열전소자는 열에너지를 전기에너지로 직접 변환 시키는 것으로 산업분야에서 폐수, 배기가스 등으로부터 버려지는 열을 발전 전력으로 재생시키는 적용이 이루어지고 있다[1]. 특히 열전재료의 개발이 증가함에 따라 저온영역에서부터 중, 고온 범위의 활용 가능한 응용분야가 제시되고 있다[2]. 또한, 열전재료의 성능지수(figure of merit)인 'ZT'값이 점점 높아지고 있어 풍력, 바이오메스, 파력 등과 같은 대체에너지로서도 열전이 사용이 가능할 것으로 보인다[3]. 태양광 시스템의 효율이 증가되는 것과 같이 열전재료 성능이 좋아지면서 열전시스템의 전체 효율이 높아질 것으로 예상되며 그에 따라 태양에너지의 대안이 될 수 있을 것이라 전망된다[4].

LED(Light Emitting Diode)는 고효율· 장수명 발광소자로 차세대 고부가가치의 반도체 조명분야에서 사용이 점차 확대되고 있다. 기술의 발전에 따라 LED의 광 효율이 개선되고 있지만 LED에 입력된 에너지의

약 70%는 여전히 열로 발생된다[5]. LED에서 발생한 폐열에 열전소자를 적용하면 에너지 발전의 측면으로도 LED를 활용이 가능하다. 열전소자 적용에 있어 LED의 경우 산업폐열보다 상대적으로 발열량이 적어 발전되는 전력량이 적다는 단점을 가지고 있다. 하지만 대부분의 조명용 무선 센서는 매우 낮은 평균 전력을 소모하기 때문에 낮은 발전량으로도 전력을 공급받을 수 있는 주요 대상이 될 수 있다. 또한 배터리 충전 전력 원으로 적용하여 비상 발전용 전원으로 활용이 가능하다[6]. 한편 LED 조명에서 방열은 필수적이며 방열 설계가 제대로 이루어지지 않으면 LED 접합부분에서 발생한 열이 빠져나가지 못해 접합온도가 높아지게 된다. 이는 LED 조명의 신뢰성 및 효율에 크게 영향을 미치게 되며 수명의 단축에 주요 원인이 된다. 열전소자를 LED조명에 적용 시 열전달 경로에 저항체로서 역할을 하기 때문에 접합부에서 발생한 열이 외부로 잘 빠져나갈 수 있도록 설계하는 것이 중요하다.

그림 1.1 열전소자의 활용 예

Fig. 1.1 Application example of thermoelectric devices

1.2 선행 연구

폐열 활용을 위한 열전소자의 적용은 주로 산업분야에서 이루어지고 있다. 산업분야에서 발생하는 폐열은 주로 고온이며, 높은 온도차(ΔT)를 열전소자에 제공한다. 높은 온도차가 주어지면 열전소자로부터 높은 발전량을 쉽게 얻을 수 있어 주요 응용분야로 선택되어 왔다. 하지만 고온에서의 열전소자 응용뿐만 아니라 상대적으로 낮은 온도차에서 열전소자를 사용하여 발전을 구현하는 연구 또한 이루어지고 있다. 열전소자의 소재 개발과 더불어 낮은 온도차에서의 발전량도 증가하고 있으며, 이는 열전소자가 사용될 수 있는 분야를 확장시켜 폐열이 발생하는 다양한 분야에서 활용이 될 것으로 예상된다. 열전소자의 국내 및 국외 연구는 아래와 같다.

1.2.1 고온 온도차 열전발전 연구

최병준 [7] 등은 폐열회수를 위한 열전발전기술개발의 일환으로 자체 고안한 열전발전시스템을 구성하였고 상용화된 열전모듈을 적용하여 다양한 온도범위에서 열전모듈의 출력성능을 시험하였다. 열전모듈 한 개에 대하여, 그리고 5개의 모듈을 직렬로 연결하여 온도차를 변화시킬 때의 출력변화를 측정하였다. 또한 150 ℃로 고정된 온도에서 부하 저항을 변화시키면서 출력성능을 실험하여 발전출력에 미치는 시스템 인자들을 조사하고 발전시스템의 최적조건을 도출하였다.

Y.Y. Hsiao [8] 등은 자동차연료의 폐열을 열전소자를 사용해 전기에너지로 변환하고자 하였다. 라디에이터와 자동차 배기 파이프에 열전소자를 적용시켜 발전량을 측정하여 타당성을 검토하였다. 열전소자는 배기파이프에 적용시켰을 때 더 높은 발전량을 얻을 수 있었으며 290 ℃ 온도차에서 51.13 m·Wcm^{-2}의 발전량을 얻을 수 있었다.

1.2.2 저온 온도차 열전발전 연구

Xiaolong Gou [9] 등은 열전발전기술 및 열역학 기본 원칙을 바탕으로 열전발전 시스템 모델을 확립하였고, 저온분야에서의 활용 가능성 검토를 위해 저온 폐열 열전발전 시스템을 구성하였다. 이론적 분석과 실험 사이의 결과 비교를 통해 모델의 합리성을 확인하였고, 시스템 성능의 개선을 위해 실험 장치의 최적화과정과 수정이 제안되었다. 폐열의 온도를 높이거나 열전모듈의 직렬사용, 그리고 열전소자에 부착된 heat sink의 표면적을 높이거나 열전달 능력을 높이는 것이 장치의 성능 향상에 기여하였다.

조병진 [10] 등은 웨어러블 체온 전력생산 기술을 개발하여 2015년 유네스코 세상을 바꿀 10대 기술 그랑프리를 수상하였다. 열전소자를 기존의 무겁고 휘어지지 않는 기존 세라믹 대신 유리섬유를 사용해 가볍고 형태 변형이 용이하도록 하였다. 또한 단위 무게당 전력생산 효율도 기존 대비 14배 높은 결과를 얻었다. 인체의 열로부터 전력을 생산하면 기존의 웨어러블 디바이스의 배터리 문제에 방안이 될 것으로 예상되었다.

1.2.3 LED와 열전소자의 융합

Chun Kai Liu [11] 등은 플립칩 기반 고출력 LED에 열전소자의 펠티에 효과를 이용해 방열을 시도하였다. 열화상 카메라와 적분구를 이용해 기존의 방열방식과 방열성능을 비교하였다. LED(1W) 패키지의 광 효율은 열전소자 냉각기를 사용하지 않았을 때보다 사용할 경우 약 1.3배 증가하였고, 이때 열전소자의 입력 전력은 0.55 W 이다.

한상호 [12] 등은 열전소자를 사용하여 발광다이오드의 방열효과를 조사하였다. 열전소자의 냉각기능인 펠티에 효과를 이용하여, 고전력 발광다이오드의 방열과 p-n접합부의 온도를 제어하였다. 정격전류(350 mA)에 대한 1 W급 LED의 온도와 p-n접합부 온도는 각각 64.5℃와 79.1℃이었

다. 열전소자의 입력 전력 0.1~0.2 W에 대하여, LED의 온도와 접합부 온도는 각각 54.2℃와 68.9℃로 낮아졌다. 열전소자에 입력 전력을 0.2 W 이상으로 증가할수록, LED의 온도와 접합부의 온도가 상승하였다. 이는 열전소자에 의하여 흡수된 열이 LED로 역류하는 것이 원인이었다. 따라서 열전소자의 냉각기능을 유지하기 위하는 열의 역류를 제어해야 한다는 결론을 얻었다.

1.3 연구 내용

LED와 열전소자의 융합 측면에서는 열전 발전보다 펠티에 효과인 냉각 효과를 이용한 연구가 더욱 활발히 진행되어 왔다. LED조명에 열전소자를 적용시켜 폐열을 회수하는 연구는 현재 미비한 실정이며, LED조명에서 발생하는 폐열이 여전히 크므로 열전소자의 적용이 가능할 것으로 판단되었다.

LED 조명에 열전소자의 시 열전소자가 삽입됨으로 인해 열전달 경로에 방해요소가 될 것으로 예상되었다. 따라서 열저항 측정 장비를 이용하여 접합부에서 열전소자까지의 열전달 경로를 분석하였다.

다음으로 열전소자의 열저항 계산식으로부터 소자의 열저항을 도출하기 위해 발생된 기전력 및 저온부 고온부 온도를 측정하였다.

또한 열전소자 저온부 온도 변화와 고온부 온도변화에 따른 출력 기전력과 열저항을 분석해 Heat sink 설계에 활용하였다.

열전소자가 적용된 LED 엔진 모듈은 한국도로공사 표준에 부합하도록 설계하였으며, 열해석을 통해 열적 안정성을 확립하였다.

완성된 모듈은 적분구를 이용하여 광특성을 측정하였으며, 타사 모듈에 비해 광 효율이 10% 이상 향상된 우수한 광 특성을 가지는 것을 확인하였다.

제 2 장 관련 이론

2.1 LED(Light-Emitting-Diode) 조명

2.1.1 LED 조명의 특징

LED는 p형 반도체와 n형 반도체의 접합으로 이루어진 화합물 반도체이다. 반도체에 전류가 순방향으로 인가되면 p-n 접합부 즉 활성 층에서 전자와 정공의 발광 재결합이 이루어지면서 빛이 발생한다. 발광 재결합 효율이 높을수록 비 발광 재결합인 포논 발생이 낮아져 열 발생이 줄어들게 되며, 이를 위해 양자우물 구조와 같이 효율을 높이는 방안이 지속적으로 연구되고 있다.

LED는 GaN, InP, GaAs 등 3~5족 계열의 원소를 접합시켜 제조된다. 이 화합물의 구성에 따라 다양한 파장의 색을 구현할 수 있다. 단일 LED는 band-gap에 해당하는 파장의 단색광을 발광하므로, 청색 LED에 황색 형광체를 도포하여 백색광을 내게 하는 방법을 주로 이용한다. 이 방법 외에도 RGB(Red, Green, Blue) LED을 조합하거나, UV(Ultra Vialet) LED에 R, G, B 형광체를 사용하는 등 다양한 방법으로 백색광을 내도록 하고 있다.

LED는 기존의 형광등과 나트륨등 등과 비교해 에너지 효율이 우수하며 수명이 긴 장점을 가진다. 또한 크기가 매우 작고 동작이 용이하기 때문에 디자인적인 측면에서도 다양한 활용을 할 수 있는 장점을 가진다. 미국 DOE(department of energy)에 따르면 2010년 대비 LED 조명의 효율은 지속적으로 증가하여 2013년 약 50%가 개선되었으며 가격은 약 70%가 낮아진 것으로 보고하였다[13]. LED 조명의 성능은 앞으로도 개선될 것이며 사용이 점차 다양한 영역으로 확대될 것이다.

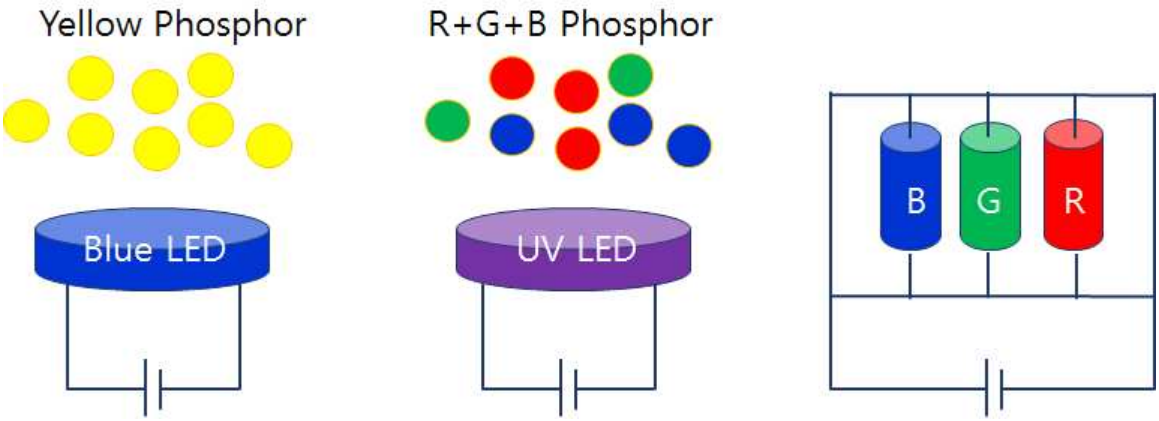

그림 2.1 백색 LED를 구현하는 다양한 방법

Fig. 2.1 Variety of ways to make the white LED

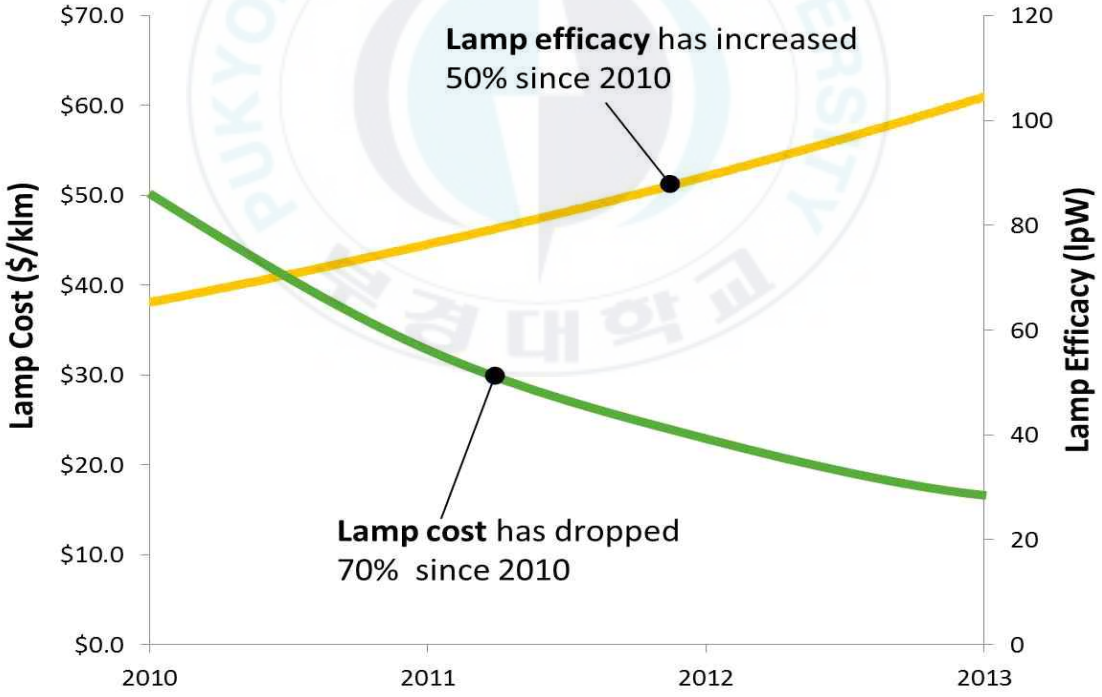

그림 2.2 60W LED램프의 가격과 효율 경향

Fig. 2.2 LED 60W lamp cost and efficacy trends

2.1.2 LED 조명의 열관리

발광소자인 동시에 발열소자인 LED는 유입되는 전류 중 약 39%의 에너지만을 빛에너지로 변환되고 나머지는 열에너지로 방출된다. 생성된 열은 LED 칩과 주변 회로에 영향을 미쳐 제품의 신뢰성을 떨어뜨리는 주요 원인이 된다. 실제로 LED 조명의 고장 발생에 있어 50% 이상이 발열에 의한 문제이고, 나머지는 습도, 진동, 충격, 먼지 등에 의해 나타난다 [14]. 따라서 LED 조명을 제작할 때 방열 설계는 필수적이다.

LED 조명에서 방열은 크게 부품 단계의 열 설계와 시스템 열 설계로 구분된다. 부품 열 설계는 사용되는 부품 및 소재의 방열 특성을 높여 기능을 강화하는 것이다.

LED 조명에서는 방열판, PCB, 케이스, 접착제, 페인팅 도료 등 사용되는 모든 소재가 제품의 방열 기능에 영향을 미친다. LED 칩에서 발생한 열이 PCB로 전도되고 이 열이 다시 방열판으로 이동한 후 공기와의 대류작용을 통해 외부로 빠져 나가는 과정에서 모든 부품에 열이 전도되기 때문이다. 따라서 우수한 방열 성능을 가지는 소재의 선택으로 제품을 제작하는 것이 중요하다. 또한 부품간의 접촉부분에서 발생하는 열저항도 방열에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 일반적으로 열저항은 PCB와 방열판을 접착시키는 점착 소재에서 크게 나타나는데, 점착물질의 열저항이 클 경우 열이 방열판으로 신속하게 전도되지 않고 내부에 잔재하게 된다. 이는 열전도율이 높은 점착소재를 선택하며 부착 시 공극이 생기지 않도록 부착하는 것이 중요하다.

방열판을 이루는 소재의 경우 같은 물질이라 할지라도 어떤 방식으로 금형이 제작됐느냐에 따라 방열특성을 달리하게 된다. 현재 LED조명 제품 대부분에는 알루미늄 방열판이 적용되는데, 알루미늄도 주물, 주조, 프레스, 다이캐스팅 등 금형 제작방식에 따라서 열전도성이 다르게 나타난

다. 방열판 설계 시 어떤 방식을 통해 제작을 하는 것이 유리한지를 판단한 후 설계 및 제작에 들어가는 것이 중요하다.

방열판으로 전도된 열은 공기의 대류작용을 통해 외부로 배출된다. 따라서 이 대류작용이 원활하게 진행될수록 제품의 방열특성은 향상되게 된다. 방열판과 공기가 만나는 면적이 많을수록 대류를 통한 열 방출량이 커지기 때문에 대부분의 방열판은 '핀'이라 불리는 요철형태의 구조를 가지고 있다. 핀의 설계에서 있어서는 핀의 두께 및 핀과 핀 사이의 간격의 최적치를 찾는 것이 방열설계의 중요 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 간격 뿐 아니라 두께를 적정하게 조율해 설계해야 한다. 위의 요소들을 방열 설계 시 고려하여 설계하고 제작하면 수명과 신뢰성이 향상된 LED 조명을 제작할 수 있다.

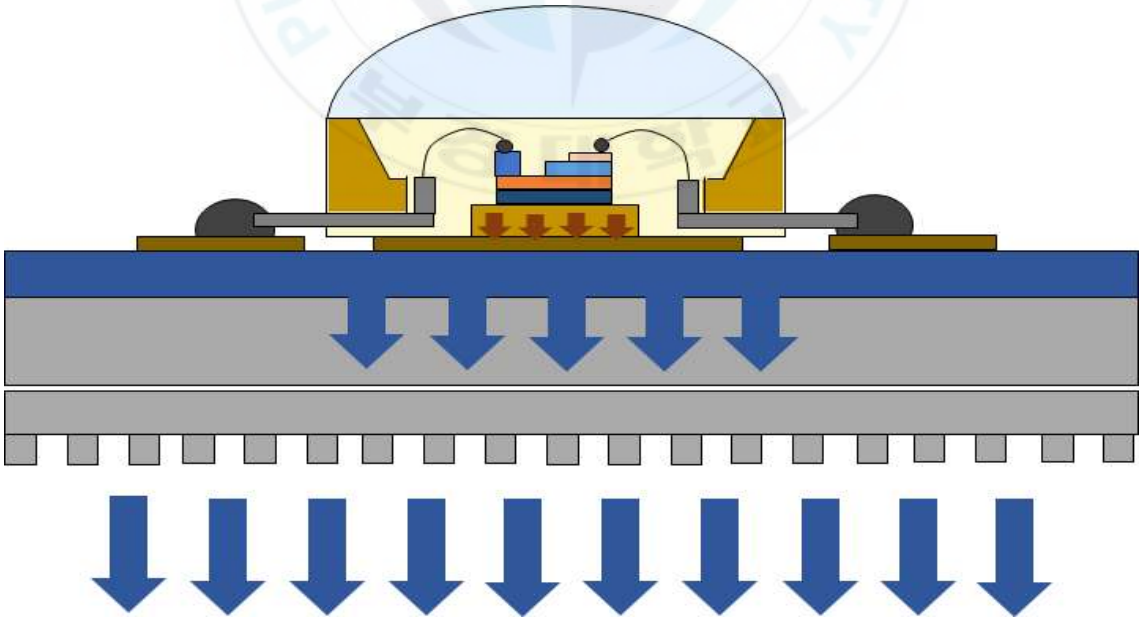

그림 2.3 LED 방열의 개념도

Fig. 2.3 Conceptual diagram of LED heat radiation

2.2 에너지 수확

일반적으로 에너지 수확 기술은 진동/운동 에너지, 열에너지, 빛 에너지, RF 에너지 등 주위의 버려지는 에너지를 전기 에너지로 변환하는 기술을 일컫는 말이다. 기술의 발전으로 기존 대형 전자기기가 소형화되고 있으며 이러한 소형 전자기기를 구동하는 에너지도 감소함에 따라 작은 규모의 소형발전에 대한 관심이 증가하고 있다. 이러한 소형발전에 대해 '에너지 하베스팅', 'Power harvesting' 또는 'Energy Scavenging'과 같은 용어로 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히 나노기술이 발전함에 따라 기존에 버려졌던 미세한 에너지까지도 효과적으로 수확할 수 있는 단계에 이르고 있다. 소형 발전의 주요 방식은 다음과 같다.

그림 2.4 에너지 하비스팅의 예

Fig. 2.4 Example of energy harvesting

2.2.1 태양광 발전(Photovoltaic)

태양광 발전은 태양의 빛에너지를 변환시켜 전기를 생산하는 발전 기술로 햇빛을 받으면 광전효과에 의해 전기를 발생하는 태양전지를 이용한 발전방식이다[15]. 태양광 발전시스템은 태양전지(solar cell)로 구성된 모듈과 축전지 및 전력변환장치로 구성되어 있다. n형 반도체와 p형 반도체의 접합부에 태양빛이 닿으면 태양빛은 태양전지 속으로 흡수되며, 흡수된 태양빛이 가지고 있는 에너지에 의해 반도체내에서 전자(-)는 n형 반도체 쪽으로, 정공(+)는 p형 반도체 쪽으로 모이게 되어 전위가 발생하게 된다. 앞면과 뒷면의 전극에 전구나 모터와 같은 부하를 연결하게 되면 전류가 흐르게 되는데 이것이 태양전지의 접합에 의한 태양광발전의 원리이다.

2.2.2 초전효과 에너지(pyroelectric energy)

단결정에 온도가 상승하면 결정내의 전하 배치가 변하여 분극이 생기는 현상을 초전효과라 하는데 초전형 적외선 센서, 초전형 온도센서 등에 유효하게 이용된다. 에너지 발전의 측면보다는 온도를 감지하기 위한 센서에 주로 사용된다[16].

2.2.3 압전효과 에너지(Piezoelectric energy)

압전체를 이용한 에너지 하베스팅 기술은 압전체에 기계적 변형이 인가되면 전기 에너지가 발생하는 효과를 이용하여 주위에 버려지는 힘이나 압력, 진동 같은 에너지를 사용 가능한 전기 에너지로 변환하여 주는 것을 말한다. 기존의 자석을 이용한 발전보다 작은 진동을 전기에너지로 변환하는데 용이할 뿐만 아니라 에너지 변환 효율 또한 높은 장점을 가지고 있다. 압전 현상이란 진동, 충격 등의 기계 에너지를 전기 에너지로 변환

하는 것으로 버너의 점화기, 센서 등에 적용되어 왔다. 그러나 점화기, 센서는 순간적으로 발생한 전기에너지를 감지하여 활용하는 것으로 순간적으로 발생한 미세한 전기에너지를 축적하여 언제든지 쓸 수 있도록 만든 에너지 하베스팅과 대비된다[17].

2.2.4 마찰전기 에너지(Triboelectric energy)

마찰 전기를 이용한 에너지 하베스팅 소자는 재료마다 어떤 두 물질이 접촉 할 때 각 물질에 유도되는 양 전하 혹은 음 전하 양이 차이가 나게 된다. 두 물질이 접촉할 경우 대전되는 양은 고정되어 있기 때문에, 우수한 특성의 재료를 선택하여 대전이 용이하게 될 수 있도록 해야한다. 접촉면의 형상 또한 소자 특성에 영향을 미치는데, 블록 혼성 중합체의 자가 조립을 이용하여 접촉면의 형상을 나노스케일로 제어하고, 마찰 특성을 조절하여 매우 향상된 소자 특성을 보고하였다[18].

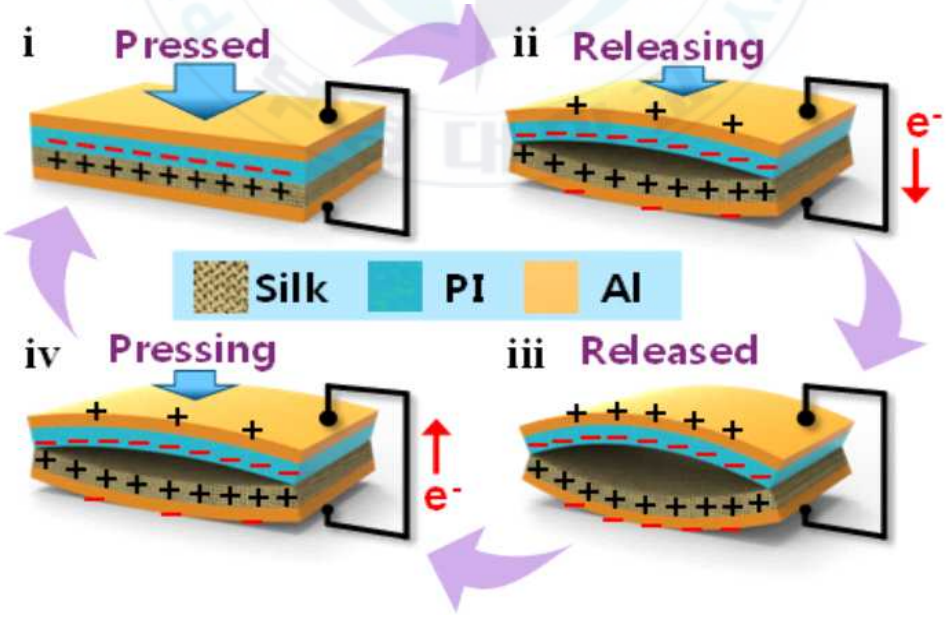

그림 2.5 마찰 전기 발전의 메커니즘

Fig. 2.5 Mechanism of triboelectric energy harvesting

2.3 열전소자

열전소자는 n형 반도체와 p형 반도체 열전소재를 전기적으로는 직렬로, 열적으로는 병열로 연결하여 만들고 여러 개의 소자를 사용 목적에 따라서 다양한 모듈로 제작하여 실제 제품으로 이용하고 있다[19]. 열전소자는 사용하는 특성 따라 크게 2가지로 나뉘는데 그 특성은 펠티에 효과(Peltier effect)와 제베크 효과(Seebeck effect)로 대표된다.

2.3.1 펠티에 효과(Peltier effect)

열전발전분야보다 먼저 상용화된 기술로 열전냉각 기술로 불리는 펠티에 효과는 물리학자 Peltier에 의해 발견되었다. 서로 다른 두 금속선의 양 끝을 접합시키고 전류를 흘려주면 한쪽 접합부에서는 발열, 다른 접합부에서는 흡열이 일어나며 전류의 방향에 따라서 흡열과 발열이 반대로 일어난다. 펠티에 효과에 따른 열전발전 기술은 다음과 같은 장점이 있다.

(1) 온실가스를 유발하는 냉매가스를 대체할 수 있다.

(2) 냉각에 필요한 가스 압축기가 없어 compact 시스템을 구현할 수 있어 진동과 소음이 없다.

(3) 0.1 ℃ 수준의 정밀한 온도 제어가 가능하며 고밀도 냉각이 가능하다[20].

2.3.2 제베크 효과(Seebeck effect)

제베크 효과는 Tomas Johann Seebeck에 의해 발견된 현상으로 서로 다른 금속을 접합시켜 한쪽 접점에 온도를 가하면 발생하는 온도차에 의해 전기가 유도되는 현상을 말한다. 두 세라믹 기판에 온도 차이가 발생될 때, n형 반도체에서는 고온부에서의 전자가 높은 에너지 상태로 여기

가 된다. 그 전자는 에너지를 낮추기 위해서 저온 측으로 확산하게 되어 저온부는 (-)로, 고온부는 (+)로 대전이 되어 전계가 형성된다. 이 때 평형상태를 유지하기 위한 전압이 발생하여 전자의 흐름을 방해하게 되는데, 그때의 전압을 출력전압으로 사용하는 것이 열전발전의 원리이다. p형 반도체의 경우 반대로 저온부가 (+), 고온부는 (-)로 대전이 되어 n형과 반대의 방식으로 전압이 형성된다. 이와 같은 제베크 효과에 의한 기전력은 식 (2.3.1)과 같다.

$$V_s = \alpha \triangle T \tag{2.3.1}$$

식 (2.2.1)의 α는 제베크 계수로 소자에 사용되는 물질마다 다른 제베크 효과 특성을 가져 고유한 값을 가지고 있다. 제베크 계수는 구성하는 반도체의 길이가 짧을수록, 면적이 넓을수록 저항이 최소화되기 때문에 큰 값을 얻을 수 있다. 제베크효과를 나타내는 열전소자의 성능(ZT)을 식 (2.2.2)와 같이 나타낸다. ZT값은 제베크 계수(α)와 전기전도도(σ), 열전도도(k)와 함께 절대온도(T)를 곱하여 무 차원의 값으로 표현된다. 성능지수 값이 클수록 열전발전 효과가 크다[21].

$$ZT = \frac{\alpha \cdot \sigma}{\kappa} T \tag{2.3.2}$$

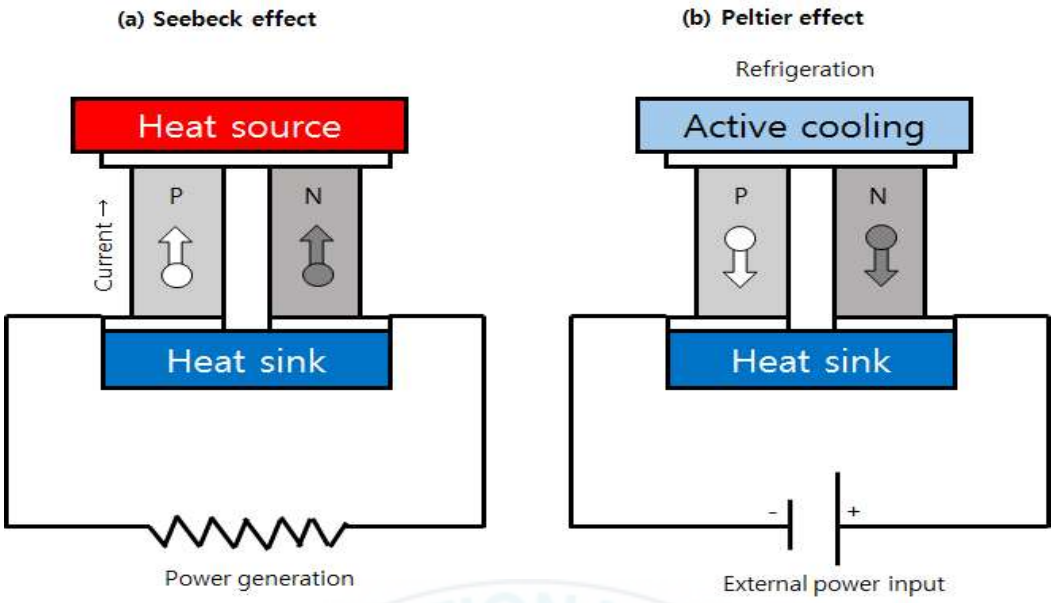

그림 2.6 열전소자의 에너지 변환의 동작 원리 (a)제베크 (b) 펠티에 효과

Fig. 2.6 The operating principle of thermoelectric energy conversion (a) Seebeck (b) Peltier effect

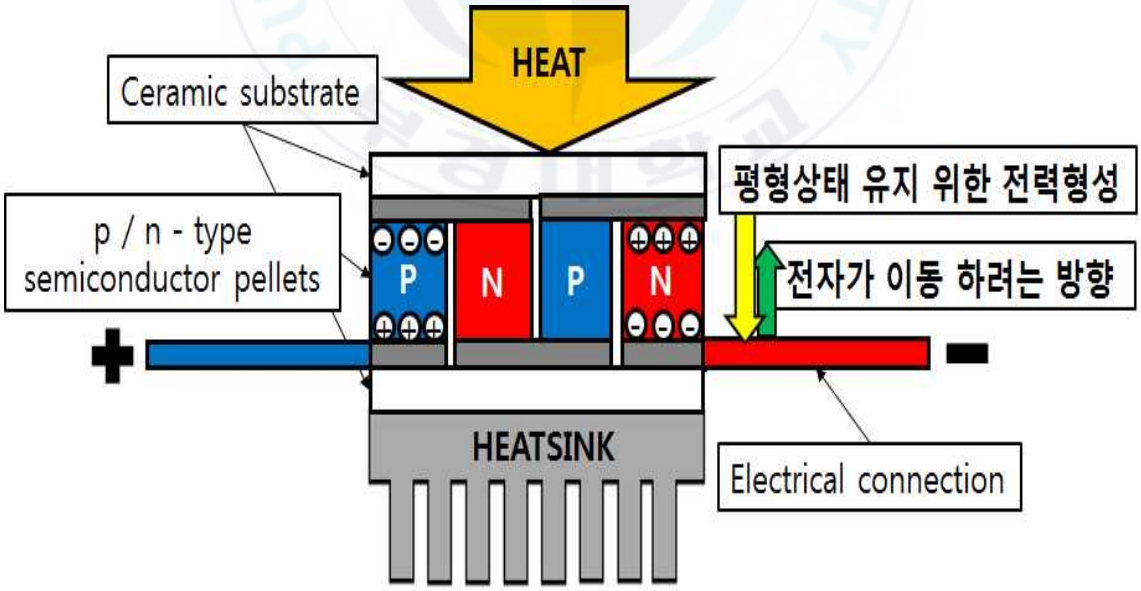

그림 2.7 열전소자의 제베크효과

Fig. 2.7 Seebeck effect of thermoelectric device

열전성능지수의 분자항목 $\alpha \cdot \sigma$ 을 열전재료의 파워펙터(power factor)로 나타낸다. 캐리어의 농도에 따라 제베크 계수는 작아지지만 전기전도도는 증가하며 파워펙터는 농도 1019 cm-13 부근에서 주로 최댓값을 갖는다. 따라서 일반적으로 열전소재를 사용하는 물질은 부도체와 도체 사이의 반도체상태가 최적화된 ZT값을 갖게 된다. n형으로 사용되는 물질은 주로 Bi2Te3, p형은 Sb2Te3가 200℃ 이하의 범위에서 가장 널리 쓰인다.

열전소자를 제베크 효과를 이용해 발전으로 사용하는 경우 다음과 같은 장점이 있다.

(1) 모터 등의 가동부가 없어 수명이 길다.

(2) 폐열을 전기로 변환시킬 수 있어 온실가스를 저감시킬 수 있다.

(3) 출력 밀도가 높아 소형, 경량으로 휴대기기의 전원으로 적합하다.

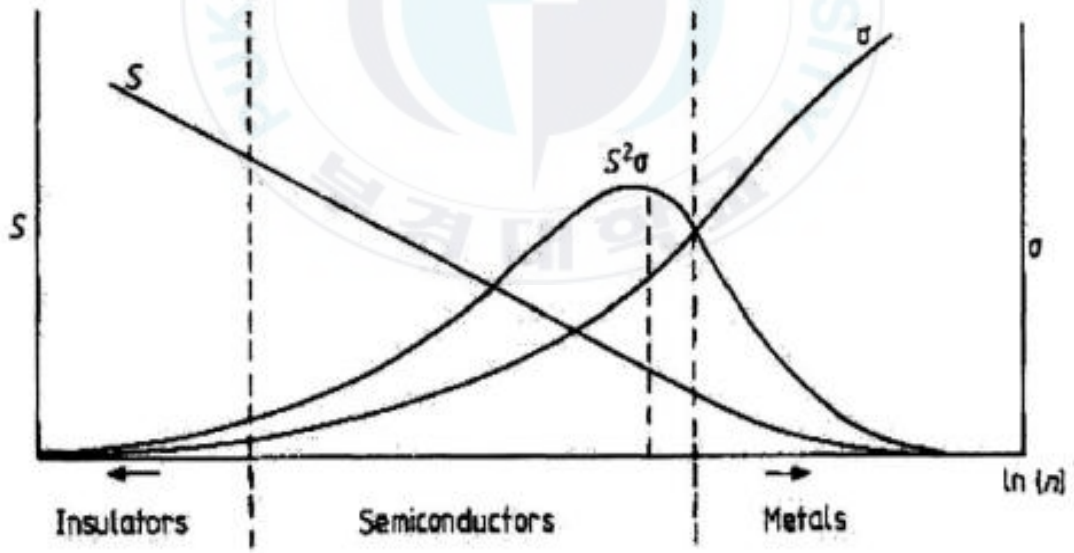

그림 2.8 열전재료의 캐리어 농도에 따른 특성[22]

Fig. 2.8 Characteristic of thermoelectric materials by changing the concentration of carrier [22]

2.3.3 열전소자의 최대 전력

열전소자의 제베크계수는 식(2.3.3) 과 같이 p형과 n형 열전물질 각각의 제베크계수 절댓값의 합으로 표현된다. 열전소자의 내부저항은 열전재료를 연결하는 전극의 저항이 매우 작아 무시할 수 있으며 각각의 저항의 합으로 표현되어 식(2.3.4)처럼 표현될 수 있다.

$$\alpha = |\alpha_p| + |\alpha_n| \tag{2.3.3}$$

$$R = r_p + r_n \tag{2.3.4}$$

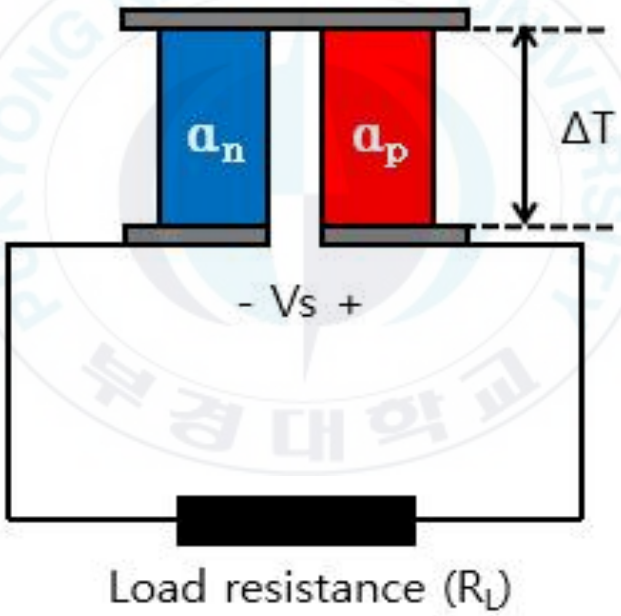

그림 2.9 한 개의 열전쌍으로 구성된 열전소자와 부하저항

Fig. 2.9 Thermoelectric device consist of one thermal element and load resistance

열전소자의 발전출력에서 최대 전력 점은 Maximum transfer theorem[20]을 통해 부하저항 RL에 대한 최대전력을 구할 수 있다. 열전소자에서 발생한 전류는 옴의 법칙에 따라 식(2.2.5)과 같고 이 때 발생되는 전력은 식(2.3.6)로 정리될 수 있다. 전력은 R에 관한 2차식으로서 표현되므로 이 식에서 R에 대해 식(2.3.6)을 미분하여 값이 0이 되는 부분을 찾으면 전력이 최대가 되는 점을 알 수 있다. 계산을 통해 식(2.3.6)의 미분된 식은 R=RL일 때 0 이 됨을 알 수 있다. 따라서 전력이 최대가 될 때는 소자 고유의 내부저항 값과 부하저항 값이 동일할 때 이며 부하저항에 의해 발생하는 전력 P는 다음 식 (2.3.7)과 같다.

$$I = \frac{\alpha \times \Delta T}{(R + R_L)} \tag{2.3.5}$$

$$P_L = V \times I = I^2 R_L = \frac{(\alpha \times \Delta T)^2}{(R + R_L)^2} \times R_L \tag{2.3.6}$$

$$P_{\max} = \frac{1}{4} \frac{(\alpha \times \Delta \mathrm{T})^2}{R} = \frac{1}{4} \frac{(V_s)^2}{R} \tag{2.3.7}$$

그림 2.10는 부하변동에 따른 열전소자의 전압과 전류 특성을 보여주는 그래프로, 소자의 내부저항과 외부 부하가 같아질 때 개방회로전압(Voc)과 단락회로전류(ISC)가 절반이 되며 최대 전력을 얻을 수 있다[23]. 열전소자의 일반적인 출력 특성 그래프를 그림 2.11에 나타내었으며 최대 전력 점은 내부저항과 부하 저항이 동일할 때 나타난다.

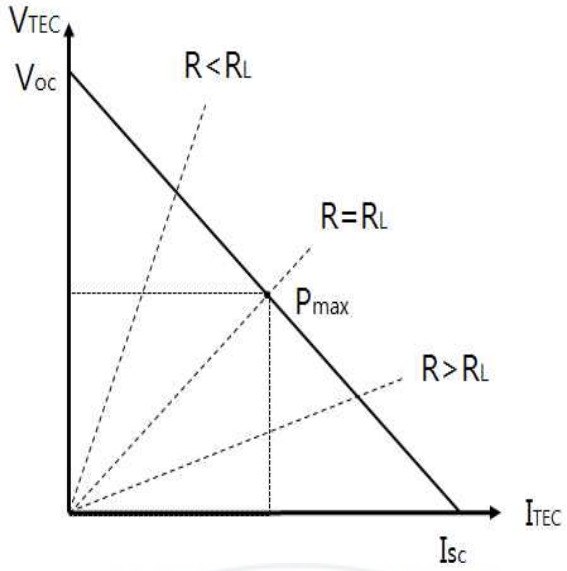

그림 2.10 열전소자의 I-V 출력 그래프

Fig. 2.10 Output I-V curve of thermoelectric device

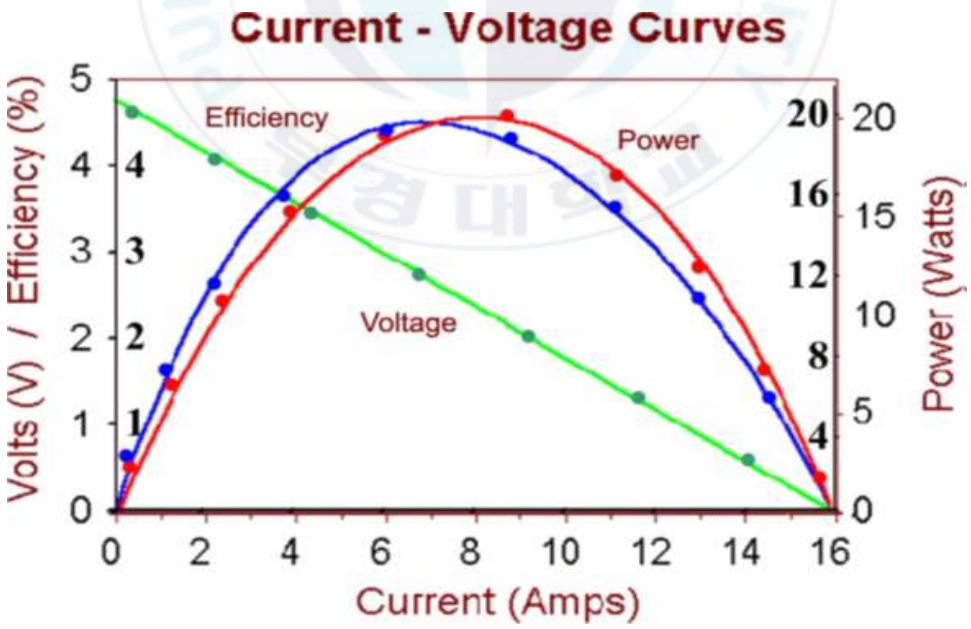

그림 2.11 열전소자의 일반적인 발전 특성 그래프

Fig. 2.11 Typical power characteristic of the thermoelectric devices

열전소자는 외부 환경의 온도변화에 따라 내부저항 값이 변화하는데 열전소자의 사용가능한 온도범위를 벗어날 때 내부저항이 불안정하게 변화되어 최대전력을 추적하는 것이 어려워진다. 따라서 열전소자의 사용가능한 온도범위를 미리 파악해서 범위 내에서 소자를 사용하는 것이 중요하다. 열전소자의 최대 출력전력을 얻기 위한 다른 방안은 전체 면적에 균일한 온도 분포를 가지는 것이다. 고온부 기판과 열 생성부의 불균일한 접촉은 전면에 균일한 온도분포를 갖지 못하게 하고 열전달이 집중적으로 이루어지는 영역과 열전달 소외지역을 생성시켜 출력을 저하시킨다. 저온부와 Heat sink의 불균일한 접촉은 원활한 열 방출이 일어나지 않아 저온부의 온도가 상승하게 되고, ΔT가 상승해 결과적으로 출력이 낮아지게 된다[22].

2.4 열저항

2.4.1. 열전소자의 열저항

열전소자의 모델과 열저항 및 온도 등가모델을 그림 2.12에 나타내었다. Th는 열전소자 고온부 세라믹 기판 표면 온도, Tc는 열전소자 저온부 세라믹 기판 표면 온도, Thj는 접합부와 흡열 기판 사이의 접합온도, 그리고 Tcj는 접합부와 냉각 기판 사이의 접합온도를 의미한다.

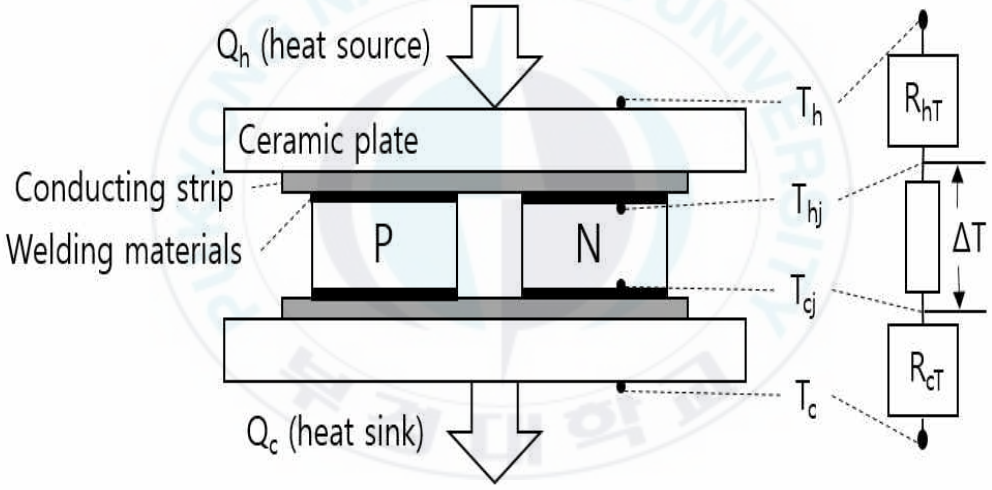

그림 2.12 열전소자의 구조에 따른 열저항 등가모델

Fig. 2.12 The schematic structure of Thermoelectric device with corresponding thermal resistance and temperature

열전소자의 고온부 세라믹 기판에서 접합부까지의 열저항 (R_{hT})은 다음의 식을 만족한다.

$$R_T = R_{ct1} + R_{cd2} + R_{ct3} + R_{cd4} + R_{ct5} + R_{cd6} + R_{ct7} \tag{2.4.1}$$

여기서,

R_{ct1} = 열원과 세라믹 기판 사이의 열저항 [K/W]

R_{ct3} = 도체 띠의 열저항 [K/W]

R_{ct7} = 반도체 접합부 열저항 [K/W]

R_{cd2} = 세라믹 기판의 열전도 저항 [K/W]

R_{cd4} = 도체 띠의 열전도 저항 [K/W]

R_{cd6} = 용접 물질의 열전도 저항 [K/W]

을 의미한다.

열전소자는 고온부와 저온부가 구조적으로 동일하므로 R_{hT} 값은 저온부 세라믹 기판에서 접합부까지의 열저항(R_{cT})과 동일하며, 이는 전체 열저항 (R_{TEG})과 값이 동일하다.

열저항은 일반적으로 열을 가해준 후 열 분포를 각 층별로 측정해야 한다. 하지만 실제로 각각의 온도를 측정하기가 어렵고 재료의 열전도도 분석을 통해 계산하는 방식은 실제 값과 매우 차이가 나게 된다. 따라서 다음의 변환 과정을 통해서 열전소자의 전체 열저항을 구할 수 있다[24]. 열전소자의 고온부 흡열량(Q_h)과 저온부 열 방출량(Q_c)은 아래의 식을 만족한다.

$$T_h = T_{hj} + Q_h R_{hT} = T_{hj} + Q_h R_T \tag{2.4.2}$$

$$T_c = T_{cj} - Q_c R_{hT} = T_{cj} - Q_c R_T \tag{2.4.3}$$

식 (2.3.2)에서 (2.3.3)를 빼면

$$T_{hj} - T_{cj} = (T_h - T_c) - (Q_h + Q_c) R_T. \tag{2.3.4}$$

의 식을 만족하게 된다.

저온부의 열방출량은 실제로 측정이 어렵기 때문에 에너지 보존 법칙에 따라 측정이 쉬운 흡열량으로 변환이 가능하다. $Q_c = Q_h - P_0$ 식에서 열전소자가 오픈 회로 상태가 되면 열전소자에 입력되는 전력 P_0는 0 이 되어 흡열량은 최종적으로 입력되는 열량과 동일한 $Q_c = Q_h = Q_{input}$가 성립되게 된다. 그러므로 열전소자의 출력전력은 다음의 식을 만족하게 된다.

$$V_{oc} = n\left[\alpha_P(T_m) - \alpha_N(T_m)\right](T_{hj} - T_{cj}) \tag{2.4.5}$$

$$= n\alpha_{PN}(T_m)(T_{hj} - T_{cj})$$

$T_m = (T_h + T_c)/2$은 열전소자 물질의 참조 온도이며, $\alpha_P(T)$와 $\alpha_N(T)$은 p와 n형 반도체의 제베크 계수이다. 저온 접합부에서 재료 a로부터 b로 전류가 흐르도록 열기전력이 발생하는 경우 α는 양(+)의 값을 갖는다고 정의하고 이러한 재료를 주 전하운반자가 정공인 p형의 성질을 나타낸다. 반대로 전류의 방향이 재료 b에서 a로 흐를 경우 α는 음(-)의 값을 갖고 주 전하 운반자가 전자인 n형의 성질을 나타낸다.

$$R_T = \left[(T_h - T_c) - \frac{V_{oc}}{n\alpha_{PN}(T_m)} \right] / (Q_h + Q_c) \tag{2.4.6}$$

$$= \left[(T_h - T_c) - \frac{V_{oc}}{n\alpha_{PN}(T_m)} \right] / (2Q_{input})$$

열전소자의 전체 열저항은 식 (2.4.6)과 같이 표현되며, 위의 변환의 과정을 통해 측정이 쉬운 Q_{input}, V_0 그리고 세라믹 기판의 표면온도의 값만을 가지고도 전체 열저항 계산이 가능하다.

2.4.2. LED의 열저항과 구조함수

LED 조명의 접합온도(T_j) 및 열저항(R_T)을 측정하는 방법은 일반적으로 JEDC-51-1 표준에 제시된 방법을 따른다[25]. 접합온도를 측정하는 방법은 직접 측정 방식과 전기적 측정 방식 두 가지가 있다. 직접 접합부에 열전대를 부착해서 측정하는 직접측정 방식은 부착부위가 크고 열전대로 빠져나가는 열이 있기 때문에 정확도가 떨어지는 단점이 있다. 따라서 두 번째 방법인 전기적 측정 방식을 주로 이용한다. 전기적 측정 방법은 온도에 민감한 요소 TSP(Temperature Sensitive Parameter)를 사용해 접합온도를 추정하는 방법이다. 일반적으로 순방향전압(V_F)은 온도에 의해서 값이 변하는데 이 순방향 전압이 온도에 민감한 요소이다. 미세한 전력이 칩에 구동될 경우에는 접합부분에서는 열 발생이 최소화되기 때문에 $T_j = T_a$가 된다. 이 원리를 이용하여 접합온도를 추정하기 위한 방법은 다음과 같다. LED에 미세전류를 흘려주고 주위의 온도를 변화시켰을 때의 전압 변화를 측정하여 온도와 전압 사이의 관계 계수인 K-factor를 구한다. 그 후 LED에 정격 전류를 흘려주어 LED를 가열하고 온도가 안정화 되는 시점에 도달하면 미세전류를 흘려 온도를 환경온도까지 식혀준다. 이 과정의 I_F와 V_F값 변화를 그래프로 그려보면 그림 2.13과 같다.

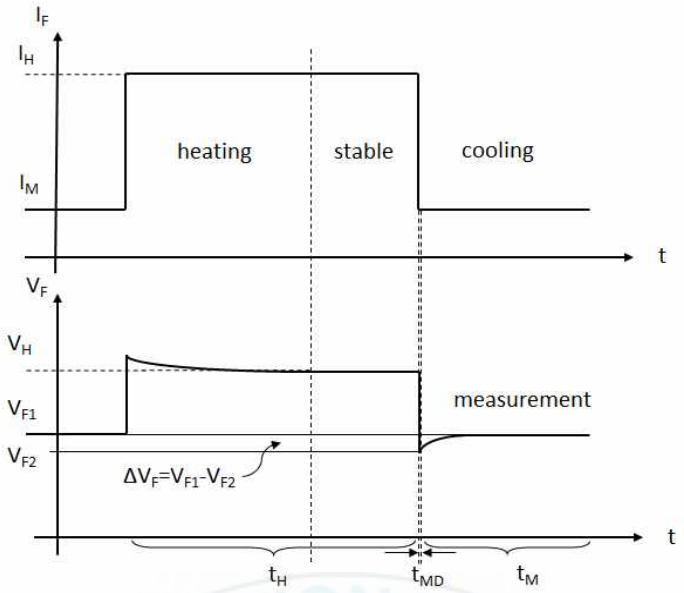

그림 2.13 LED 전류변화에 따른 전압 변화 그래프

Fig. 2.13 Waveform of voltage changes in LED current variation

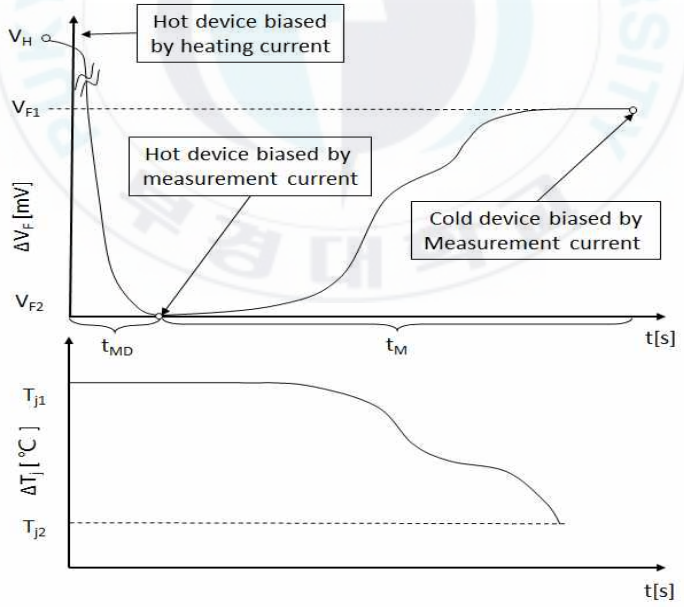

그림 2.14 LED에 미세전류 인가 시 전압과 접합온도 변화

Fig. 2.14 Change of the voltage and the junction temperature over time when micro-current drive in LED

전류가 변하는 시점에서의 전압 값 변화로 ΔV_F를 구할 수 있다. 식 (2.4.7)은 LED의 접합온도를 구하는 식이다. ΔT_j는 앞서 구한 K-factor를 식 (2.4.8)의 K에 대입하여 구할 수 있으며 이 값을 식 (2.3.7)에 대입하여 최종 접합온도를 구할 수 있다.

$$T_j = T_a + \triangle T_j \tag{2.4.7}$$

$$\triangle T_j = K \cdot \triangle V_F \tag{2.4.8}$$

LED의 열저항은 식 (2.4.9)과 같이 접합온도와 다른 위치의 온도인 참조 온도 차이를 LED 소비 전력으로 나눈 값이다. 하지만 참조온도를 직접 측정하는 것 또한 어렵다. 그러므로 주위 환경 온도가 변해 접합온도가 변하더라도 열저항은 변하지 않는 점을 적용해 서로 다른 온도 환경에서 접합온도를 측정한 값의 차이를 각각의 소비전력의 차로 나눠 열저항을 구할 수 있다. 그 유도 과정을 식 (2.4.10)-(2.4.12)에 나타내었다.

$$R_T = \frac{T_j - T_x}{P_H} \tag{2.4.9}$$

$$T_j = R_T \cdot P_H + T_x \tag{2.4.10}$$

$$\begin{array}{rl} & T_{j1} = R_T \cdot P_{H1} + T_x \\ - & T_{j2} = R_T \cdot P_{H2} + T_x \\ \hline & T_{j1} - T_{j2} = R_T \cdot (P_{H1} - P_{H2}) \end{array} \tag{2.4.11}$$

$$R_T = \frac{T_j(t_2) - T_j(t_1)}{P_{H2} - P_{H1}} \tag{2.4.12}$$

LED의 열저항을 구하는 과정으로부터 LED의 내부 구조를 추정할 수 있다. LED 정격전류에서 미세전류로 변환 시 전압 V_F는 곧바로 직각형태로 떨어지지 않고 약 10 μs 정도의 시간 동안 선형적으로 떨어지게 된다. 떨어지는 delay 시간을 제외하고 그 이후의 시간부터 접합온도가 환경온도에 도달할 때까지의 시간(t_M)동안 1 μs 단위로 V_F값의 변화와 접합온도 변화를 기록하여 그래프를 얻으면 그림 2.14와 같다. 시간에 대한 접합온도 변화 그래프는 thermal transient curve 라고 하며 이 그래프의 값을 바탕으로 미분, 역 필터링, 이산화 등 수학적 과정을 거쳐 구조함수(Structure function)를 얻을 수 있다. 구조함수는 LED내부의 열 경로를 따라 부분별 열저항과 열용량 값을 추정할 수 있으며 그림 2.15과 같이 임피던스 모델(Impedance causer model)을 그려 구조의 쉬운 분석이 가능하다. 이 과정을 통해 LED 패키지의 내부 구조뿐만 아니라 LED에 부착된 PCB나 Heat sink 까지의 열저항 및 열 전달 경로의 추정이 가능하다.

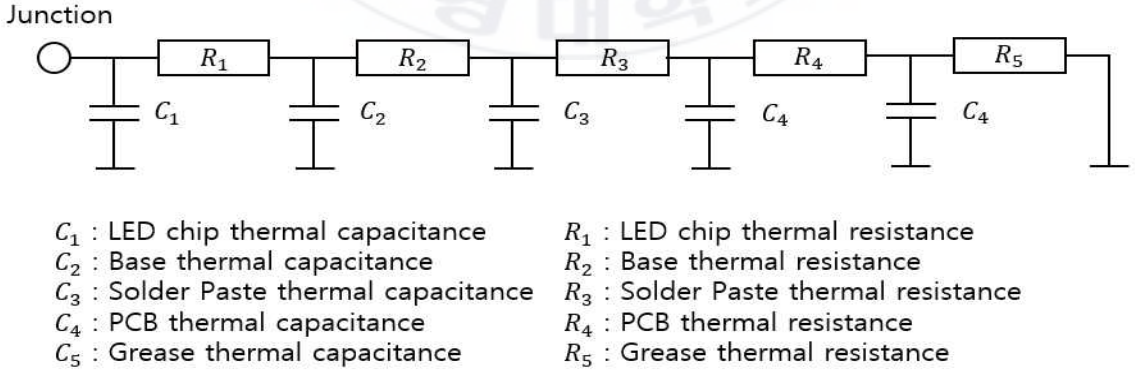

그림 2.15 LED 광학엔진모듈의 임피던스 모델

Fig. 2.15 Impedance causer model of LED module

앞선 열저항 및 접합온도 측정 방법은 열저항 측정 장비와 프로그램에 의해 쉽게 측정과 계산이 가능하다. 열저항 측정 장비는 Mentor Graphics 사의 T-3ster로 반도체 패키지의 Thermal Transient 측정을 통해 실제 가열 또는 냉각 곡선을 측정하며, 매우 정확한 범위의 온도 측정 (0.01℃) 및 1 μs 단위의 측정 해상도를 제공한다. 이 측정 방식은 LED 반도체 소자에만 국한되지 않고 대부분의 반도체 소자의 열저항과 구조함수 추정에 사용이 된다.

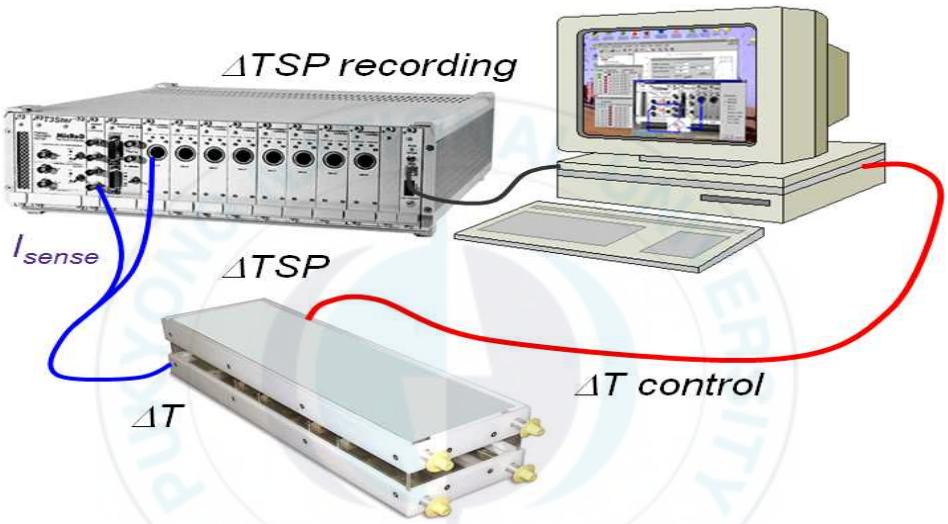

그림 2.16 열저항 측정 시스템 (T-3ster)

Fig. 2.16 Thermal resistance measurement system (T-3ster)

제 3 장 실험방법

3.1 LED 광학엔진모듈의 설계 및 제작

국내에서 생산되는 LED 조명은 제조사별로 부속품의 형식, 구성, 특성 등이 다르다. 따라서 설치 후 부속품 고장 시 호환성 부족으로 유지보수가 어렵다는 문제점을 가진다. 한국도로공사에서는 이 문제에 대비해 LED 조명등기구의 표준을 제정하여 보급하였다[26]. 이에 맞추어 한국도로공사 표준에 맞게 등기구 모듈을 제작하기 위해 미국 Philips lumileds사의 luxeon TX Package 10개를 사용하여 회로를 구성하였고, PCB는 구리 재질을 사용해 방열 성능을 높였다. 사용된 패키지는 광효율이 약 140 lm/W 으로 우수한 패키지를 사용하였다.

LED 광학엔진 모듈의 광학적 특성의 측정은 광전자정밀사제 적분구(직경 2m, 모델 OPI-100)를 이용하여 총광속, CCT, CRI, 광효율 등을 측정하였다.

소자의 형상과 성능을 그림 3.2와 표 3.1에 나타내었다. 제작된 모듈은 기존의 한국도로공사 표준에 맞게 제작되어 납품되고 있는 타 사의 제품 2개와 비교해 보았다. 비교 항목은 광학적 특성과 열적 특성을 비교하였다.

그림 3.1 제작된 LED 광학엔진모듈

Fig. 3.1 Home-made module of LED lighting for this study

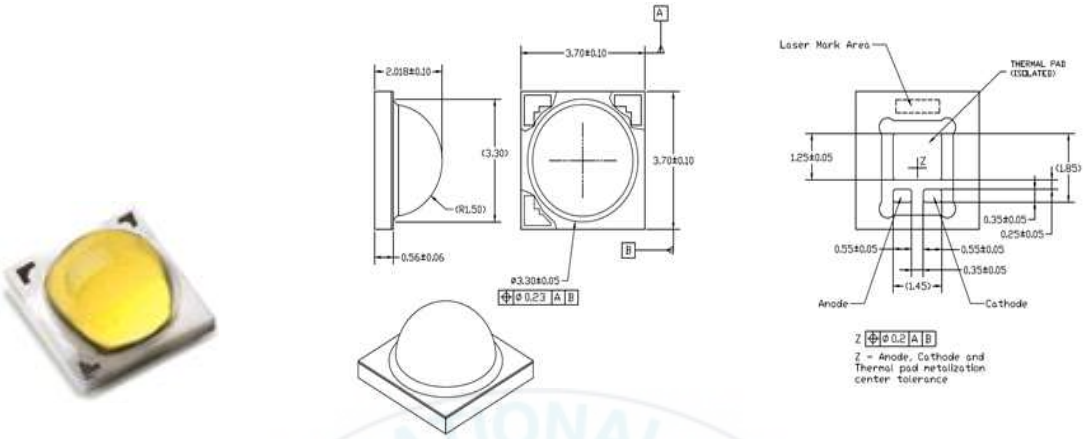

그림 3.2 실험에 사용된 LED 패키지(Philips lumileds luxeon TX)

Fig. 3.2 Used LED Package in experiments(Philips lumileds luxeon TX)

표 3.1 실험에 사용된 LED 패키지의 성능

Table 3.1 Specification of LED package used in experiments

CCT	CRI	Luminous flux [lm]	Forward voltage [V]	Efficiency [lm/W]
5700	70	275	2.8	140

Temperature Coefficient of Forward Voltage [mV/℃]	Thermal Resistance Junction to Thermal Pad [℃/W]
-1.6	3

자체 제작된 모듈의 적분구를 이용한 광학적 특성 측정 결과는 다음과 같다.

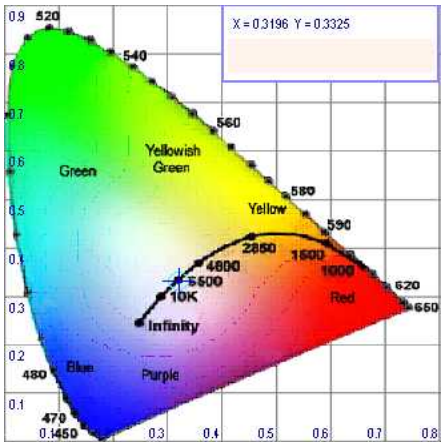

그림 3.3 자체 제작 LED 광학엔진모듈의 색좌표

Fig. 3.3 Color coordinates of the home-made LED module

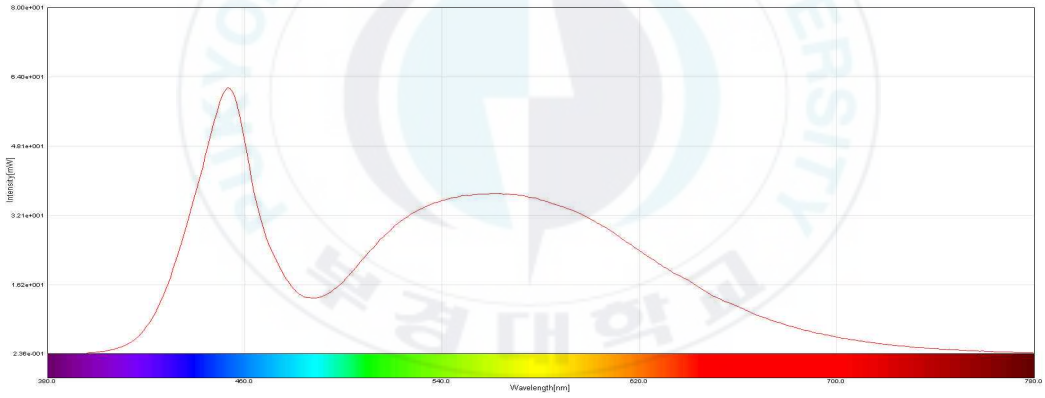

그림 3.4 자체 제작 LED 광학엔진모듈의 스펙트럼

Fig. 3.4 Spectrum of the home-made LED module

표 3.2 자체 제작 모듈의 광학적 특성

Table 3.2 Characteristic of the home-made LED module

Luminous flux [lm]	CCT	CRI	Efficiency [lm/W]	Forward voltage [V]	Forward current [A]	Power [W]
2855.4	5857.5	76	124.4	28.6	0.7	20.0

다음으로 타사 제품의 광 특성 측정 결과는 다음과 같다.

표 3.3 기존 업체 모듈의 광학적 특성

Table 3.3 Characteristic of the corporate LED module

Type	Luminous flux [lm]	CCT	CRI	Efficiency [lm/W]	Forward voltage [V]	Forward current [A]	Power [W]
A	2253.2	5932	76.4	107.2	30.0	0.7	21.0
B	2375.1	5741.7	76.4	112.0	30.3	0.7	21.2

광 특성 측정 결과 기존의 시중에 납품되는 모듈과 비교하였을 때 자체 제작된 모듈의 광 효율이 10-20 lm/W 더 높게 측정되었다. 이는 자체 제작된 모듈의 광 특성이 기존 모듈과 비교하였을 때 열적 특성이 보다 개선된 모듈로 설계되었다는 것을 알 수 있다.

광학적 특성과 더불어 열 특성 또한 측정을 하여 비교하였다. Mentor graphics 사의 열저항 측정 장비 T-3ster를 이용하여 접합 온도와 열저항을 비교하였다. 측정 결과를 그림 3.5와 표 3.4에 나타내었다. 삼각형 그래프는 자체 제작된 LED 광학엔진 모듈이며, A 제품은 사각형, B 제품은 원형 그래프이다. 측정 결과 자제 제작 모듈의 열저항이 0.95 K/W로 가장 낮고 접합 온도 또한 43.55 ℃로 가장 낮게 측정되었다. 광학성 특성뿐만 아니라 열 특성까지 우수하게 모듈이 설계된 것을 확인할 수 있었다.

표 3.4 각 모듈의 접합온도와 열저항

Table 3.4 Junction temperature of each module

Type	hand-made	A	B
Thermal resistance [K/W]	0.95	1.42	1.01
Junction temperature [℃]	43.55	56.35	46.42

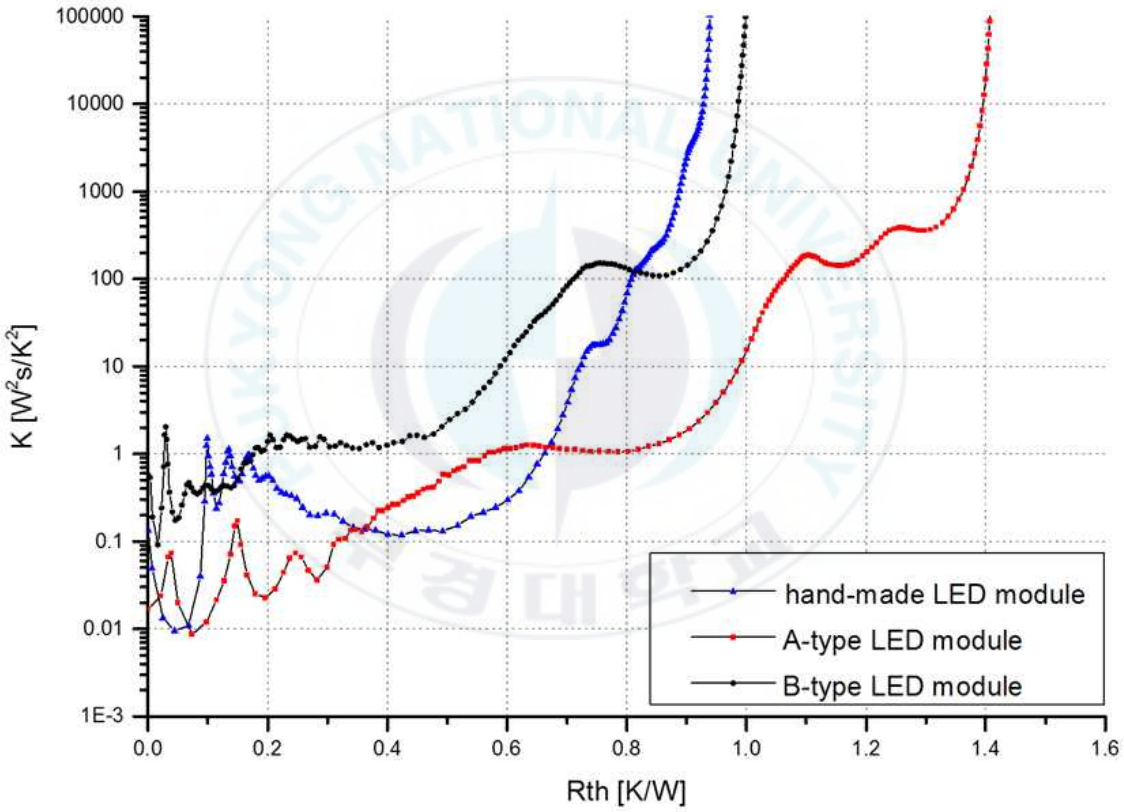

그림 3.5 각 모듈의 구조함수 측정 결과

Fig. 3.5 Differential structure function of each module

3.2 열전소자의 선정

3.2.1 열전소자 실험 방법

다양한 열전소자 중 조명에 적용하기 위한 열전소자를 선정하기 위해 열전소자의 성능 분석을 분석하였다. 성능을 분석하기 위한 실험은 세 가지 방향으로 진행되었다.

첫 번째로 열전소자는 소자에 사용되는 재료에 따른 발전 특성이 달라질 것으로 예상되어, 소자의 크기는 동일하지만 내부 저항 값이 다른 소자 3개를 선택 후 발전 특성을 비교하였다. 열전소자는 중국 Wellen Tech(www.wellentech.com)사의 TEC1-12704, TEC1-12704, TEC1-12706을 구입하여 실험에 사용하였다.

두 번째로 열전소자가 PCB에 닿는 면적이 발전에 영향을 미치는 정도를 파악하기 위해 열전소자의 개수에 따른 발전 특성을 실험하였다. 두 번째 실험에 사용된 열전소자는 상대적으로 크기가 작은 Lairdtech사의 50690-502 소자를 선택하여 여러 개의 소자를 부착할 수 있도록 하였다.

마지막으로 열전소자의 상단부와 하단부의 온도차에 따른 발전 특성 실험을 위해 Heat sink 방열 유무에 따른 발전량을 측정하였다. 각각 사용된 열전소자의 스펙은 다음과 같다.

표 3.5 실험에 사용된 열전소자의 성능

Table 3.5 Specification of thermoelectric device used in experiments

Name	Company	Size [mm]	couples	$Q_{C\ max}$ [W] $\Delta T=0$	ΔT_{max} [℃] $Q_{C=0}$
TEC1-12704	Wellen Tech	40 x 40 x 4.5	127	36.8	70
TEC1-12705		40 x 40 x 4.5		46.5	70
TEC1-12706		40 x 40 x 4.5		53.3	70
50690-502	Lairdtech	30 x 30 x 4.7	71	18.7	68

실험실의 온도는 25 ℃로 유지하고, 자체 제작된 LED모듈에 Keithley 2420 source meter를 PCB에 연결시켜 정전류 700 mA로 전압을 인가하였다. LED에서 발생된 열로 발전된 열전소자의 전류와 전압 값은 KIKUSUI사의 PLZ1000A 모델 DC (Direct Current) Electric load를 이용해 부하에 걸리는 전압과 전류 값의 최댓값이 되는 지점의 전력 값을 측정하였다.

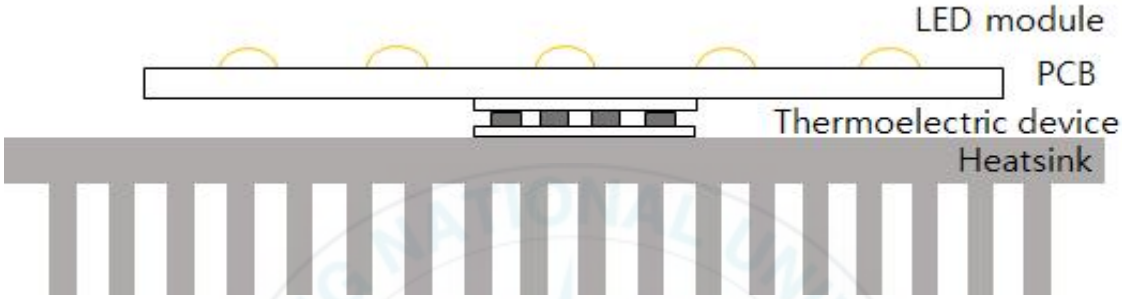

그림 3.6 LED 광학엔진모듈의 출력전력 측정을 위한 실험 구성
Fig. 3.6 Schematic diagram of LED module for measuring power generation characteristics

그림 3.7 열전소자 발전량 측정을 위한 전자 로드
Fig. 3.7 Electronic load for measuring generated power in thermoelectric devices

3.2.2 열전소자 예비 실험

열전소자의 크기는 동일하지만 내부 저항 값이 서로 다른 3가지 종류의 소자를 사용해 측정한 발전량을 표 3.1에 나타내었다.

열전소자의 종류가 달라짐에 따라 발전되는 전력량이 달라지는 원인을 파악하기 위해, 소자 양단의 온도차(ΔT)가 0인 조건에서 최대 입력 전압인 15.4 V를 걸어주었을 때 저온부에서의 최대 흡열량을 바탕으로 분석해 보았다.

$$Q_c = \alpha T_c I - \frac{1}{2} I^2 R - \kappa \triangle T \tag{3.2.1}$$

식 (3.2.1) 은 최대 흡열량을 구하는 식으로 k 값은 재료의 열전도도 값이며, ΔT=0인 조건이므로 소거가 되는 값이다. 소자에 대해서 제베크계수를 계산한 결과 발전량이 가장 높은 TEC1-12704의 제베크계수가 0.051 V/K로 가장 높았고, 다음으로 TEC1-12706이 0.049 V/K이었다. 열전 발전량은 제베크계수가 높을수록 클수록 높아짐이 확인되었고, 높은 출력을 얻기 위해서는 제베크계수가 높은 소자를 선택하는 것이 중요하다.

다음으로는 열전소자가 LED PCB에 닿는 면적이 발전에 영향을 미치는 정도를 파악하기 위해 열전소자 50690-502의 개수에 따른 발전 특성을 비교하여 결과를 표 3.7에 나타내었다. 소자 하나를 사용한 경우가 2개, 3개를 사용한 것보다 발전량이 높은 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 발생된 열이 소자 하나에 집중되지 못하고 여러 개의 소자로 분산되어 전달이 되어 상단부의 온도가 낮아져 발전량이 낮아진 것으로 판단된다.

세 번째로 Heat sink를 열전소자에 부착했을 경우와 부착하지 않은 경우의 발전 특성을 비교한 결과를 표 3.8 에 나타내었다. 열전소자의 개수와 면적의 비교 데이터를 볼 때 소자와 PCB가 닿는 면적이 작을수록 열전발전에 유리한 것으로 판단되었다.

표 3.6 열전소자 종류에 따른 발전량

Table 3.6 Power generation of thermoelectric device by the change of material of device

Type	Generated power [W]
TEC1-12704	0.046
TEC1-12705	0.026
TEC1-12706	0.043

표 3.7 열전소자 개수에 따른 발전량

Table 3.7 Power generation of thermoelectric device by the change of number

Number of thermoelectric device	Generated power [W]
1	0.062
2	0.043
3	0.031

표 3.8 히트싱크 유무에 따른 발전량

Table 3.8 Comparison of thermoelectric generation by the presence of heat sink

With/ without heat sink	Generated power [W]
without	0.009
with	0.062

Heat sink를 열전소자에 부착하지 않은 경우 발전량이 부착한 경우에 비해 현저하게 떨어지는 것을 알 수 있는데, 소자 양단의 온도차가 발전특성에 큰 영향을 미치는 것으로 알 수 있다. 따라서 열전소자 하단부에 Heat sink와 같은 방열장치를 설치하여 상하 온도차를 유지시킬 수 있는 장치가 필요하다.

각 예비 실험의 결과를 분석해 볼 때, 열전소자의 발전량이 높아지는 요소는 다음과 같다. 첫 번째로 열전소자의 제베크계수가 높을수록, 두 번째로 PCB와 닿는 면적이 작을수록 열이 집중되어 발전량이 증가한다. 마지막으로 열전소자의 하단부의 방열을 통해 상 하단부의 온도 차이가 높을수록 발전량이 커진다. 최대 전력을 생성하는 실험의 결과는 열전소자의 크기가 가장 작은 소자인 50690-502를 사용한 모듈이 0.062 W의 출력 전력을 얻을 수 있었다.

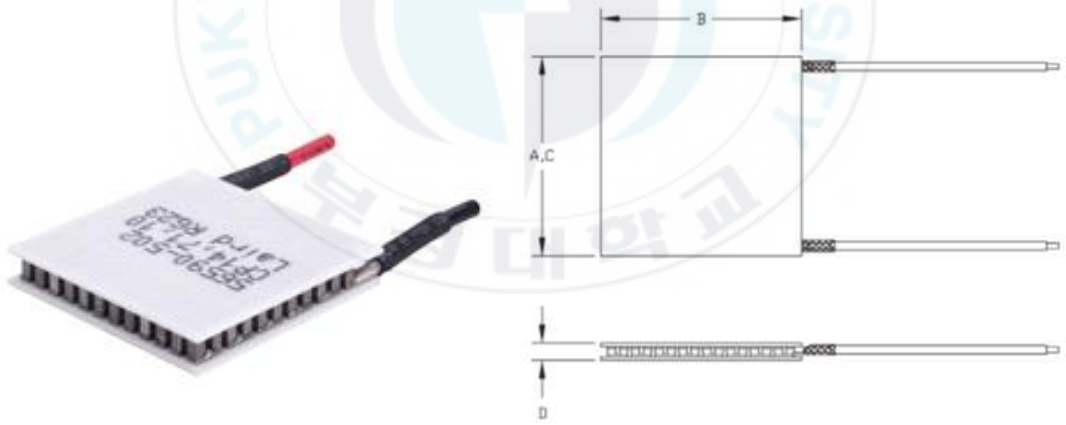

그림 3.8 최종 선정된 열전소자 (50690-502)

Fig. 3.8 The final selected thermoelectric device (50690-502)

3.3 열전소자 삽입형 LED 엔진모듈 설계

3.3.1 열전소자의 열저항 특성 실험

열전소자의 열저항을 구하는 식을 이용해 조명에 적용된 열전소자의 열저항을 구하기 위해 앞서 제작된 LED 광학엔진모듈과 선정된 열전소자를 사용하여 다음 그림 3.9과 같이 실험을 구성하였다. 열전소자의 고온부에는 LED 광학엔진모듈을 부착하였으며, Thermal grease(OMEGATHERM 201)를 이용해 계면에서의 공극 발생을 최소화 하여 열전달이 이루어지도록 제작하였다.

LED에는 Power Source(KITHLEY 2420)로부터 전압을 인가하였다. 열전소자의 고온부의 온도를 변화시키면서 온도차(ΔT)를 형성하며 발전 전력 측정을 위해 인가되는 전압을 조절하여 고온부 온도를 조절하였다. 설정된 온도 차를 유지하기 위해서 보조적으로 LED 인가 전력 또는 thermostat(Julabo) 온도를 미세조정 하였다. 열전소자의 저온부의 온도를 변화시키면서 온도차를 형성하고, 발전 전력을 측정하기 위해 하단부에 thermostat을 이용해 저온부 온도를 조절하였다. 또한 열전소자는 thermal insulator를 설치하여 열손실을 최소화 하였다.

열저항 계산에 필요한 온도데이터는 온도 기록계를 이용하여 고온부와 저온부의 온도를 수집하였고 열전소자의 발전량은 Digital Multimeter(Fluke 287)를 이용해 측정하였다. 또한, LED의 p-n접합온도와 구조함수, 열전소자 적용 시 각 층별 열저항 분석을 위해 열저항 측정장비 (T-3ster)를 이용해 JEDC-51 규격에 제시된 방법으로 열저항을 측정하였다. LED 광학엔진모듈 자체의 열저항과 구조함수를 먼저 구하여 변곡점을 파악한 후, 열전소자를 부착한 LED 광학엔진모듈을 사용하여 변곡점 변화로 부터 열전소자 계면의 열저항을 산출하였다.

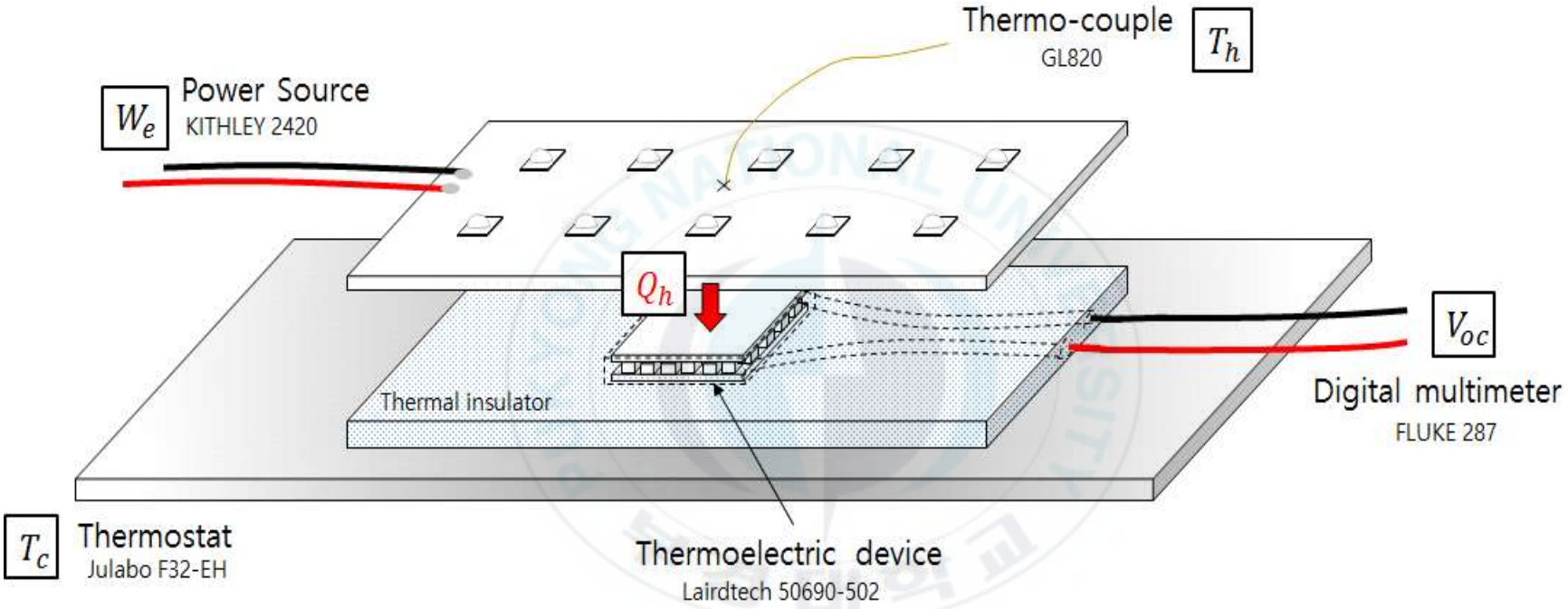

그림 3.9 온도에 따른 열전소자 내부 열저항 측정 실험 장치

Fig. 3.9 Schematic diagram of experiment about measuring internal thermal resistance of thermoelectric device

3.3.2 LED 엔진 모듈의 열특성 실험

열전소자가 LED 광학엔진모듈에 삽입되면 열전달 경로에 열저항으로 작용이 되며, 이는 LED 조명에서 광특성 저하의 원인이 된다. 따라서 광출력 저하의 최소화와 발전 전력의 최대화가 요구된다. 이를 위하여 열전소자 하단부에 설치할 heat sink의 방열설계를 실시한 후 그림 3.11과 같은 LED 엔진 모듈을 제작하였다. LED 엔진 모듈은 한국도로공사 표준 LED 조명등기구 에 맞춰 크기를 설정하였다. LED에서 발생한 열이 열전소자를 통해 heat sink로 전달될 수 있도록 LED PCB와 PCB submount는 최소한으로 접촉하고, PCB submount 속에 thermal insulator와 열전소자를 설치하여 LED PCB와 열전소자가 직접 접촉하도록 설계하였다.

열전소자 하단부에 설치되는 heat sink는 방열은 ANSYS Icepak software를 이용하여 열해석을 실시한 후 방열효과가 극대화 되는 조건으로 제작 하였다. 최적의 값을 찾기위한 열 시뮬레이션 조건은 주위온도 25 ℃, 자연대류, 중력가속도 -9.78 g/m^{2}로 설정 후 진행하였다. 열해석 시 heat sink의 핀의 형상은 판형으로 하고, 핀의 두께(0.5~4 mm)와 개수(5~24 개)를 실험변수로 하여 시뮬레이션 한 후, 최적 조건의 형상으로 heat sink를 제작하였다.

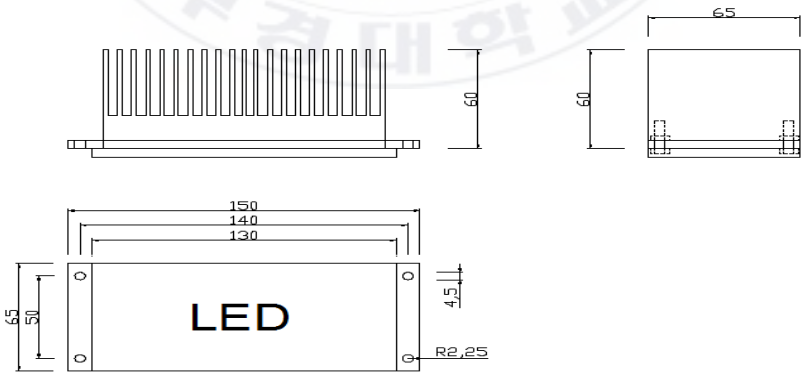

그림 3.10 한국도로공사 표준 LED 광학엔진모듈 외형 치수 요구사항

Fig. 3.10 Dimensions of Korea expressway corporation standard requirements about LED module

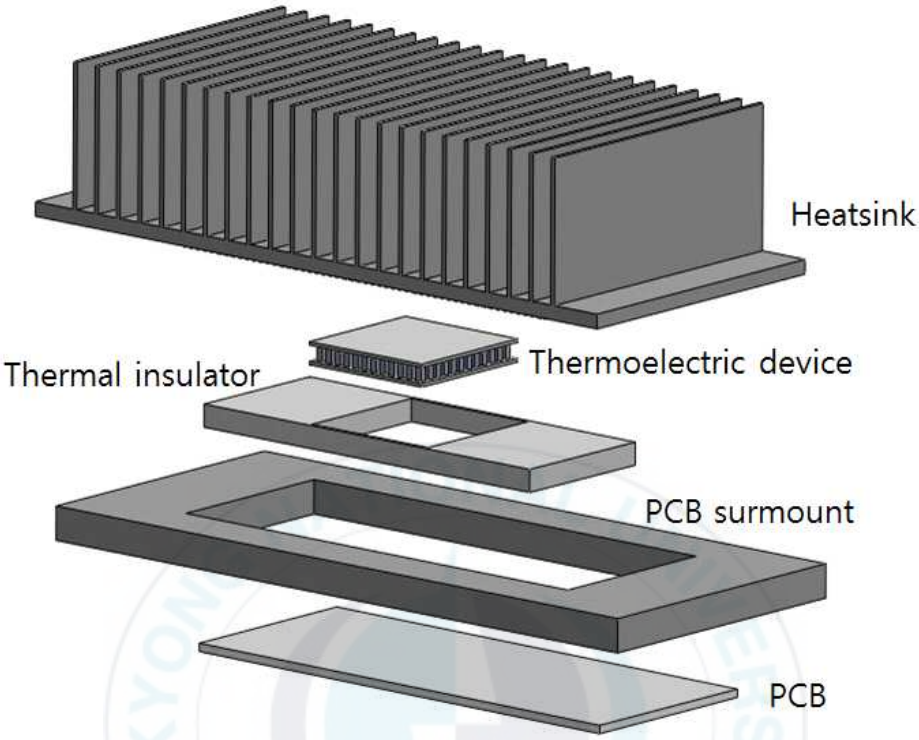

그림 3.11 열전소자가 적용된 Heat sink 형상

Fig. 3.11 Heat sink of LED module for applying thermoelectric module

제 4 장 실험 결과 및 고찰

4.1 열전소자 온도변화에 따른 열저항 변화

LED 광학엔진모듈에 인가되는 전류를 증가시켜 고온부의 온도를 높여주고 저온부의 온도를 상온 온도인 298°K 로 고정시켰을 때의 결과를 표 4.1에 나타내었다.

열량 Q_h는 LED에서 발생하여 열전소자 고온부로부터 유입되는 열량으로, 적분구를 이용해 입력 전력에서 광 출력을 제외한 측정값으로부터 계산하였다.

$$W_{소비전력} = W_{광출력전력} + W_{열손실전력}(Q_h) \tag{4.1.1}$$

열전소자 제베크계수 α는 $V_{oc} = \alpha \cdot \Delta T$ 으로부터 계산된 값이다. V_{oc}는 측정한 열전소자의 개방회로 기전력 값이고, 측정된 V_{oc} 및 Q_h로부터 최종 열저항인 R_{TE}값을 산출하였다. T_j는 LED p-n 접합온도이며 접합부에서 주위 환경온도까지의 차이 값을 나타내었다. T_h는 열전소자와 LED PCB 간의 온도, T_c는 열전소자와 heat sink 간의 온도, T_m은 열전소자의 참조온도, ΔT는 T_h-T_c간의 온도차 이다.

열전소자 저온부의 온도변화에 따른 열저항의 변화를 측정하기 위해 고온부 온도를 333°K로 고정시킨 후 thermostat로 온도를 낮추면서 온도 및 출력전력을 측정한 결과 표 3.10에 나타낸 것처럼 저온부 온도가 낮아질수록 열저항이 증가하는 것을 알 수 있었다.

LED 광학엔진모듈에 인가되는 전류를 증가시켜 고온부의 온도를 높여주고 저온부의 온도를 상온 온도인 25℃로 고정시켰을 때의 결과를 표 4.2에 나타내었다. 고온부의 온도는 LED로 입력되는 전류를 조절하여 높였다. Q_h는 열전소자 고온부로 유입되는 열량으로, 적분구 측정 장비를 이용해 입력 전력에서 광 출력을 제외한 값으로 계산하였다.

표 4.1 고온부 온도(T_h) 변화에 따른 출력 전력 변화와 열저항 값

Table 4.1 Result of measured and calculated data at the T_h increasement experiment

T_j	T_h	T_c	T_m	ΔT	measured		calculated	
					V_{oc}	Q_h	α	R_{TE}
9.9	303	298	300.5	5	0.14	1.6	0.0005	1.273
27.9	313	298	305.5	15	0.38	4.6	0.0013	1.528
41.1	323	298	310.5	25	0.57	6.7	0.0019	1.794
56.7	333	298	315.5	35	0.79	9.6	0.0025	1.772

표 4.2 저온부 온도(T_c) 변화에 따른 출력 전력 변화와 열저항 값

Table 4.2 Result of measured and calculated data at the T_c decreement experiment

T_j	T_h	T_c	T_m	ΔT	measured		calculated	
					V_{oc}	Q_h	α	R_{TE}
23.9	333	328	330.5	5	0.17	4.2	0.0006	0.176
35.3	333	318	325.5	15	0.39	6.0	0.0014	0.495
46.8	333	308	320.5	25	0.61	8.1	0.0020	1.485
56.7	333	298	315.5	35	0.79	9.6	0.0025	1.772

4.2 열저항 측정값 분석

열저항 측정 장비 T-3ster를 이용해 LED 광학엔진모듈의 접합온도와 구조함수를 측정한 결과 접합온도는 43.6 ℃ 이었으며, 그림 4.1 에 측정된 구조함수를 나타내었다. 구조함수에서 변곡점으로부터 각각 계면의 열저항 값을 알 수 있었다. 각각의 열저항은 표 4.4에 나타내었으며 단위는 K/W이다.

LED 광학엔진모듈 하단부에 열전소자를 부착한 후의 구조함수를 측정한 결과, 표 4.3과 같이 LED의 접합온도는 73.7 ℃로 상승하였다. 구조함수는 그림 4.2에 나타난 것처럼 변곡점이 증가하고 열전소자 부분의 열용량이 증가하였다. 각 계면에서의 열저항(R_T)은 표 4.5에 나타내었고 단위는 K/W이다. 그림 4.3은 구조함수 2개를 결합시킨 것으로 삼각형 그래프가 열전소자가 삽입된 모듈의 구조함수이다. 열전소자를 사용하지 않는 LED 엔진모듈의 열저항과 열전소자 자체의 열저항을 더한 값은 2.654 K/W로써 열전소자를 사용하여 측정한 LED 엔진모듈의 전체 열저항 값 2.41 K/W와 근사 값을 가지는 것으로 나타났다.

$$R_T(\text{열전소자 삽입 후 엔진모듈의 열저항}) \tag{4.2.1}$$

$$\fallingdotseq R_{TE}(\text{열전소자 자체의 열저항})$$

$$+R_T(\text{열전소자 삽입 전 엔진모듈의 열저항})$$

$$2.41 \fallingdotseq 1.704+0.95=2.654\,[K/W]$$

표 4.3 LED 엔진 모듈의 정격 전류 인가 시 열저항

Table 4.3 Measurement and calculated data of experiment model elements by inputting the rated current

T_j	T_h	T_c	T_m	ΔT	measured		calculated	
					V_{oc}	Q_h	α	R_{TE}
73.7	340	298	319	42	0.98	12.03	0.0031	1.704

표 4.4 LED 광학엔진모듈의 각 계면의 열저항

Table 4.4 Thermal resistance of each interface in LED module

	LED	base	solder	PCB	Air
R_T	0.09889	0.13512	0.16809	0.74643	0.947

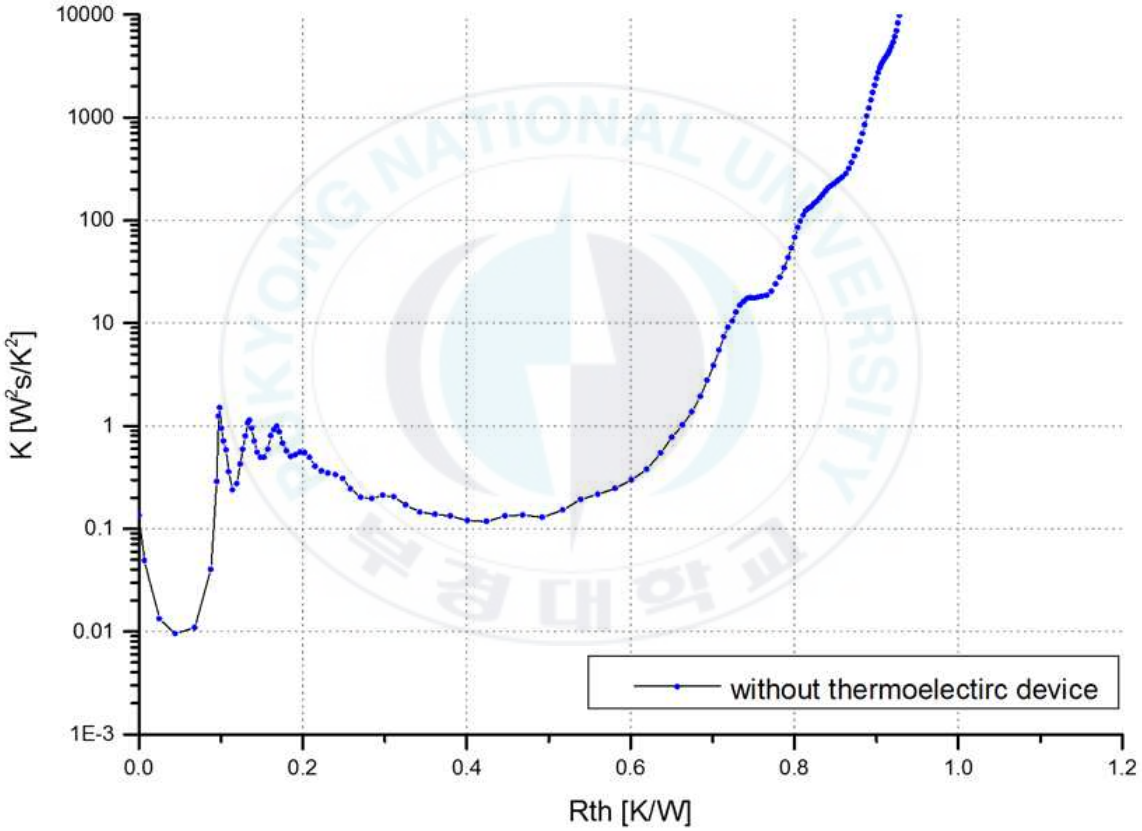

그림 4.1 LED 광학엔진모듈의 구조함수

Fig. 4.1 Differential structure function of LED module

표 4.5 LED모듈에 열전소자가 부착된 모듈의 각 계면의 열저항

Table 4.5 Thermal resistance of each interface with thermoelectric device

	LED	base	solder	PCB	TEM	Air
R_T	0.09758	0.13353	0.16172	0.71698	0.87747	2.41370

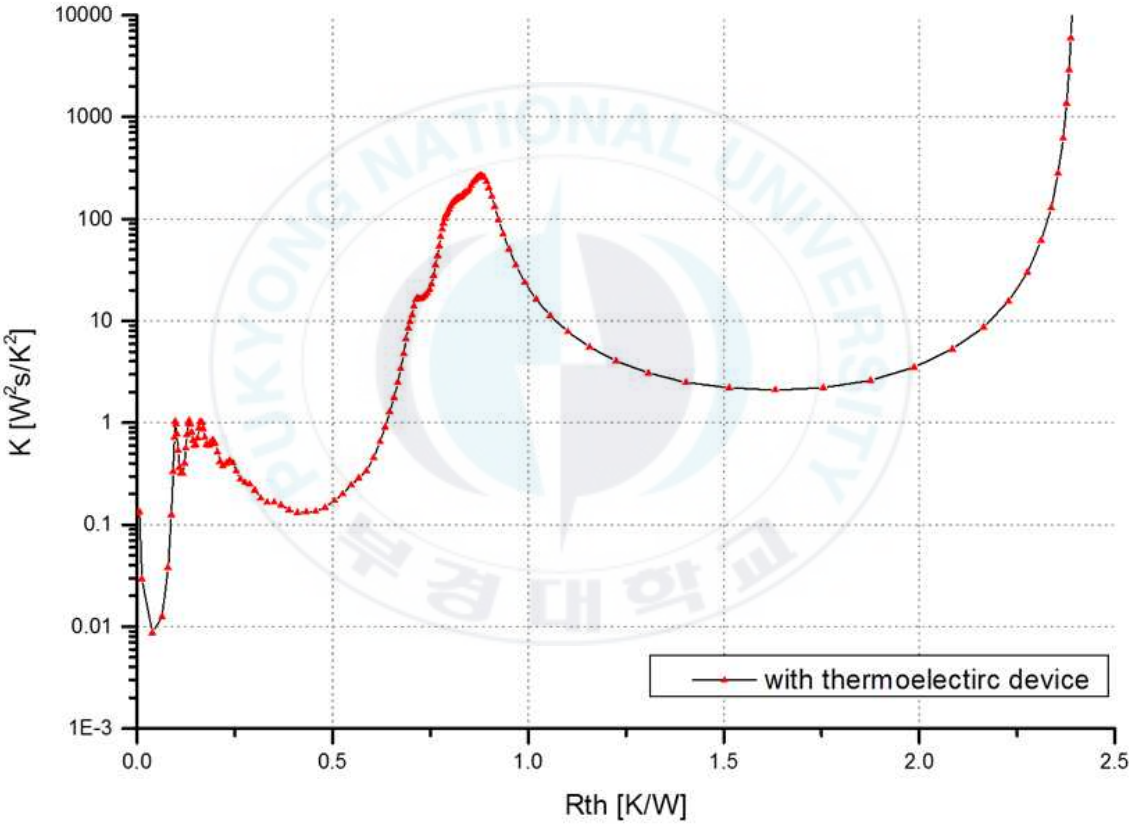

그림 4.2 LED 광학엔진모듈에 열전소자가 부착된 구조함수

Fig. 4.2 Differential structure function of LED module with thermoelectric device

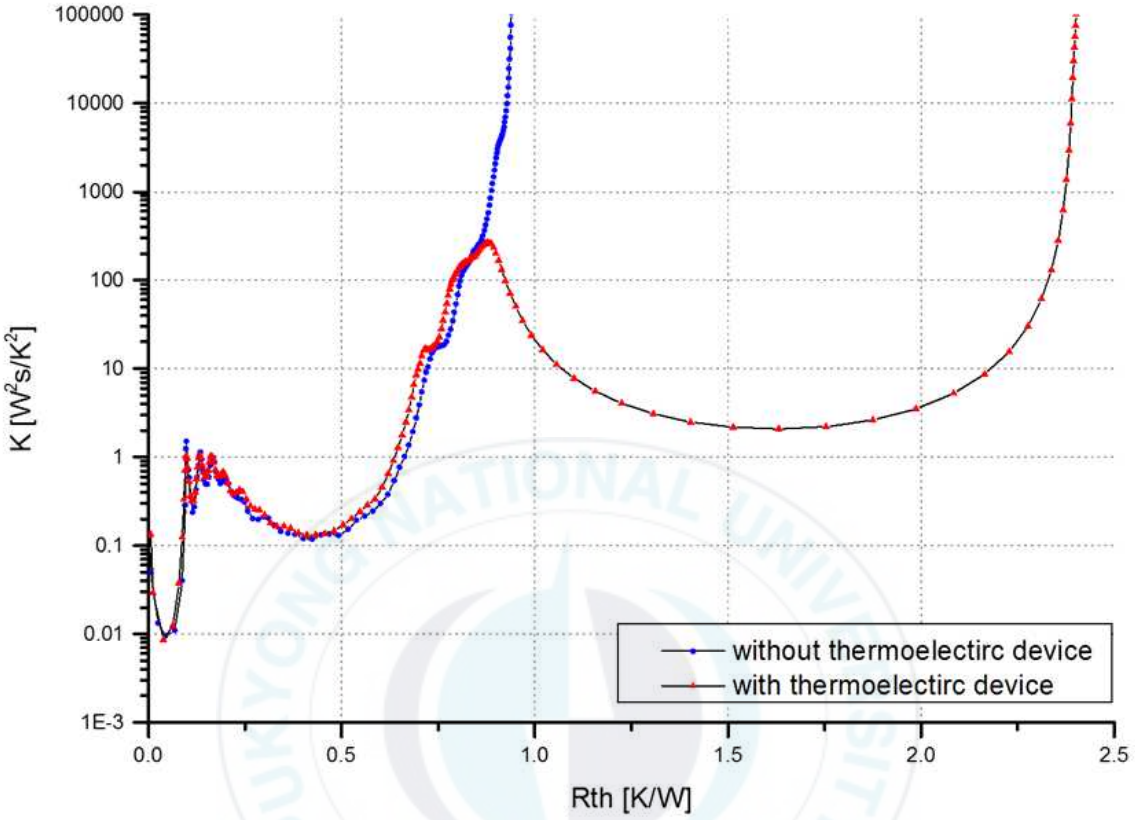

그림 4.3 LED 엔진 모듈의 구조함수

Fig. 4.3 Differential structure function of LED lighting engine module

고온부 온도를 변화시키거나 저온부 온도를 변화시킬 때의 온도는 기전력 V_{oc} 값에 큰 영향이 없었으며, 온도차(ΔT)가 형성이 되면 기전력이 발생하였다. 표 4.1과 4.2로부터 고온부 온도를 높이게 되면 LED p-n 접합온도 증가의 폭이 크며 이는 조명의 수명을 감소시키게 된다. 따라서 고온부 보다는 저온부 방열 특성 향상을 통해 열전소자의 기전력과 광 출력을 높이는 것이 조명의 측면에서 유리하고 판단된다.

4.3 LED 엔진 모듈의 방열특성 분석

Heat sink 최적의 두께와 개수를 설정하기 위해 방열 시뮬레이션을 반복하여 진행하였다.

첫 번째로 핀 두께를 2 mm로 고정시킨 후 개수를 변화시키면서 10개의 LED의 패키지 온도 평균값을 표 4.6에 나타내었다. 측정 결과 핀의 개수가 17개일 때 최저 온도를 가졌다.

다음으로 개수를 17개로 고정시킨 후 두께를 변화시키며 온도변화를 관찰하였다. 그 결과를 표 4.7에 나타내었다. 두께가 1 mm 일 때 최저 온도를 가졌다.

마지막으로 두께를 1 mm로 고정 시킨 후 핀 개수에 따른 온도변화를 관찰하여 최종 두께와 개수를 선정하였다.

최종적으로 핀의 개수는 23개, 두께는 1mm 일 때 LED p-n 접합온도가 가장 낮은 값을 가졌다. 열전소자 상 하단부의 온도차는 heat sink 핀의 형상에 따른 영향이 작았으며 핀의 개수 및 두께에 의존하지 않고 10 (± 0.4) ℃의 분포를 나타내었다.

그림 4.4에 p-n 접합온도가 가장 낮아지는 heat sink로 최적화된 LED 광학엔진모듈의 열해석 결과를, 그림 4.5에 열전소자의 온도분포 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 이때의 LED p-n접합부의 온도는 최대 69.3 ℃ 로 산출되었다.

표 4.6 핀 두께 2 mm 고정 후 개수를 변화시켰을 때의 LED 온도

Table 4.6 Temperature of LED by changing the fin number with fixed fin thickness 2 mm

fin number	14	15	16	17	18	19
LED Temperature [℃]	77.1	75.3	75.3	73.7	75.3	75.2

표 4.7 핀 개수 17개 고정 후 두께를 변화시켰을 때의 LED 온도

Table 4.7 Temperature of LED by changing the fin thickness with fixed fin number 17

fin thickness [mm]	0.5	1	1.5	2	2.5
LED Temperature [℃]	72.3	70.5	70.9	71.5	72

표 4.8 핀 두께 1 mm 고정 후 개수를 변화시켰을 때의 LED 온도

Table 4.8 Temperature of LED by changing the fin number with fixed fin thickness 1 mm

fin number	19	20	21	22	23	24
LED Temperature [℃]	69.5	69	68.9	68.3	68.2	68.5

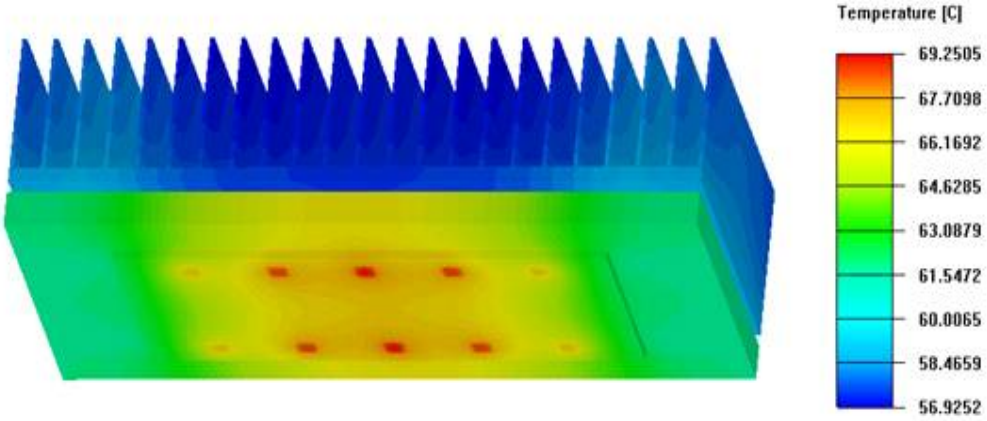

그림 4.4 모듈의 해석 결과

Fig. 4.4 Thermal simulation result of module

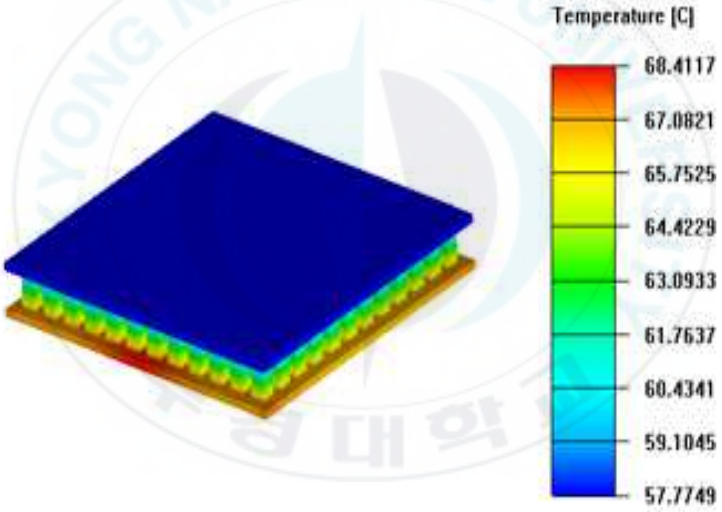

그림 4.5 열전소자의 온도 분포

Fig. 4.5 Temperature deposition of theomelectric device

4.4 열전소자의 발전 전력 분석

열 설계된 LED 광학엔진모듈을 도로공사 표준에 맞추어 제작한 다음, 열전소자가 삽입되기 전과 후의 발전 특성을 비교측정 및 분석하였다. 그림 4.6과 4.7에 각각 열전소자가 삽입되기 전과 후의 LED광학엔진모듈의 정면 사진과 모식도를 나타내었다.

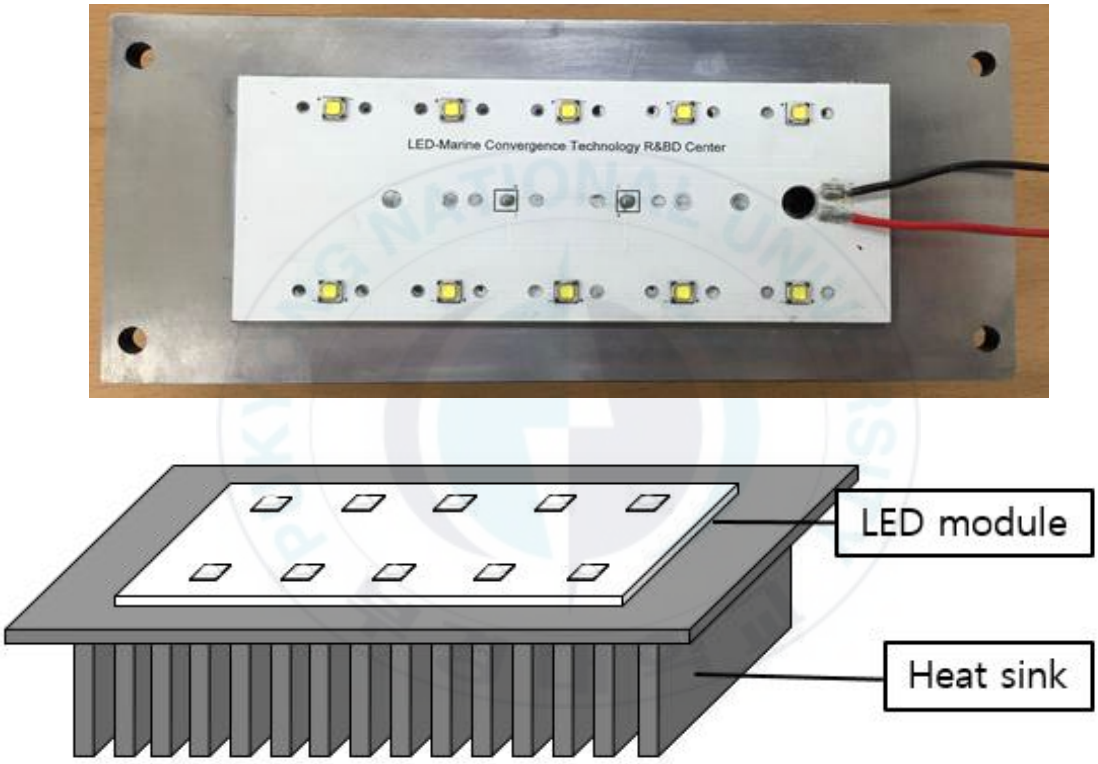

그림 4.6 열전소자 삽입 전 한국도로공사 표준형 LED 엔진 모듈

Fig. 4.6 LED engine module korea highway corporation stamdard without thermoelectric devices

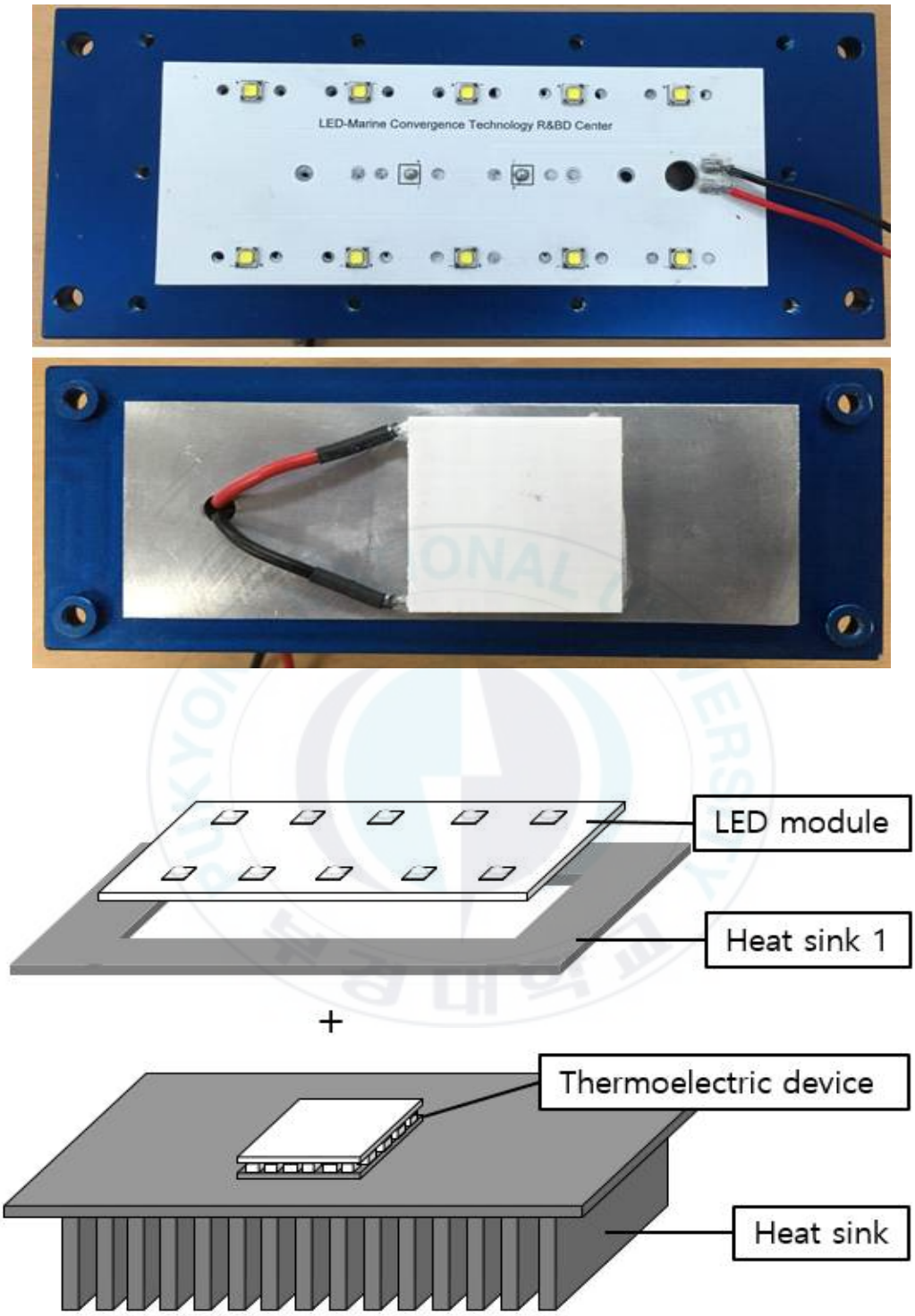

그림 4.7 열전소자 삽입 후 한국도로공사 표준형 LED 엔진 모듈

Fig. 4.7 Korea highway corporation LED engine module after inserting thermoelectric devices

최종 설계된 모듈에 삽입된 열전소자의 발전량 측정을 위해 그림 4.8과 같이 실험을 구성하였다. DC직류전자 부하를 이용해 열전소자에서 발전되는 전력의 최댓값을 구한 결과를 표 4.9와 그림 4.9에 나타내었다.

직류전자 부하를 이용해 열전소자에 0.02 A부터 0.3 A 까지 부하를 증가시키며 출력되는 전압을 측정하였다. 전자로드로부터 열전소자에 걸어준 로드 전류가 증가할수록 발전 전력이 증가하다가 0.15 A에서 최대 발전 전력 값인 0.086 W를 가지며 0.15 A 이상의 전류가 흐를 때 전력 값은 감소하였다.

이는 본 연구에서 사용한 열전소자는 0.15 A 일 때 열전소자의 내부저항과 외부 부하저항이 동일해 진다는 것을 의미한다. 따라서 본 연구에서 사용된 LED 엔진모듈과 열전소자로부터 발전된 전력을 이용하기 위해서는 0.15 A의 부하를 갖도록 설계할 때 0.086 W의 최대 전력을 얻을 수 있다고 판단되었다.

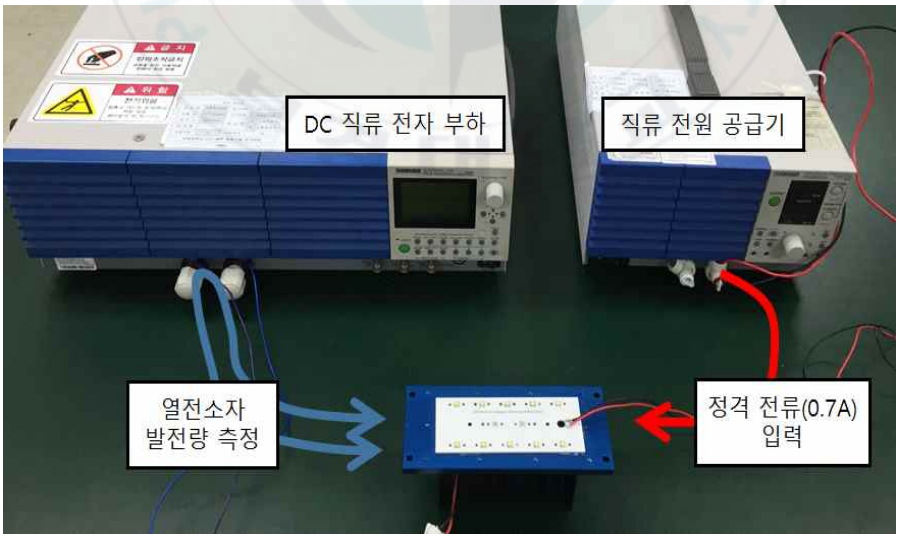

그림 4.8 LED엔진 모듈의 열전 발전량 측정 실험 구성

Fig. 4.8 Schematic diagram of measuring experimental set-up for thermoelectric generated power of LED engine module

표 4.9 열전소자의 부하 변화에 따른 출력 전력

Table 4.9 Output power of thermoelectric device depending on electrical load

Load current [A]	Voltage [V]	Power [W]
0.02	0.96	0.019
0.04	0.9	0.036
0.06	0.84	0.050
0.08	0.8	0.064
0.10	0.72	0.072
0.12	0.64	0.077
0.14	0.6	0.084
0.16	0.54	0.086
0.18	0.48	0.086
0.20	0.42	0.084
0.22	0.34	0.075
0.24	0.28	0.067
0.26	0.22	0.057
0.28	0.16	0.045
0.30	0.08	0.024

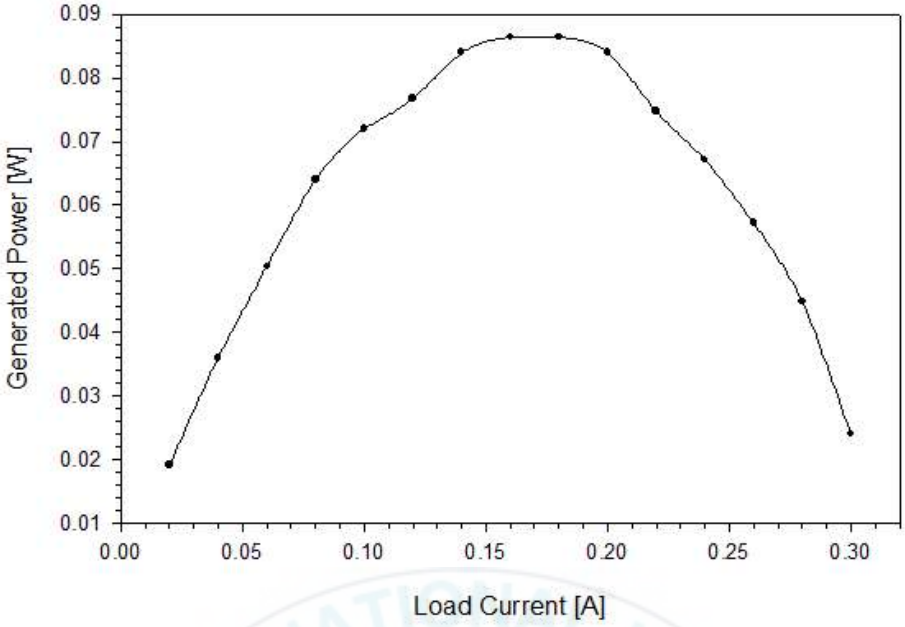

그림 4.9 LED엔진 모듈의 열전 발전량

Fig. 4.9 Thermoelectric power generation depending on load current of LED engine module

열전소자로 부터 발전된 전력은 조명의 통신 신호에 사용되는 센서 전력 공급원으로 사용이 가능하다. 또한 비상 시 전력 공급원으로써 충전 후 사용이 가능하다.

예를 들어 터널 등기구에서 충전 전력 공급원으로 사용될 경우의 가능성을 검토해 보았다. 100 W급 LED 터널 등기구는 25 W 모듈 4개가 결합되어 구성된다. 따라서 모듈 4개에서 발생된 폐열이 열전소자로부터 회수되어 충전이 가능하며 비상 시 하나의 모듈을 점등시켜 비상조명으로써 역할을 할 수 있도록 할 수 있다. 도로터널의 화재 안전 기준에 따르면 비상조명등은 상용전원이 차단되는 경우 자동으로 비상전원으로 60분 이상 점등되도록 설치할 것을 규정하고 있다. 앞선 실험 결과 중 최대 발전 전력 인 0.086 W를 기준으로 충전 예상 시간을 계산해 보았다. 비상 시 하나의 모듈에 1시간 점등이 최소로 요구되므로 필요한 충전 용량은 25 W/h이다.

$$\frac{25[W/h](\text{배터리 용량})}{0.086[W](\text{충전용량})\times 4} = \text{약}\ 73\ [h] \tag{3}$$

따라서 터널등 점등 후 약 73시간 후 즉 약 3일 수에는 충전이 완료되어 비상조명등으로 활용이 가능할 것이라 예상된다.

4.5 LED 엔진 모듈의 광특성 비교분석

광학적 특성은 적분구를 이용해 LED 엔진 모듈을 정격 전류 700 mA를 인가하고 1시간 aging 후 광량이 안정화 될 때 측정하였다. 열전소자를 삽입하지 않고 바로 Heat sink를 부착한 모듈과 삽입된 완성 모듈을 모두 측정해 비교하였다.

측정 결과를 표 4.10에 나타내었다. LED 광학엔진모듈로부터 열전달 경로에 열전소자가 삽입되어 저항체 역할을 했기 때문에 광속이 저하되었고 입력전력 대비 광 효율 또한 저하되었다. 하지만 저하 폭이 1~3 % 내로 미세하기 때문에 광 특성에는 크게 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다.

또한 LED 패키지의 색 측면에서 광량 저하로 인한 색온도, 연색성 변화가 있었다. 하지만 그 폭 또한 매우 미세하며 색좌표 변화는 0.001보다 작은 값으로 사람의 눈으로 구별할 수 없는 정도의 변화였다.

그러므로 열전소자가 삽입된 LED 엔진 모듈은 광학적 특성에서는 조명으로 사용되기에 적합한 것으로 판단되었다.

표 4.10 열전소자 삽입 전 후 LED 엔진 모듈의 광 특성
Table 4.10 Photometric characteristic of LED engine module with/without thermoelectric devices

	Luminous flux [lm]	Efficiency [lm/W]	CCT	CRI	Color coordinate (x.y)
Without Thermoelectric device (A)	2572.5	129.2	5763	75.7	0.33,0.34
With Thermoelectric device (B)	2497.0	126.9	5849	76.7	0.33,0.34

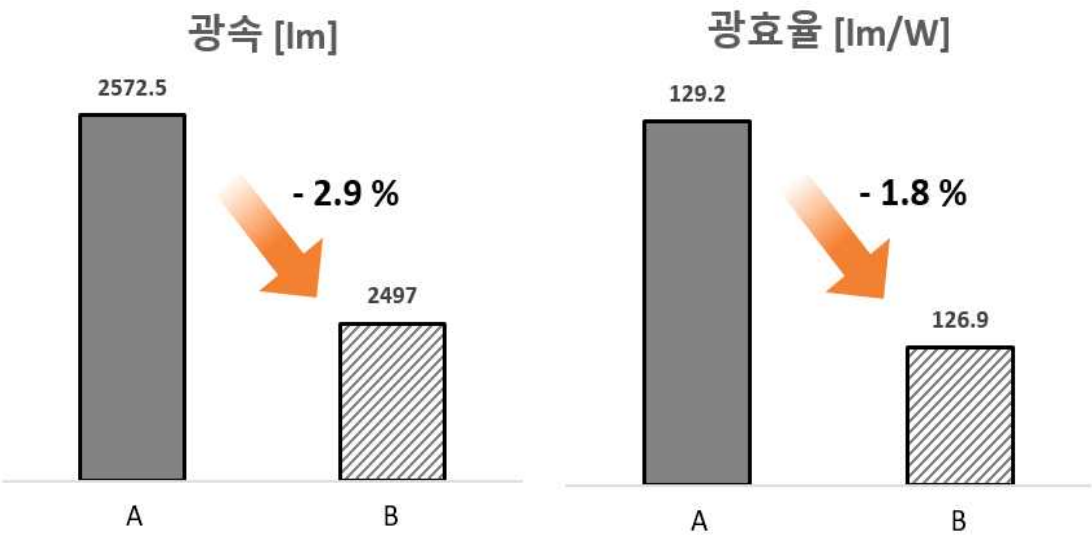

그림 4.10 LED 엔진 모듈의 광속과 광효율 저하 비율

Fig. 4.10 Spectrum change of LED engine module

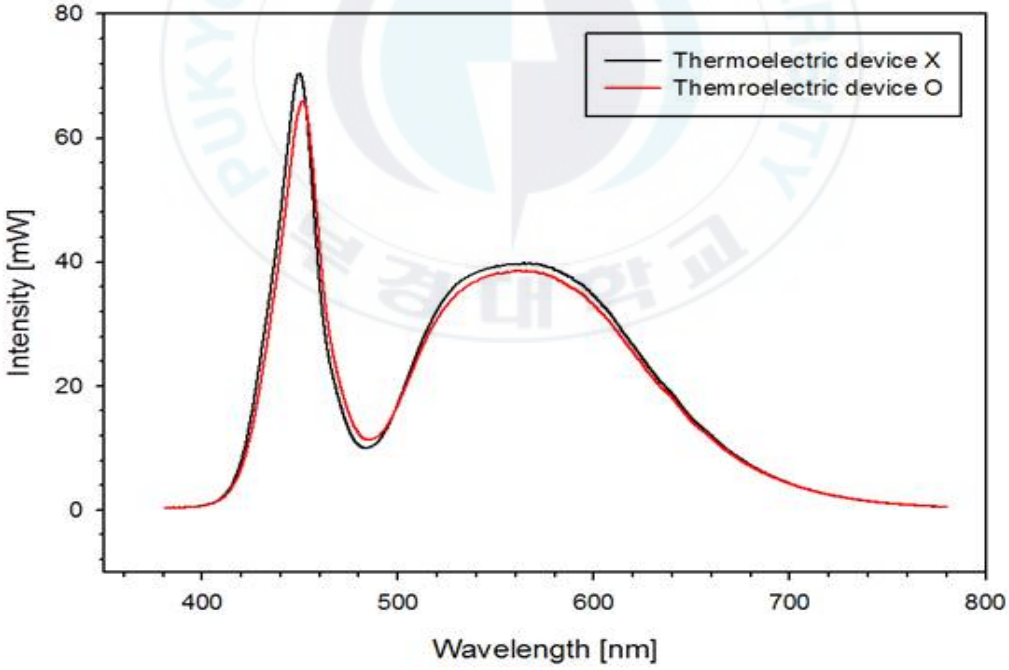

그림 4.11 LED 엔진 모듈의 스펙트럼 변화

Fig. 4.11 Spectrum change of LED engine module

제 5 장 결 론

LED 조명에서 발생하는 폐열을 활용하기 위하여 열전소자를 적용하고, LED p-n 접합부에서 열전소자를 거쳐 heat sink까지의 열저항을 분석하였다. 열저항 계산식과 열전소자의 기전력 및 LED 엔진모듈의 각 위치별 온도 측정을 통해 열전소자의 열저항 값을 얻었다. 또한 LED 엔진모듈의 폐열로부터 발전되는 발전량 및 부하량을 측정하였고, 시제작한 LED 엔진모듈의 광특성을 측정하였다. 이상의 측정 및 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. LED p-n 접합온도 측정과 온도차 분석을 통해 고온부의 온도 조절 보다는 저온부의 온도 조절이 열전소자 LED 광학엔진모듈 특성 향상에 유리하였다.
2. LED 광학엔진모듈의 열저항과 열전소자 자체의 열저항을 더한 값은 2.654 K/W 이고, 열전소자를 사용하여 측정한 LED 엔진모듈의 전체 열저항 값은 2.41 K/W으로 측정되었다.
3. 열해석 simulation 결과 LED 엔진 모듈은 핀의 개수 23개, 두께 1mm 일 때 LED p-n 접합온도가 69.3 ℃의 최솟값을 가졌다.
4. 시제품 LED엔진모듈에 700 mA 정격전류를 인가했을 때 발전 전력량은 0.086W 이었으며, 0.15 A의 부하를 설계하였을 때 최대 전력을 얻을 수 있었다.
5. 시작품 제작 후 광특성과 열전발전 출력 특성을 측정한 결과 광효율은 126.9 lm/W 이었다. 열전소자 사용에 따른 광효율 저하는 3.7 lm/W 이었다.

열전소자를 LED 조명에 적용했을 때 발전량 0.086 W로 적었으나 향후 열전소자의 재료 개발로 발전특성이 개선된다면 LED 조명의 폐열활용에도 열전소자의 적용이 가능할 것이며, 본 LED 엔진모듈에서 발생된 폐열 활용 시 0.15 A의 부하를 갖는 활용 방안을 연구 할 필요가 있다고 판단되었다.

참 고 문 헌

[1] Lon E. Bell(2008), Cooling Heating Generating Power and Recovering Waste Heat with Thermoelectric Systems, Vol. 321, pp. 1457-1461, Science

[2] Yu. Vorobiev(2006), Thermal-photovoltaic solar hybrid system for efficient solar energy conversion, Vol. 80, pp. 170-176, Solar Energy

[3] Marisol Martin-Gonzalez(2013), Nano engineering thermoelectrics for 21 century: Energy harvesting and other trends in the field, Vol. 24, pp. 288-305, Renewable and Sustainable Energy Reviews

[4] Jacob Karni(2011), The thermoelectric alternative, Vol. 10, pp.481-482, Nature materials

[5] H.H. Cheng(2012), Heat dissipation design and analysis of high power LED array using the finite element method, Vol. 52, pp. 905-911, Microelectronics Reliability

[6] Tony Armstrong(2010), Energy harvesting from thermoelectric sources gets a boost, Issue 1, pp. 24-26, Power Electronics Europe

[7] Choi Byoung Jun(2000), Research on the Development of Thermoelectric Generation System for Industrial Waste Heat Recovery, Vol. 9, pp. 19-27, Energy Engg J

[8] Y.Y. Hsiao(2010), A mathematic model of thermoelectric module with applications on waste heat recovery from automobile engine, Vol. 35, pp. 1447 - 1454, Energy

[9] Xiaolong Gou(2010), Modeling, experimental study and optimization on low-temperature waste heat thermoelectric generator system, Vol. 87, pp. 3131 - 3136, Applied Energy

[10] Nancy Owano(2014, April 12), Power arm band for wearables harvests body heat, Tech Xplore

[11] Chun Kai Liu(2007), High efficiency silicon-based high power LED package integrated with micro-thermoelectric device, Packaging, Assembly and Circuits Technology, pp. 29-33, International Microsystems

[12] S. H. Han(2011), control of heat temperature in light emitting diode with thermoelectric device, Vol. 20, No. 4, pp.220-287, Journal of the Korean vacuum society

[13] James R. Brodric(2014), Navigating the New Lighting Lanscape, lightfair2014, Department of Energy

[14] 신한중(2010), LED조명 '방열' 어디까지 왔나, SP 투데이, 제 204호

[15] 한국에너지공단(2008), 신재생에너지의 이해

[16] 김동화(2002), 센서의 기초 물성론, 제 5월 호, 월간 계장기술

[17] 정대용(2010), 압전에너지 하베스팅의 원리 및 응용, Vol. 6, pp. 14-23, 조명전기설비학회

[18] Jeong C. K(2014), Topographically-Designed Triboelectric Nano generator via Block Copolymer Self-Assembly, Vol. 14, pp. 7031-7038, Nano Letter

[19] Jung-Sik Choi(2008), Cooling System Development of BIPV Module Using Thermoelectron, pp. 1555 - 1562, The Transaction of the Korean institute of electrical engineers

[20] M. G. Jang(2008), Thermoelectric Power Generation with high efficiency, Electronics and Telecommunications Trends, Vol. 23, No. 6, pp. 12-21, ETRI

[21] Ho-Sung Jang(2006), Research on the Output Characteristic of Thermoelectric Module according to the thickness variation of Polymer Pad, Proceeding of the SAREK 2006 Summer Annual Conference, pp976-981

[22] Kim Daeho(2014), Design and performance evaluation on thermoelectric generators using solar energy, nanomechatronics, University of science and technology

[23] Hui-woong Lee(2004), Thermoelectric power generation technology using semiconductor devices, Vol. 53 No.10 pp48-55, The Korean Institute of Electrical Engineers, World of Electricity

[24] Junling Gao(2013), A method for testing the integrated thermal resistance of thermoelectric modules, Issue 84, 114903, Rev. Sci. Instrum

[25] IEA/JEDEC Standard No.51-1(1995), Integrated Circuits Thermal Measurement Method - Electrical Test method

[26] Korea Expressway Corporation(2014), LED Luminaries

[27] http://www.lumileds.com/technology/luxeon-technology

Optimization of Heat sink and Analysis of Heat Transfer path in energy harvesting type LED Module

Ji Young Jeong

Department of LED Convergence Engineering, Specialized Graduate School
Science & Technology Convergence,
Pukyong National University

Abstract

Variation of thermal resistivity depending on temperature difference and measurement of thermal resistivity of thermoelectric device in LED lighting engine module were studied. Generated power from waste heat and photometric characteristics of LED engine module were measured. From the measured and analysed data, we can concluded as follows. Control of temperature difference at the low temperature pare than at high temperature part was advantageous for LED module. The sum of the measured thermal resistance of LED module and thermoelectric device was 2.654 K/W and the measured total thermal resistance was 2.41 K/W. As a result of thermal simulation, minimum LED p-n junction temperature was 69.3 ℃ when the pin number is 23 pieces and 1mm of thickness. When 700 mA was applied to the LED engine module, 0.086 W of maximum power was obtained with 0.15 A of load. Light efficiency of LED module with thermoelectric device was 126.9 lm/W and it was confirmed 3.7 lm/W of efficiency decreement.

감사의 글

부경대학교에서 2년의 대학원 과정은 평생 잊지 못할 감사할 기억으로 남을 것 같습니다. LED-해양 융합기술 연구센터에서의 학생으로 함께할 수 있었던 기회를 주신 유영문 교수님께 가장 먼저 감사드립니다. 항상 학생들을 먼저 생각하시고 배려해 주신 덕분에 큰 어려움 없이 석사 과정을 잘 마무리 할 수 있었던 것 같습니다. 앞으로의 삶에 있어서도 교수님의 열정을 기억하면서 주어진 일에 열심히 임하는 성실한 제자가 되겠습니다. 논문 지도에 힘써주신 최희락 교수님과 김종수 교수님께도 감사의 말씀을 전합니다. 센터를 방문하실 때마다 해주신 덕담과 조언은 논문과 앞으로의 진로에 큰 도움이 되었습니다. 더불어 양현경 교수님과 류우찬 교수님, 알찬 수업과 함께 해주신 많은 말씀들로 성장할 수 있었습니다. 감사합니다.

2년의 기간 동안 부족한 저를 믿고 지원해주신 조명팀 식구들, 감사하다는 말로는 제 마음을 표현할 수 없을 것 같습니다. 힘들고 지칠 때 힘이 되어주고 기쁜 일이 있을 때 더 기뻐해주는 여러분들이 있어서 너무 행복했습니다. 지금처럼 매일 볼 수는 없지만 끈을 놓지 않고 자주 찾아뵙겠습니다.

센터에 근무하면서 만난 감사한 분들이 너무 많아 일일이 적어 내려가지 못하지만 모든 교수님들과 연구원님들께 감사의 말씀을 전하고 싶습니다. 전문가로써, 인생의 선배로써 해주신 조언과 보여주신 모습들은 앞으로 만나게 될 후배들에게 좋은 선배로써 대할 수 있는 본보기가 되었습니다.

우리 대학원 학생들, 너무너무 감사합니다. 오빠가 없는 저에게 오빠들이 생겨서 정말 든든했습니다. 큰 도움이 되지 못한 것 같아 미안하고 아쉽지만 앞으로도 여러분들을 항상 응원하겠습니다! 그리고 내친구 예림이! 우리 대학생 새내기로 만나서 벌써 함께한지가 몇 년이고~우리의 산책은 너무 그리울꺼 같다..앞으로 남은 석사기간 잘 마무리하고, 수지랑 같이 자주자주 보자^^

마지막으로 사랑하는 우리 가족들에게 너무나도 고맙습니다. 하고 싶은 일이 있으면 아낌없이 지원해주시고 지켜봐 주시는 우리 엄마 아빠, 그리고 무뚝뚝한 언니지만 옆에서 믿고 따라주는 우리 동생 모두 감사합니다. 지금처럼 기대에 부흥하는 딸, 자랑스러운 언니가 될게요.

짧으면서도 긴 석사과정생활동안 만난 모든 분들께 감사드립니다. 이 기간을 발판삼아 부끄럽지 않게, 더 나은 모습으로 모든 분들께 보답하겠습니다. 감사합니다.