

# LED터널등 모듈의 폐열활용을 위한 열전소자의 발전 성능 분석

(Analysis of the Thermoelectric Devices' Power Generation Performance for Utilizing the Waste Heat of LED Tunnel Lighting Module)

정지영\* · 허인성 · 이세일 · 김명호 · 유영문\*\*

(Ji-Young Jeong · In-Sung Her · Se-Il Lee · Myeong-Ho Kim · Young Moon Yu)

## Abstract

In this paper, we propose the LED(Light-Emitting-Diode) emergency lighting in a tunnel by using the thermoelectric devices. To achieve high generated power, thermoelectric device should be have high Seebeck coefficient and small contact area. Also, we reveal that a moderate heatsink required for high generated power. From the waste heat of LED tunnel lighting module (25W), the generated power was 0.062W by thermoelectric device, and it could illuminate for 1hour after charge the battery of emergency lighting during about 101hours.

Key Words : Thermoelectric Device, LED Tunnel Luminaries, Seebeck Effect, Emergency Lighting

## 1. 서 론

### 1.1 연구 배경

터널 조명은 어두운 터널 내부에서 운전자들에게 시야를 확보하게 하고 사고를 방지하는 중요한 요소이다. 하지만 현재 사용되고 있는 고압나트륨 및 형광등

은 수명이 짧아 램프 교체가 자주 이루어 져야하기 때문에 터널등 사용 시 교체를 위해 교통을 통제해야 하는 등 유지 보수가 어렵다는 단점이 있다. LED 터널등기구에는 에너지 효율이 좋고 광원 수명이 약 5만 시간 이상의 장수명이므로 정부에서는 기존의 터널등을 교체하기 위한 움직임을 보이고 있다[1]. 기존의 고압 나트륨이나 형광등을 광원으로 이용하는 터널등은 소비전력이 높은 반면 광효율이 높은 LED 터널등은 소비전력이 낮기 때문에 LED 터널등에서 발생된 열을 활용하기 위한 방안으로 열전소자를 사용하여 폐열을 회수하고 발전하여 열전소자에서 생성된 전력만으로도 battery를 충전하고 비상시에 비상조명으로 활용할 수 있다.

열전소자는 소자 양단에 온도 차이가 발생하면 발전이 되는 특징을 가지고 있기 때문에 LED에서 발생된 열을 소자의 한쪽 면에서 흡수하면 양단에 온도차가

\* Main author : Pukyong National University, Specialized Graduate School Science & Technology Convergence, LED Convergence Engineering

\*\* Corresponding author : Pukyong National University, LED-Marine Convergence Technology R&BD Center, Professor

Tel : 051-629-7770, Fax : 051-629-7780

E-mail : ymyu@pknu.ac.kr

Received : 2015. 5. 21

Accepted : 2015. 7. 17

발생되어 발전이 가능하다[2].

터널은 화재나 정전으로 인한 위험상황에 대비해 비상조명등을 설치하도록 규정하고 있지만 신규 설치비용이 크기 때문에 대부분의 경우 비상조명을 확보하지 못하고 있는 실정이다[3]. 이 문제점에 대한 방안으로 터널등을 평상시에는 터널조명으로 사용하고 비상시에는 열전소자로부터 충전된 배터리 전력으로 점등시켜 비상조명으로 활용하고자 하였다. 따라서 본 논문에서는 LED에서 발생하는 열을 이용하여 LED 터널등 모듈의 PCB(Printed-Circuit-Board) 아래에 삽입된 열전소자의 크기, 재료에 따른 발전 특성과 소자 양단의 온도 차이에 따른 발전 전력을 측정하여 최대 성능으로 배터리 충전이 가능한 출력을 얻기 위한 방안을 연구하였다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 열전소자 Seebeck effect

열전발전을 위해서는 열전소자 양단에 온도 차이를 주면 전기가 발생하는 제베크 효과(Seebeck effect)를 이용해야 한다. 일반적으로 열전소자는 그림 1과 같이 두 개의 세라믹 기판과 그 사이의 p-type 및 n-type 반도체 소자로 이루어진다[4]. 두 세라믹 기판에 온도 차이가 발생할 때, n-type 반도체에서는 고온부에서의 전자가 높은 에너지 상태로 여기가 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. p-type 반도체의 경우 반대로 저온부가 (+), 고온부는 (-)로 대전이 되어 n-type과 반대의 방식으로 전압이 형성된다. 이와 같은 Seebeck effect에 의한 기전력은 식 (1)과 같다.

$$V_s = \alpha \Delta T \quad (1)$$

식 (1)의  $\alpha$ 는 제베크 계수로 소자에 사용되는 물질

마다 고유의 값을 가지고 있다. 제베크 계수는 구성하는 반도체의 길이가 짧을수록, 면적이 넓을수록 저항이 최소화되기 때문에 큰 값을 얻을 수 있다. 제베크 계수를 포함해 열전소자의 성능에 영향을 미치는 요소는 일반적으로 식 (2)와 같이 성능지수  $Z$  값을 사용하여 나타낸다.

$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho \cdot k} \quad (2)$$

이 때  $\rho$ 는 전기 비저항,  $k$ 는 열전도도를 나타내고, 성능지수  $Z$  값이 클수록 열전발전 효과가 크다[5].

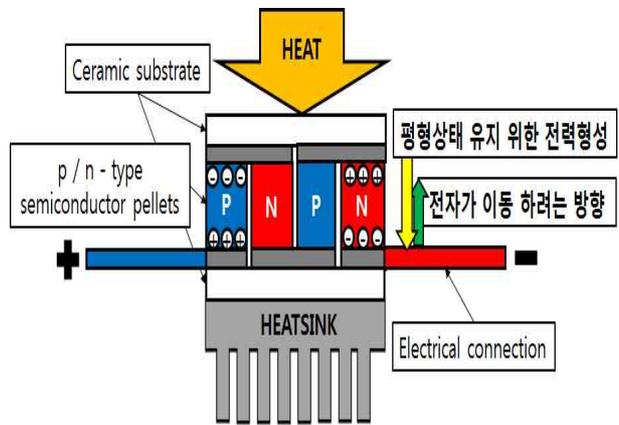


Fig. 1. Seebeck effect of thermoelectric device

### 2.2 열전발전의 최대 전력

열전소자의 발전출력은 열전소자에 발생하는 온도차가 고정되었을 때 외부의 부하저항 값에 따라 변화한다. 열전소자는 소자 고유의 내부 저항이 존재하는데 내부저항 값과 부하저항 값이 동일할 때 최대전력을 얻을 수 있다. 부하저항에 의해 발생하는 전력  $P$ 는 다음 식 (3)과 같다.

$$P = \frac{(V_s)^2}{(R_L + R)^2} \cdot R_L \quad (3)$$

$R_L$ 은 부하저항 값을 나타내며,  $R$ 은 열전소자의 내부저항 값이다.

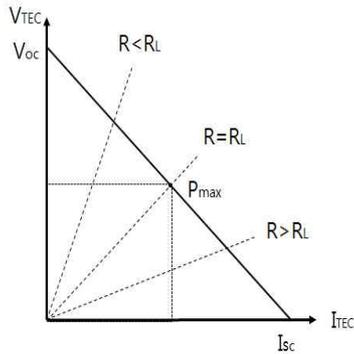


Fig. 2. I-V Curve of thermoelectric device

그림 2는 부하변동에 따른 열전소자의 전압과 전류 특성을 보여주는 그래프로, 소자의 내부저항과 외부 부하가 같아질 때 개방회로전압( $V_{OC}$ )과 단락회로전류( $I_{SC}$ )가 절반이 되며 최대 전력을 얻을 수 있다[6].

또한 열전소자는 외부 환경의 온도변화에 따라 내부저항 값이 변화하는데 열전소자의 사용가능한 온도범위를 벗어날 때 내부저항이 불안정하게 변화되어 최대 전력을 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 기관과 열 생성부의 불균일한 접촉은 전면에 균일한 온도분포를 갖지 못하게 하고 열전달이 집중적으로 이루어지는 영역과 열전달 소외지역을 생성시켜 출력을 저하시킨다. 저온부와 Heatsink의 불균일한 접촉은 원활한 열 방출이 일어나지 않아 저온부의 온도가 상승하게 되고,  $\Delta T$ 가 상승해 결과적으로 출력이 낮아지게 된다[7].

### 3. 실험방법

#### 3.1 모듈 제작

국내에서 생산되는 LED 터널등기구는 제조사별로 부속품의 형식, 구성, 특성 등이 다르다. 따라서 설치 후 부속품 고장 시 호환성 부족으로 유지보수가 어렵

다는 문제점을 가진다. 한국도로공사에서는 이 문제에 대비해 LED 조명등기구의 표준을 제정하여 보급하였다[8]. 이에 맞추어 한국도로공사 표준에 맞게 등기구 모듈을 제작하기 위해 그림 3과 같이 LED Package는 10개를 사용하였다. LED는 미국 Philips lumileds사의 luxeon TX Package를 사용하였고, PCB는 구리를 사용해 제작하였다. 열전소자의 상 하단부의 온도차를 주기위한 Heatsink는 Aluminum 6061 재료를 사용하였고, Solidworks flow simulation 프로그램을 통해 방열 성능이 우수함을 확인하였다.



Fig. 3. Home-made module of LED tunnel lighting for this study

#### 3.2 열전소자 성능 분석

열전소자의 성능 분석을 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](http://www.wellentech.com))사의 TEC1-12704, TEC1-12706, TEC1-12715를 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 두 번째 실험과 동일한 열전소자를 이용해 Heatsink 방열 유무에 따른 발전

량을 측정하였다.

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

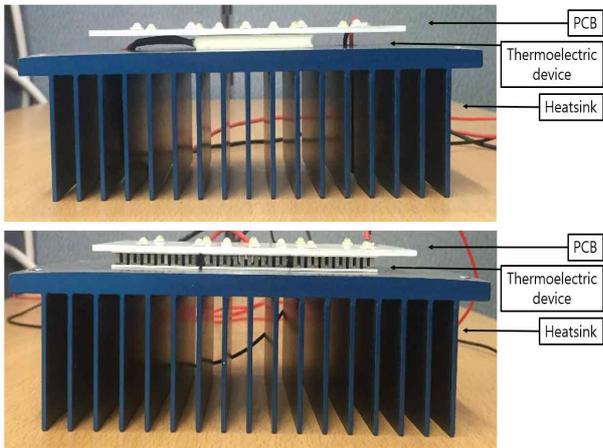


Fig. 4. Photography of LED tunnel lighting for power generation characteristics

## 4. 실험결과

### 4.1 열전소자의 최대 발전

열전소자의 크기는 동일하지만(40x40mm) 내부 저항 값이 서로 다른 3가지 종류의 소자를 사용해 측정된 발전량을 표 1에 나타내었다.

Table 1. Power generation of thermoelectric device by the change of type

열전소자 종류	발전량(W)
TEC1-12704	0.046
TEC1-12715	0.026
TEC1-12706	0.043

열전소자의 종류가 달라짐에 따라 발전되는 전력량이 달라지는 원인을 파악하기 위해, 소자 양단의 온도차  $\Delta T$ 가 0인 조건에서 최대 입력 전압인 15.4V를 걸어주었을 때 저온부에서의 최대 흡열량을 소자 제조사의 제공 데이터를 참고하여 표 2에 나타내었다.

Table 2. Highest amount of heat absorption by the sort of thermoelectric devices.

열전소자 종류	최대 흡열량 $Q_c \text{ max(W)}$
TEC1-12704	36.8
TEC1-12715	133.3
TEC1-12706	53.3

동일한 전압을 걸어주었을 때 저온부에서 TEC-12715 제품이 133.3W로 가장 큰 값으로 흡열이 가능하다. 각각의 흡열량을 바탕으로 소자의 제베크계수를 추정하기 위해 다음의 식 (4) 최대 흡열량을 구하는 식에 대입을 하였다.

$$Q_c = \alpha T_c I - \frac{1}{2} I^2 R - \kappa \Delta T \quad (4)$$

저온부 흡열량  $Q_c$ 는 133.3W, 저온부의 온도  $T_c$ 는 298K, 전류값  $I$ 는 15A, 저항값  $R$ 은 0.75Ω임을 제조사 제공 데이터를 통해 확인하였고,  $k$  값은 재료의 열전도도 값이며,  $\Delta T=0$ 인 조건이므로 소거가 되는 값이다. 계산 결과 제베크계수  $\alpha$ 는 0.048V/K이었다. 위와 동일한 방법으로 나머지 2개의 소자에 대해서 제베크계수를 계산한 결과 발전량이 가장 높은 TEC1-12704의 제베크계수가 0.051V/K로 가장 높았고, 다음으로 TEC1-12706이 0.049V/K이었다. 열전 발전량은 제베크계수가 높을수록 클수록 높아짐이 확인되었고, 높은 출력을 얻기 위해서는 제베크계수가 높은 소자를 선택하는 것이 중요하다.

두 번째 실험으로 열전소자가 LED PCB에 닿는 면적이 발전에 영향을 미치는 정도를 파악하기 위해 열전소자 50690-502(35x35mm)의 개수에 따른 발전 특성을 비교하여 결과를 표 3에 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.

Table 3. Power generation of thermoelectric device by the change of number

50690-502 열전소자 개수	발전량(W)
1	0.062
2	0.043
3	0.031

또한 첫 번째 실험 발전량과 두 번째 실험의 발전량 측정 결과 값을 비교해 보면 두 번째 소자의 발전량이 큼을 알 수 있다. 열전소자의 개수와 면적의 비교 데이터를 볼 때 소자와 PCB가 닿는 면적이 작을수록 열전발전에 유리한 것으로 판단되었다.

세 번째로 Heatsink를 열전소자에 부착했을 경우와 부착하지 않은 경우의 발전 특성을 비교한 결과를 표 4에 나타내었다.

Table 4. Comparison of thermoelectric generation by the presence of heatsink

Heatsink 사용유무	발전량(W)
미사용	0.009
사용	0.062

Heatsink를 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 Heatsink와 같은 방열장치를 설치하여 위아래의 온도차를 유지시킬 수 있는 장치가 필요하다.

마지막으로 각 실험에 대한 광효율을 적분구(OPI-100)로 700mA를 인가해 한시간 에이징 후 측정 결과, 각 실험 모듈에 대한 값이 모두 120lm/W을 넘지 않는 것으로 보아, LED 터널등 모듈에 열전소자를

삽입해도 광효율 저하를 가져오지 않음이 확인되었다.

각 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 소자를 사용한 모듈이 0.062W의 출력 전력을 얻을 수 있었다.

### 4.2 열전 발전을 통한 배터리 충전 검토

LED 터널등기구는 25W 모듈 4개가 결합되어 100W로 구성되도록 한국도로공사 표준에 명시되어 있다. 모듈 4개에서 발생된 폐열을 열전소자로 회수해 발생된 전력은 배터리에 충전되어 비상 시 모듈 하나가 점등이 되어 비상 조명등으로 활용하는 모델을 착안하였다. 도로터널의 화재안전기준에 따르면 비상조명등은 상용전원이 차단되는 경우 자동으로 비상전원으로 60분 이상 점등되도록 설치할 것을 규정하고 있다[9]. 앞선 실험 결과 중 최대 발전 전력인 0.062W를 기준으로 대략적인 충전 예상 시간을 계산해 보았다. 비상 시 하나의 모듈에 1시간 점등이 최소로 요구되므로 필요한 충전 용량은 25W/h이다.

$$\frac{25[W/h](\text{배터리 용량})}{0.062[W](\text{충전 용량}) \times 4} = \text{약 } 101 [h] \tag{3}$$

추정 결과 터널등 점등 후 약 101시간 후에는 충전이 완료되어 비상조명등으로 활용이 가능할 것이라는 결과를 얻었다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 터널조명을 비상조명등으로 활용하기 위해 LED 터널등에서 발생되는 폐열을 열전소자로 회수해 비상조명등 충전 전력으로 사용하고자 하였다. 열전 소자의 높은 발전량을 얻기 위해 다음과

같은 결론을 얻었다.

1. 열전소자의 제베크 계수가 높은 것을 선택해야 한다.
2. LED PCB와 소자의 닿는 면적이 좁을수록 열이 많이 집적되어 높은 발전 전력을 얻을 있기 때문에 열전소자 면적이 작은 것을 선택해야 한다.
3. 열전소자의 상 하단부의 온도 차가 클 때 발전량이 높아짐으로 Heatsink와 같은 방열 장치가 필요하다.

결론적으로 LED 터널등 모듈에서 발생한 폐열을 열전소자로 회수해 전력을 얻은 결과, PCB와 닿는 면적이 가장 작은 소자에서 0.062W의 출력 전력을 얻을 수 있었다. 이는 101시간의 충전 후 1시간 점등이 가능한 출력량이다. 열전소자를 조명에 적용시키기 위해서는 적은 온도 차이에서도 큰 발전량을 얻을 수 있도록 제베크 계수가 높은 물질이나 열전도도가 작은 물질을 계속해서 연구해 발전 출력량을 높일 필요가 있다.

본 연구는 중소기업청 중소기업기술개발지원사업(과제 번호 : S2163290 폐열회수 발전을 통한 비상조명등 겸용 IT 융합 LED 터널조명시스템 개발)으로 지원된 연구임.

### References

- [1] Korea Expressway Corporation, Advanced street lighting master plan, 2012.
- [2] Il-Ho Kim, Thermoelectric Energy Conversion Technology, KIC News. Volume 16 No.4, pp18-26, 2013.
- [3] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs rulings 100th, 2009.
- [4] Jung-Sik Choi, Cooling System Development of BIPV Module Using Thermoelectron, The Transaction of the Korean institute of electrical engineers, pp.1555 - 1562, 2008.
- [5] Ho-Sung Jang, 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, 2006.
- [6] Hui-wong Lee, Thermoelectric power generation technology using semiconductor devices, The Korean Institute of Electrical Engineers, World of Electricity, Volume 53 No.10 pp48-55, 2004.
- [7] Choe-byeongjun, Research on the Development of Thermoelectric Generation System for Industrial Waste

Heat Recovery, J.Energy Eng, pp19-27, 2000.

- [8] Korea Expressway Corporation, LED Luminaries, 2014.
- [9] National Emergency Management Agency, Fire safety standards of road tunnels (NFSC 603), No. 2013-55, p.3, 2013.

### ◇ 저자소개 ◇



**정지영 (鄭智英)**

1992년 1월 30일생. 2014년 8월 부경대학교 이미지시스템공학과 졸업. 현재 부경대학교 과학기술융합전문대학원 LED 융합공학 전공.



**허인성 (許寅盛)**

1978년 2월 25일생. 2002년 2월 원광대학교 공과대학 전기전자 공학부 졸업. 2005년 동대 대학원 전자재료공학과 졸업(석사). 현재 부경대학교 대학원 LED융합과정 박사과정 중. 부경대학교 LED-해양 융합기술 연구센터 선임연구원.



**이세일 (李世一)**

1983년 10월 16일생. 2009년 2월 원광대학교 공대 전기전자 및 정보통신공학부 정보통신 졸업. 2011년 동대 대학원 정보통신학과 졸업(석사). 현재 부경대학교 LED-해양 융합기술 연구센터 전임연구원.



**김명호 (金明鎬)**

1961년 8월 3일생. 1980년 2월 부산대학교 공과대학 기계설계학전공 졸업. 2000년 8월 동대 산업대학원 전산학 전공 수료. 현재 주식회사 비트밸리 대표이사.



**유영문 (劉永文)**

1955년 4월 6일생. 1994년 고려대학교 대학원 재료공학과 졸업(박사). 1995년 일본 도호쿠대 금속재료 연구소 객원연구원. 1984~2001년 한국화학연구원 책임연구원. 2001~2010년 한국 광기술원 LED사업단장(수석연구원). 2010년 부경대학교 석과교수. 2010년~현재 부경대학교 LED-해양 융합기술연구센터 센터장(교수). 현재 부경대학교 전문대학원 LED융합공학전공 주임(교수).