

Solar cell을 이용한 휴대용 15W lighting system 개발

(Development of 15W Portable lighting system using solar cell)

김 진홍* · 송 상빈 · 김 기훈 · 천 우영

(한국광기술원)

(Jin-Hong Kim · Sang-Bin Song · Gi-Hoon Kim · Woo-Young Cheon)

Abstract

Solar Cell을 이용한 15W 휴대용 조명 시스템을 개발하기 위하여, 휴대용에 적합한 solar cell을 선정하고, Solar Cell을 충전하기 위한 태양광 제적 변화에 대한 Simulation을 행하였으며, 1W 백색 LED 6EA를 사용하여 휴대용 LED Lighting System을 개발하였다. LED Lighting System은 solar cell 충전 회로 및 LED SMPS 구동회로 설계, 글래이차단을 위한 리플렉터 설계, 방열 설계 및 기구 구조 설계를 통하여 개발되었으며, 직접 시제품을 제작하고 그 성능을 측정하였다.

1. 서 론

각 국가는 전 세계적인 고유가정책에 따라 에너지자립도를 높이기 위하여 최선을 다하고 있다. 특히 태양광을 이용한 에너지 대체방법을 선택하는 국가가 늘고 있으며, 이를 이용한 다양한 제품개발에 노력하고 있다. 태양광과 LED 접목제품은 효율 및 수명 등에서 다른 제품에 비교하여 우수한 성능을 가지고 있어, 두부류의 접목제품에 대한 수요는 폭발적으로 증가할 것으로 예상된다. 특히, 주5일 근무로 인한 레저 활동의 증가와 보다 풍요로운 생활에 대한 현대인들의 요구는 태양광과 LED광원을 이용한 휴대용 조명장치의 중요성을 점차적으로 증가시키고 있다. 이에 따라서 본 논문에서는 Solar Cell을 이용한 충·방전 회로에 의하여 구동되는 야외 캠핑용의 휴대용 조명시스템을 개발하였다.

적용하고자 야외에서 텐트에 적용하는 것으로 가정하여 시뮬레이션을 진행 하였으며, 설치 장소는 광주로 선정 하였다.

Solar PRO Ver.3.0을 이용하여 시뮬레이션을 실행하여, 적용하고자 하는 Solar Cell의 전기적 특성인 I-V 특성을 계산한 후, 충전회로 설계에 필요한 입력 전압 및 입력전류를 선정하였다. 시뮬레이션 결과 충전회로의 최대 입력 전압은 23V 이며, 최대 입력 전류는 1.3A이다.

2. Solar cell을 이용한 휴대용

조명시스템 설계

2.1 Solar cell 선정 및 태양광 Simulation

Solar Cell Simulation을 위하여 Solar PRO Ver.3.0을 이용 하였으며, Solar Pro Ver.3.0은 Solar Cell 설치 장소의 상세한 데이터를 입력함으로써 Solar Cell 어레이를 구성하는 모듈에 대해서 회로방정식을 세우고 그 특성을 계산하며, 그 외의 요인인 건물의 경도, 위도, 모듈의 방위각, 경사각, 그리고 주위 건물에 대한 그림자의 영향 등을 고려하여 발전 전력량을 계산하고, I-V 특성이나 발전량, 일사량 등을 계산한다. 시제품에 적용된 Solar Cell은 FIEXCELL 사의 SUNPACK 14W를 적용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 휴대용 조명시스템에

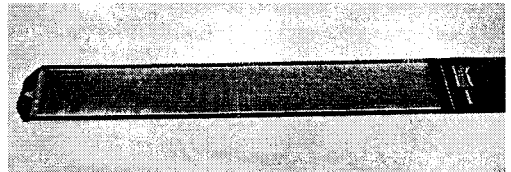


그림 1. 휴대용 조명시스템의 Solar Cell 형상

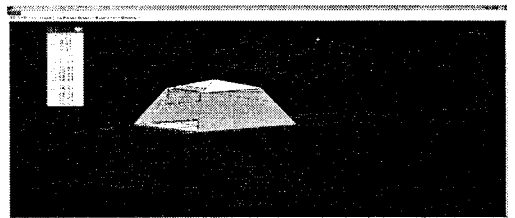


그림 2. 태양광적 변화에 대한 시뮬레이션

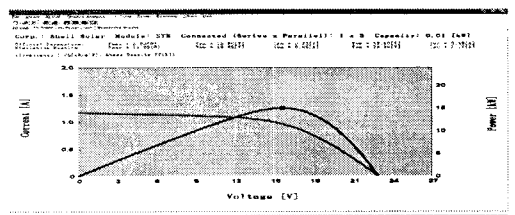


그림 3. Solar cell I-V 특성 시뮬레이션

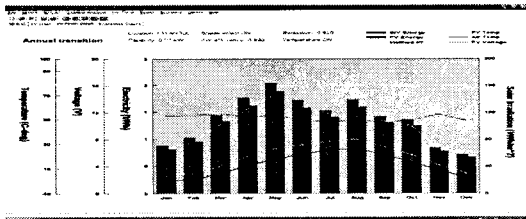


그림 4. Solar cell 전기적, 열 특성 시뮬레이션(1년)

2.2 LED 선정 및 Module 광학 설계

2.2.1 LED 선정 및 광학적, 전기적 성능측정

개발대상인 조명모듈은 휴대용이므로 그 크기는 최대한 작아야 한다. 조명모듈의 크기는 LED Package에서 발생하는 열을 최대한 방출하기 위한 Heat Sink의 유무에 따라서 그 크기가 결정된다. 따라서 휴대용 조명모듈을 개발 하는 데에 될 수 있는 한 열방출 구조가 용이한 Package를 선정하였다. 그림 5는 휴대용 조명모듈에 적용된 LED Package의 형상을 나타내고 있다. 그림 5의 LED Package는 A(사)의 1W 고출력 LED이고 그 구조를 보면 열 방출을 위해서 다른 Package와는 다른 독특한 구조로 되어있다. 그림 5의 Package 외곽에 있는 홈을 통하여 나사로 Heat Sink와 직접 연결되고 이렇게 함으로써 LED에서 방출되는 열을 효과적으로 Heat Sink를 통하여 발산할 수 있다. 또한 LED Package의 전기적 접속은 그림 5의 뒷면에서 보이는 플러그를 소켓에 접속하고 소켓에 전류를 공급하여 점등한다. 소켓의 구조 또한 그림 5에 나타낸다.

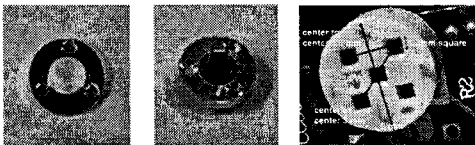


그림 5. LED 형상 및 전기적 접속을 위한 소켓 구조

이와 같이 선정된 LED Package의 광학적, 전기적 성능측정 결과를 표 1에 나타낸다. 표 1을 보면 광속은 30.73lm으로 측정되었다. 색온도 값은 5244K로 측정되었고, 배광특성은 그림 6과 같다.

표 1. LED Package의 광학적, 전기적 특성 측정결과

	Manufacturer Data	Measurement data
정격 전류[mA]	350.00	349.71
정격 전압[V]		3.46
정격 전력[W]	1	1.21
광속[lm]	70~90	30.73
중심 광도[cd]		80.66
지향각[deg]		131.20
발광 효율[lm/w]		25.40
색온도[CT]	5000~6000K	5244K
색좌표		x: 0.3382 y: 0.3391

그림 6은 선정된 LED Package의 지향각을 나타내고 있으며 측정은 한국광기술원의 OL770이라는 장비를 이용하였다. 측정결과를 보면 Lambertian 타입의 약 131°의 매우 넓은 지향각을 가지고 있다.

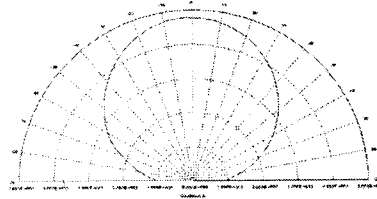


그림 6. LED 패키지 지향각 측정결과

2.2.2 LED 배치 및 눈부심 방지를 위한 루버, 확산판 설계

휴대용 조명기구 설계를 위해서 LED 광원모듈에 들어갈 LED의 개수를 선정하고 그 배치를 결정하였다. 캠핑용 텐트의 면적을 조명하기 위해서는 최소한 250lm 이상의 광속이 필요하다. 따라서 LED Package의 측정값을 고려하여 150×40mm인 광원 모듈의 크기에 30lm인 LED Package를 6개 배열하기로 하였다. 따라서 휴대용 조명기구 한 개는 조명기구 효율을 고려하지 않는다면 180lm이 되며, 이것을 텐트 내에서 2개를 설치한다면 360lm이 될 것이다. 이 값에 기구효율 70%로 가정한다면 텐트 내 조명을 위한 요구광속인 250lm의 값을 만족 시킬 수 있다. 따라서 휴대용 조명기구는 2개를 제작하는 것으로 하고 캠핑용 텐트 내에서는 휴대용 조명기구 2개를 설치하는 것을 목표로 하여 광학설계를 실시하였다. 그림 7은 루버의 간격 및 높이를 계산하기 위한 캠핑용 텐트 내에서의 조명기구 위치 및 설치간격에 따른 기하학적 구조를 나타내고 있고 그림 8은 루버 적용시의 기구 구조를 나타내고 있다. 그림 9와 10은 루버와 확산판 적용시의 배광 시뮬레이션 결과이다.

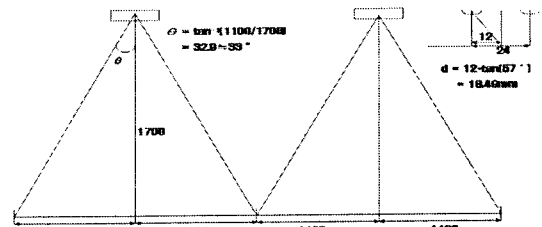


그림 7. 캠핑용 조명기구의 루버설계를 위한 기하학적 구조

그림 7에서 휴대용 조명모듈 전체의 크기는 150×40mm 이고, 조명기구가 폭 4.4m인 캠핑용 텐트 내에서 1.7m의 높이에 2개가 위치하였을 때의 조명기구 1개가 조명하여야 할 면적은 한 변 2.2m 이다. 이때 조명기구 발산광의 Cut-Off Angle은 그림에서와 같이 약

33°이다. 휴대용 조명모듈 내 LED의 설치간격이 24mm 일 때 LED Package 중심과 루버와의 간격은 12mm이고 이때 Cut-Off Angle 33°를 만족시키기 위한 루버의 높이는 18.49mm가 된다. 따라서 휴대용 조명모듈에 적용되는 루버의 높이는 18.49mm이고 루버 설치간격은 24mm, 루버 폭은 40mm가 된다.

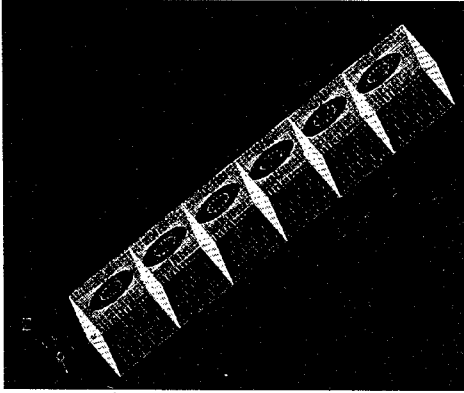


그림 8. 루버 적용시의 기구 구조

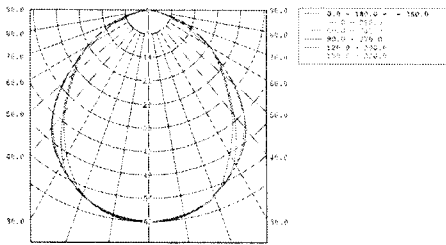
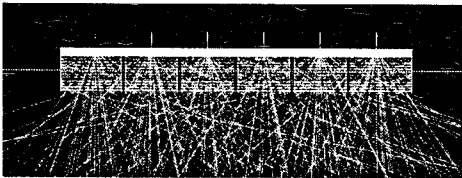


그림 9. 루버 적용시의 Ray tracing 및 배광

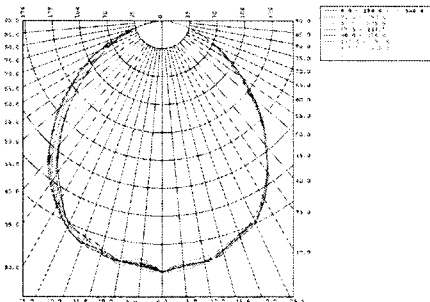
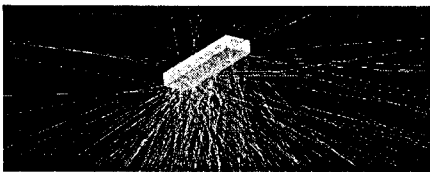


그림 10. 확산판 적용시의 Ray tracing 및 배광 2.3 조명기구 방열설계 및 기구구조설계

2.3.1 휴대용 조명기구 방열 설계

Solar cell을 장착한 휴대용 조명기구는 그림 8과 같이 LED가 1차원적으로 배열되어 폭이 좁고 길이가 긴 구조로 되어 있다. 조명기구의 방열 구조는 메탈 PCB와 접촉한 heat sink는 LED에서 발열되는 열을 또 다른 heat sink 역할을 하는 외벽에 전달하고, 외벽에는 공기가 순환될 수 있는 다수의 heat sink fin으로 구성되어 열전달이 조명기구 중심부의 회로 구성판과 외부에서 동시에 효율적으로 진행되도록 설계되었다. 방열판 및 시스템 전체의 방열 해석을 위하여 1/4모델을 사용하였으며 방열판의 물질은 가공성과 열전도성을 고려하여 열전도도(thermal conductivity) k 는 $171 \text{ W/m}^2\text{K}$, 비열(specific heat) $C_p = 798 \text{ J/kg}^\circ\text{K}$ 인 aluminum 6061 계열을 사용하였다. 그림 11에 방열 해석을 위한 1/2 모델을 나타내었다. 일반적으로 알루미늄은 무게가 가볍고 열전도도가 우수하므로 휴대용 조명기구 설계에 적합한 물

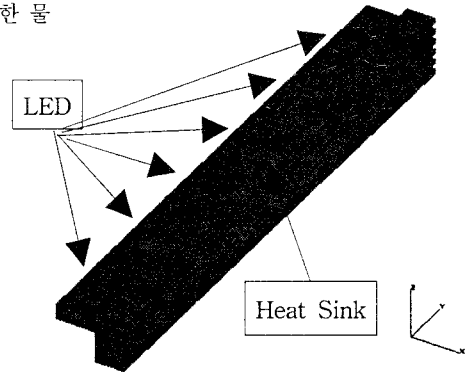


그림 11. 휴대용 조명시스템의 1/2 방열구조 모델 (LED는 파란색으로 표현됨)

방열 해석 모델은 LED가 위치한 메탈 PCB와 heat sink를 일체화하여 회로 구성물을 부착하기 위한 중심 부분의 판과 접촉된 조명기구 외벽에서 열 교환이 이루어지도록 최적화하였다. 이를 위하여 조명기구의 외벽은 heat sink 와 fin을 구성하였으며 이와 같은 구조는 열전달 효과 뿐 아니라 조명기구의 무게를 줄이는 측면에서도 효과적인 구조가 될 수 있다. 이 모델의 좌표계는 길이 방향 (가로방향) x축, 두께 방향 (세로 방향)을 y축으로 하였으며 광축 혹은 빛이 나오는 방향을 z축으로 가정하였다. 방열 핀의 배열은 조명기구 외벽을 따라서 y 방향으로 홈을 만들고 x축 방향 쪽으로 길게 배열하였으며 핀의 길이는 외관의 모양을 고려하여 디자인 하였다. 방열 해석은 LED 자체의 온도변화를 해석하기 보다는 LED가 배열된 위치에서 전달된 열이 방열

시스템 (heat sink 와 연동된 외부구조)에 의하여 전달 되는 량을 해석하기 위한 글로벌 모델링을 수행하였다. 모델링을 통한 최적화는 최대 온도변화를 기준으로 하였다. 이 모델의 온도조건은 주위온도 25°C로 설정하여 자연대류에 의한 heat convection coefficient 값을 5W/m²C로 사용하여 휴대용 조명기구 전체의 온도변화를 계산하여 그림12에 정리하였다. 그림 12의 결과는 1W LED 전체의 발열을 가정한 것으로 1W LED 6개가 방출하는 열로부터 계산된 열 분포이며 이때의 최대온도는 57°C가 됨을 알 수 있다.

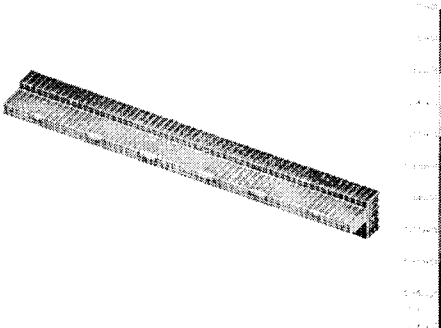


그림 12. 휴대용 조명기구의 방열해석 결과 (최대온도 57°C, 주위온도 25°C, h=5W/m²C)

휴대용 조명기구의 방열 구조는 배치된 LED의 개수에 비하여 방열을 위한 접촉 면적이 상대적으로 충분하여 현재의 구조로 충분한 방열 효과를 확인 할 수 있었다.

2.3.2 조명기구 구조 및 외함 설계

다음 그림 13은 휴대용 조명기구의 Heat Sink 상단부의 구조를 나타내고 있다. 4개 홀을 내어 Heat Sink의 상단부와 하단부를 결합할 수 있도록 하였다. Heat Sink를 상단부와 하단부로 나눈 이유는 두께가 너무 두꺼우면 가공이 쉽지 않기 때문이다. 그림 14는 조명기구 외함의 평면도와 측면도를 나타내고 있다. 조명기구 외함 윗면과 측면에 홀을 내어 Heat Sink로부터 방출되는 열을 효과적으로 발산하도록 하였고 측면에는 Heat Sink와 나사로 결합할 수 있도록 홀을 내었다. 조명기구 외함의 두께는 3mm이고 외함 내부에 루버나 확산판이 결합 될 수 있도록 하였다.

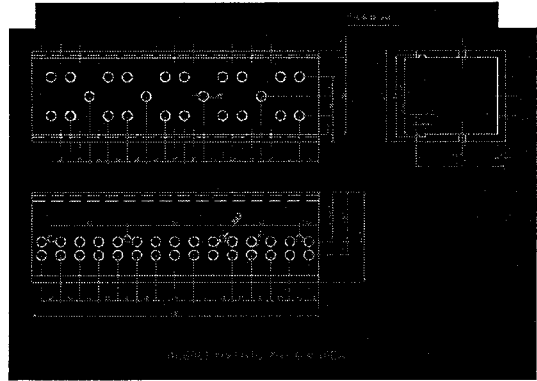


그림 13. 조명기구 외함 설계

2.4 Solar Cell 충·방전회로 설계

태양광 시스템에서 효율과 수명을 결정하는 중요한 요소는 바로 충·방전 컨트롤러이다. 충방전 컨트롤러는 태양광 모듈에서 발전된 전력이 축전지에 충전되는 것을 제어하고, 축전지의 전력이 부하에 공급되는 것을 제어하여 보다 높은 효율을 낼 수 있도록 하는 두뇌와 같은 역할을 한다[1]. 충전회로는 용도에 따라 다양한 충전회로가 사용되며, 큰 전류로 단시간에 충전을 할수록 과충전 방지의 요구가 엄격하게 적용된다. 또한 전압이나 전류를 정밀하게 제어함과 동시에, 만충전을 검출하여 충전을 중지하지 않으면 안 되고, 과충전을 방지하는 것과 마찬가지로, 충분히 충전하는 것도 필요로 한다. 휴대용 조명기구에 적용된 충전 방식은, 불충분한 충전으로 중지하면 전지의 사용시간이 단축되므로 충전 시간을 단축하기 위해 전지 셀의 최대 충전전압, 최대 충전 전류 이상의 전압, 전류를 펄스로 가하고, 휴지시간의 전지 전압을 검출하여 충전을 정지 시키는 방식을 사용하였다. 그림 15는 이와 같은 방식의 충전회로를 나타내고 그림 16과 17은 그 때의 충전 파형을 나타낸다.

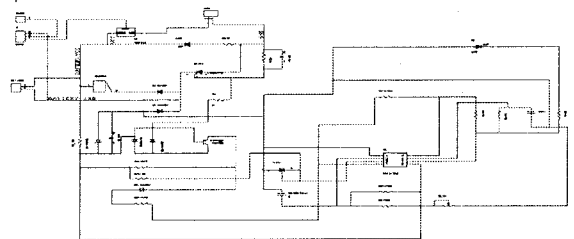


그림 15. 충·방전 회로도

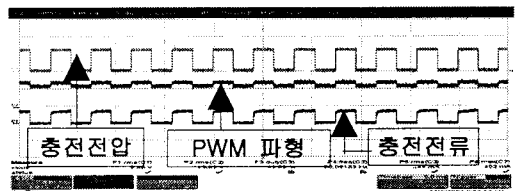


그림 16. Battery 충전 전압 전류 파형

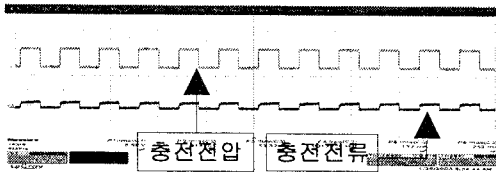


그림 17. Battery 충전 전압 전류 파형

2.5 LED Module 제어회로 및 구동회로 설계

Solar cell을 이용한 충전회로를 구현하기 위해서는 전원회로에 Switching Pulse가 필요하게 된다. 이를 MicroController를 사용하여 충전 회로에 60Hz의 Switching Pulse를 출력하고 LED 광원모듈의 Dimming 제어를 위하여 1KHz의 PWM(Pulse Width Modulation) 신호를 발생할 수 있도록 설계 하였고, 이 PWM 신호는 스위치를 이용하여 Duty Ratio Control이 가능하게 설계 하였다. 또한 60Hz Switching Cycle과 1KHz의 PWM을 구현하기 위하여 프로그램으로 제어가 가능할 수 있도록 Micro Controller를 사용하였고 내부에 Flash memory를 가지고 있어서 외부의 설계가 보다 단순화할 수 있도록 하였다. 그리고 MicroController의 내부 타이머 2개를 이용하여 60Hz Switching Cycle과 PWM을 발생시키는 주요 기능을 수행할 수 있도록 설계를 진행하였다. 제어회로를 구현하고자 하였던 개념도를 그림 18에 나타낸다.

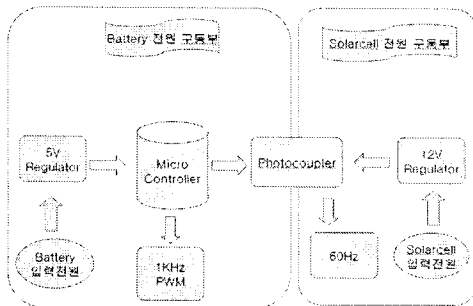


그림 18. Solar cell 제어회로의 Block Diagram

그림 19는 제어회로를 설계하기 위한 회로도로 Orcad로 작성하였으며 MicroController와 Regulators, Photo coupler 등을 사용하여 회로를 구성하였으며 Reset 스위치와 Dimming Control 스위치를 추가 배치 시켰다.

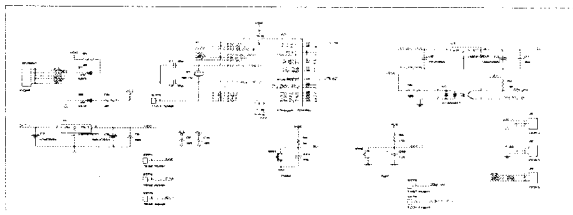
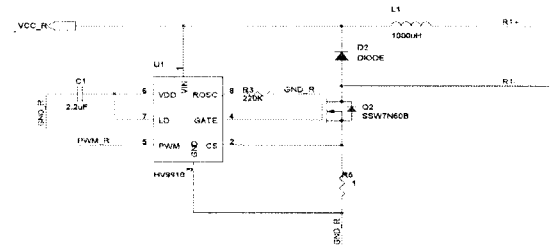


그림 19. 제어회로 구현을 위한 회로도

LED 구동회로 설계는 그림 20의 LED 구동회로 DC-DC Block Diagram에서 볼 수 있듯이 Buck-Boost 방식으로 구성하였다. 전력 반도체 스위치, 커패시터, 인덕터, 다이오드로 구성하였으며, DC-DC 구동회로에서 반도체 스위치는 입력 측에서 출력 측으로 전달되는 에너지를 제어하는 기능을 한다. 또한 인덕터와 커패시터는 에너지를 전달하는 매개 역할을 하거나, 출력 전압의 불필요한 리플 성분(ripple components)을 제거하기 위한 필터 역할을 할 수 있도록 설계하였다. 그림 20은 SMPS를 구현하기 위하여 HV9910을 사용하여 설계한 회로도를 나타내고 있다.

그림 20. HV9910을 이용한 LED SMPS 회로



3. 시제품 제작 및 성능 측정

3.1 시제품 제작

그림 21은 LED 조명모듈의 각 부품과 각 부품을 조립하였을 때의 시제품 형상을 나타내고 있다. 그림 21의 좌측 그림에서 왼쪽부터 PCB, Heat Sink 상단과 하단부, 루버, 조명기구 외함 순이다. Heat Sink의 내부에 LED를 전기적으로 접속할 수 있도록 하는 소켓이 접속된 PCB가 삽입 되도록 하였다. 조명기구 외함 윗면과 측면에는 홀을 내어 Heat Sink로부터 방출되는 열을 효과적으로 발산하도록 하였고 측면에는 Heat Sink와 나사로 결합할 수 있도록 홀을 내었다. 조명기구 외함의 두께는 3mm이다.

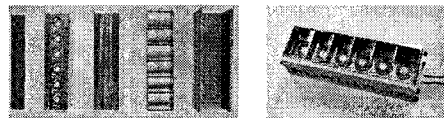


그림 21. LED 조명기구 측면도

그림 22는 충전회로의 시제품을 보여 주고 있고 크기는 길이 9Cm, 폭 6Cm, 높이 2.5Cm 이다.

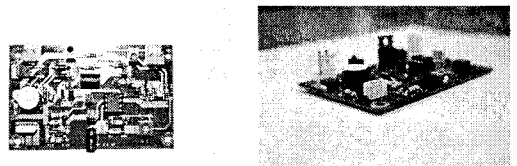


그림 22. 충전회로 시제품

그림 23은 제어회로의 시제품 형상을 나타내고 있고, 두 구역으로 나뉘 서로 다른 공급 전원으로 구동하도록 설계 하였다. 시제품 크기는 길이 9Cm, 폭 6Cm, 높이 1Cm로 제작하였다.

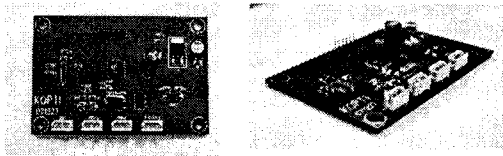


그림 23. 제어회로 시제품

그림 24는 DC-DC LED구동회로 시제품 형상을 나타내고 있고 크기는 길이 6Cm, 폭 4Cm, 높이 1Cm로 제작하였다.

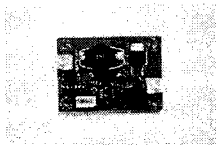


그림 24 DC-DC 구동회로 시제품

그림 25는 충전전회로, Battery, DC-DC 구동회로 및 제어회로를 통합하여 충전전회로에 들어오는 전압과 LED 모듈 DC-DC구동회로를 동시에 PWM 신호제어에 의하여 충전전 전압 과 LED 밝기를 조절하였다.

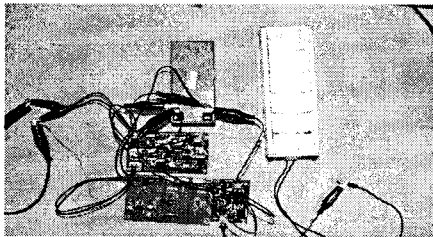


그림 25. Micro controller를 이용한 LED 광량 조절

3.2 시제품 성능

3.2.1 전기적 성능

표 2는 LED Module 시제품의 전기적 특성 측정 결과를 나타낸 것으로, LED DC-DC 구동회로 시제품의 입력 전압 사양은 12Vdc (+/-10%)에서 동작되며. 출력 전압은 17Vdc, 700mA의 출력을 특성을 가지고 있다. 그리고 85% 이상의 회로효율을 나타내고 있다.

표 2. LED Module 시제품의 전기적 특성 측정결과

Vin [Vdc]	Iout[A]	Vout[Vdc]	Pout [W]	Pin [W]	Effi[%]
12	0.72	12	8.4	8.7	96%

4.2.2 광학적 성능

다음 그림 26은 시제품의 확산판 적용시의 배광을 측

정한 결과이다. 배광측정은 광기술원이 보유하고 있는 Goniometer를 이용하였다. 최대 광도의 1/2 발산각을 보면 개발 목표인 100°를 만족하고 있다.

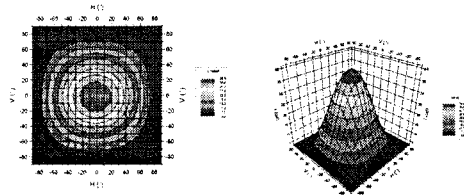


그림 26. 확산판 적용시의 시제품 배광 측정결과

또한 광속은 루버 적용시 154lm, 확산판 적용시 149lm이고 소비전력은 각각 7.9W이다. 따라서 조명기구 2개로 적용할 때의 소비전력은 약 16W이고 광속은 루버 적용시 300lm, 확산판 적용시 298lm이다. 따라서 광속은 개발목표인 250lm 이상을 루버와 확산판 적용시에 모두 만족시켰다. 그림 27은 루버 적용시의 시제품의 색온도 및 색좌표 측정값을 나타내고 있다. 그림 27을 보면 색온도는 6192K이고 색좌표는 x=0.3191, y=0.3197로 측정되었다. 또한 C.R.I는 80으로 측정되었다.

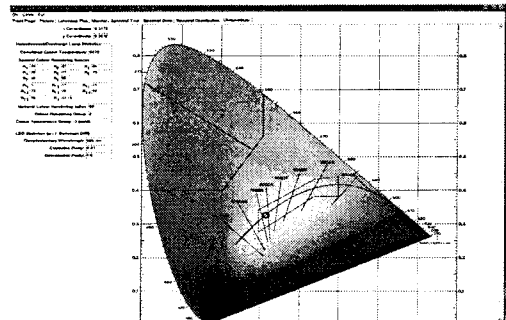


그림 27. 루버 적용시의 색온도 및 색좌표 측정결과

4. 결론

Solar Cell을 이용한 15W 휴대용 조명 시스템을 개발하기 위하여, 태양광 궤적 시뮬레이션, 충전회로 설계, 구동회로 및 제어회로 설계, 눈부심 방지를 위한 광학 설계, 열적 안정화를 위한 방열설계를 마치고 시제품을 제작하였다. 시제품 제작 결과 광속 250lm 이상, 회로효율 85%이상, 색온도 6192K, C.R.I 80을 만족시켰다.

최근 주 5일 근무제로 인한 레저활동의 증가와 보다 풍요로운 생활에 대한 요구가 증가하는 현대인들에게 태양광을 이용한 휴대용 조명장치에 대한 활용도는 점차적으로 증가할 것이다.

참고 문헌

- [1] 이성룡, 진철환의 "Implementation of the stand-alone PV Generation System for the LED Road Sign" 전력전자학회 추계학술대회 2003.11.22
- [2] 日本照明學會, "LED 照明ハンドブック", 2006, pp.28~41