

A Study on the Performance Analysis for the CPV Module Applying Sphericalness Lens

정병호* · 김남오† · 이강연**
(Byeong-Ho Jeong · Nam-Oh Kim · Kang-Yoen Lee)

Abstract - Next generation concentrating photovoltaic technologies could have a large-scale impact on world electricity production once they will become economically attractive and grid parity will be reached. Multi-junction solar cells will be characterised by a high value of the cell economical performance index if the cells were able to operate at high concentration level. Concentrating the sunlight by optical devices like lenses or mirrors reduces the area of expensive solar cells or modules, and, moreover, increases their efficiency. Accurate and reliable tracking is an important issue to maintain high the CPV system output power. Further, for high concentration CPV systems, the actual tracker cost is about 20% of the total CPV system cost. In this paper high-concentration is defined as systems using concentration ratios well above 100 times the one sun intensity and trackerless CPV system studied. Using sphericalness lens and parallel MJ cell connection method were suggested and achieved experiment on a clear day in summer. Development of these high performance multi-junction CPV module promises to accelerate growth in photovoltaic power generation.

Key Words : CPV System, Photovoltaic, Sphericalness Lens, Multi-Junction Solar Cell, Parallel MJ Cell.

1. 서론

산업발전의 가속화에 따른 에너지 소비량의 증가로 에너지 자원의 급속한 고갈과 환경문제가 대두되는 가운데 무한정·무공해의 신재생 에너지에 대한 연구기술 및 보급기술에 대한 관심이 증가하고 있는 실정이다[1,2]. 한국의 전력상황은 2004 ~ 2017년의 13 여년의 기간 동안 소비전력이 평균 2.5% 증가할 것으로 전망되며 최대전력은 평균 2.7% 증가할 것으로 예상된다. 따라서 전력발전설비 확충에 있어 다양한 대체에너지 기술 중에서 태양광발전 시스템은 발전소를 보완할 수 있는 중요한 에너지산업의 한 부분으로 분산전원의 역할을 분담해야만 한다[3]. 태양광발전 시스템 산업의 성장과 더불어 현재 단결정실리콘 태양전지의 산업·경제적 단점뿐만 아니라 기술적인 단점을 보완하고자 하는 다양한 기술이 소개되고 있으며 이러한 기술 분야는 얇은 두께의 실리콘 기판과 유리 기판을 이용하는 실리콘 박막형 태양전지개발 그리고 면적대비 발전효율을 극대화하기 위한 집광형태양전지 등의 관심이 고조되고 있다[4]. 다중접합 태양전지를 이용한 집광형태양광발전 시스템은 기존의 평면형 시스템보다 더욱 높은 효율을 이용한 전력을 생산한다. CPV(Concentrating Photovoltaic) 시스템은 집광구조, 온도 제어 그리고 BOS 단가의 분산효과를 통한 최대성능을 발휘할 수 있는 모듈의 설계가 필요하다. 셀의 변환효율은 직렬

저항의 한계성능에 이를 때까지 조사강도에 따라 발전량은 증가한다. 2007년 Spectrolab사에서 격자부정합(Metamorphic) 성장기법을 이용한 InGaP/GaAs/Ge 적층형 태양전지를 이용한 태양전지셀은 240sun의 플래시 테스트에서 40.7%에 이른다[5,6].

실리콘 태양전지 모듈과 달리 렌즈나 반사판과 같은 광학 장치를 적용한 집광형태양광발전 시스템은 값비싼 태양전지 셀이나 모듈의 면적을 줄여 면적대비 발전효율을 높이는 데 기술적인 지향점이 있어 고효율 고집적발전방향에 적합한 태양광발전 시스템의 발전방향과 일치하는 장점이 있다. 집광형태양전지 모듈은 유리렌즈의 무게나 두께를 프레넬렌즈형상가공을 통해 고분자화합물은 PMMA 소재나 PC 소재의 고투과율 소재를 사용하여 200 ~ 500 배율까지 높은 배율을 통해 태양전지 효율을 극대화함으로써 셀의 비중을 낮추고 면적대비 발전효율을 높일 수 있는 대안으로 관심 받고 있는 분야이다[7]. 그러나 $\pm 1^\circ$ 이상의 높은 태양위치 추적을 위한 정밀추적기가 부착되어야 하는 단점이 있고 추적기의 고장이나 추적실패에 따른 효율저하는 보완해야 할 분야이다. 이러한 단점을 극복하기 위해 가동부 보다는 고정부를 이용한 렌즈형상에서 찾고 있으며 그에 따른 보완기술로 등장한 형태가 구형렌즈이다. 구형렌즈를 적용한 집광형태양전지 모듈은 고굴절율을 갖는 PMMA나 galss 소재의 렌즈를 적용하여 추적기가 필요없는 모듈을 설계할 경우에 적용할 수 있는 형태로 태양전지 모듈에 대한 성능과 발전효율 분석 등을 통해 실현가능성과 실용화 가능성에 대한 연구가 이루어져야 한다. 따라서 본 논문에서는 구형렌즈를 적용한 집광형태양전지 모듈의 어셈블리를 통해 시스템 성능과 발전특성을 분석함으로써 집광형태양전지 모듈로서의 타당성과 활용가능성을 입증하고자 한다. 또한, 구형렌즈의 타당성은 마이크로 태양전지모듈화 기술과 BIPV 시스템 기술에

† 교신전자, 정회원 : 조선이공대학 전기과 교수 · 공박
E-mail : nokim@chosun-c.ac.kr

* 정회원 : 남부대학교 교수 · 공박

** 정회원 : 조선대학교 전기공학과 겸임교수 · 공박

접수일자 : 2010년 6월 20일

최종완료 : 2010년 7월 26일

대한 기반기술로 고효율 고집적태양광발전 시스템의 성능향상과 다양한 어플리케이션의 활용기술에 기초연구를 목적으로 하고자 한다.

2. 실 험

2.1 III-V 족 화합물 CPV 모듈

2.1.1 III-V 족 화합물 태양전지 셀의 특성

III-V 족 집광형태양전지 모듈에 적용되는 화합물반도체 태양전지로 GaAs, InGaP를 기반으로 하는 태양전지의 특징은 직접천이형 밴드갭을 가지고 있어 실리콘 태양전지에 비해 광 흡수율이 높으며 공유결합하고 있기 때문에 우수한 물성을 가지고 있다[8]. 또한, 텐넬정선 기술을 이용하여 다양한 흡수대역을 가지는 태양전지를 monolithic하게 적층할 수 있어 단일접합 구조 대신 다중 접한 텐덤 구조의 태양전지를 만들 수 있다. 이러한 텐덤 구조의 화합물반도체 태양전지는 MOCVD 법으로 에너지 밴드 갭이 다른 물질을 적층하여 태양광의 대부분의 스펙트럼을 효율적으로 사용하는 것이 가능하기 때문에 50% 이상의 초고효율 태양전지의 개발 가능성이 있다.

III-V 족 화합물반도체 태양전지 삼중접합 텐덤 셀의 각 층별 구조에 대한 단면을 그림 1에 나타내었다. 그림 2는 텐덤 셀의 효율적인 스펙트럼 이용구조로 세 개의 다른 에너지 밴드 갭을 갖는 물질을 적층하여 제작된 텐덤 구조와 이 구조의 각 층에서 사용되는 태양광 스펙트럼 영역을 나타낸다.

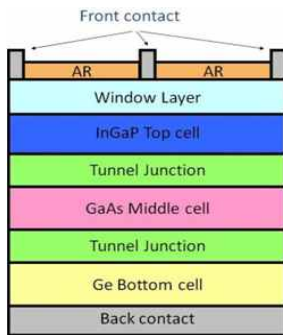


그림 1 III-V 족 CPV 셀의 구조

Fig. 1 III-V CPV Cell structure

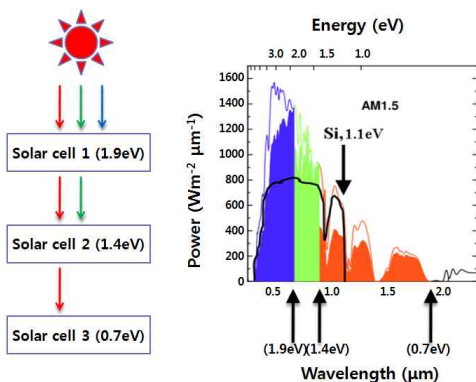


그림 2 텐덤 셀의 효율적인 스펙트럼 이용구조

Fig. 2 Efficiency spectrum utilization structure of tandem cell

2.2 구형렌즈를 적용한 CPV 모듈의 구조

집광형 장치는 PV 모듈에 도달하는 태양빛을 증가 시켜주는 역할을 하며, 모듈의 형태에 따라 원형 집광장치와 선형 집광장치로 구분할 수 있다. 원형 집광장치는 돋보기, 원형 프레넬필름, 그리고 접시형이 있으며, 선형 집광장치는 선형 프레넬렌즈, 구유(Trough)형 등이 있다. 집광형태양광 발전 시스템은 집광률(Concentration Ratio)에 따라서 저집광(10 배율 이하), 중집광(10 ~ 100 배율), 그리고 고집광(100 ~ 1000 배율 이상)으로 구분하며 집광하는 광학시스템에 따라 포물면 거울(Parabolic Mirror)을 이용하는 반사형과 프레넬 렌즈를 이용한 굴절형으로 나뉜다. 고집광의 경우는 산란광보다는 직사광을 주로 이용하므로 추적기 시스템이 필수적이며 여기에 적용되는 추적기 시스템은 태양전지가 태양빛을 수직입사 하도록 하여 빛의 입사량을 극대화해야 하기 때문에 정확한 추적기 성능이 필요하다. 그러나 집광형태양전지 모듈은 정밀한 태양위치 추적알고리즘을 바탕으로 한 기계적 동작의 안정성이 높아야 하고 옥외 동작하므로 이에 대한 높은 내구성 및 많은 구동에너지 등이 요구되므로 그 효율성에 의문을 제시하는 경우가 많다.

스넬의 법칙(snell's law)은 입사광 P의 입사각 θ_1 과 굴절광 Q의 굴절각 θ_2 의 sin값의 비율은 매질이 변하지 않는다면 항상 일정하다는 법칙이므로 식 (1)와 같다.

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

집광형태양광발전 시스템은 높은 직달일사량과 정밀한 추적기 시스템의 조건을 만족해야 한다. 그러나 추적기 시스템은 소내소비전력을 사용하기 때문에 높은 성능의 추적기 시스템은 오차범위를 최소화하기 위해 동작간격을 10초 이내의 1° 이내 오차범위에서 지속적인 동작을 수행해야 하므로 소비전력이 매우 커져 전체 시스템의 가격과 성능면에서 큰 부담으로 작용한다. 따라서 렌즈기술의 확립을 통해 추적기의 성능을 낮추거나 보완하는 기술이 최근에 실용화 측면에서 접근되고 있다. 그림 3은 본 시스템에서 적용된 구형 렌즈의 형상이며 입사광에 따른 굴절광의 형상을 나타낸다. 스넬의 법칙에 따른 고굴절의 입사광은 구형렌즈의 중앙부위로 집광하게 되어 직접 태양전지 셀에 조사하는 방식으로 활용될 수 있는 구조이다. 구형렌즈의 소재에 따라 굴절률의 차이를 가지나 PMMA 소재의 굴절률은 1.4의 특성을 갖는 렌즈로 동지와 하지의 남중고도각의 차이인 경사각

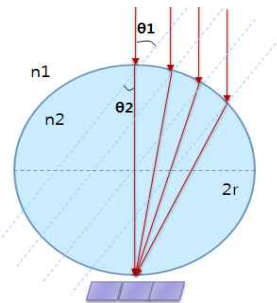


그림 3 구형 렌즈를 적용한 CPV의 형상

Fig. 3 CPV shape applied to sphericalness lens

23.5°의 보정과 120° 방위각은 셀을 4개 병렬 연결함으로써 보정할 수 있기 때문에 본 실험에서는 CPV 셀을 4개를 병렬 연결시켜 추적기 없는 집광형태양전지 모듈을 구성하였으며, 표 1에 CPV 모듈의 형상을 나타내었다.

표 1 CPV 모듈의 형상

Table 1 CPV module of feature

규격	내용
셀지름	5 × 5 mm (1 mm boundary)
병렬연결개수	4개 20 mm
직렬연결개수	2개
셀면적	19.625 mm ²
배율	125X
렌즈단면적	3,117 mm ²
렌즈지름	63 mm

CPV 모듈의 집광효율은 태양광 집광비(X_g)는 집광장치에 도달하는 총 일사량(A_{conc}) 대비 CPV 모듈 표면에 도달한 총 일사량(A_{pv})의 비와 같으므로 식 (2)과 같다.

$$X_g = \frac{A_{conc}}{A_{pv}} \tag{2}$$

실험에 의한 집광비는 일사조건 1,000 W/m²의 조건하에서 집광되기 전 PV 모듈의 개방전류 (I_{sc})와 집광된 후 PV 모듈에서의 개방전류 ($I_{sc}(X)$)의 상관비로 나타내며 실제 집광비(X)는 식 (3)과 같다.

$$X = \frac{I_{sc}(X)}{I_{sc}(at 1,000 W/m^2)} \approx \frac{G_X}{G} \tag{3}$$

여기서 G 는 집광되기 전의 일사량, G_X 는 집광후의 일사량이다. 집광효율은 이론적 집광비 (X_g)와 실제 집광비(X)의 상관관계로 구할 수 있으며 식 (4)과 같다. 또한, 발전효율 분석을 위한 집광형 태양전지모듈의 효율은 식 (5)과 같다.

$$\eta = \frac{G_X}{G} \cdot \frac{1}{X_g} \tag{4}$$

$$\eta(\%) = \frac{E_{module}}{E_{sun} \cdot A_{module}} \times 100\% \tag{5}$$

여기서, E_{module} 은 집광형 태양전지모듈에서 생산된 에너지나 전력이고 E_{sun} 은 단위면적 당 태양으로 발생된 에너지나 전력이고 A_{module} 은 태양전지모듈의 표면 면적이다.

2.3 CPV 리시버의 형태

80 °C 이하 접촉면 온도유지를 위한 METAL PCB 설계는 1.0 mm Al Base, 70 μm 동박 두께, 100 mm 절연층 두께를 갖는 PCB 보드를 적용하였고, 실리콘 Thermal greese의 성능은 열전달계수 $k = 1.2$ W/m.K, $R = 0.013$ °C-in²/W, Bond line = 15 um(@30Psi)이다. 실리콘 Thermal greese를 방열판과의 접촉을 확보하기 위하여 적용하였다. 그림 4는 CPV 모듈의 회로도이다. 하나의 모듈은 그림 4와 같이 3개의

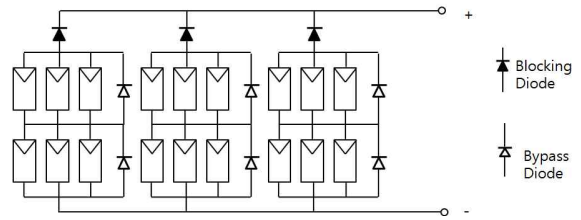


그림 4 CPV모듈의 회로도

Fig. 4 CPV module Circuit

태양전지 셀의 병렬연결을 통해 방위각의 보상을 수행하였고, 여기에 하나의 바이패스 다이오드가 부착되어 셀 과손시 발생할 수 있는 개방상태를 보정하도록 하였다. 또한, 2 개의 직렬연결은 블로킹 다이오드를 통해 이웃한 어레이에서 발생한 역전압의 유입을 차단하는 역할을 한다.

CPV는 집광구조로 인해 표면온도의 상승이 유발되는 기본구조를 갖기 때문에 높은 표면온도로 인해 발전효율이 감소하며 주변의 구조물이나 상태에 영향을 미치므로 방열구조에 대한 고려가 요구된다. 이러한 구조적인 단점을 보완하기 위해서 냉각수를 이용하거나 방열판을 이용한다. 본 실험에서는 히트싱크에 의한 자연대류에 의해 냉각을 유도하였으며 히트싱크의 규격 및 구조를 그림 5에 나타내었다. 이 열전달을 위한 푸리에(fourier's)법칙은 식 (5)과 같다.

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda A \frac{dT}{dx} \tag{6}$$

여기서 dQ/dt 는 시간에 따른 열의 전달량, λ 는 열전도계수 (W/mK)로 알루미늄의 경우 160~210, A 는 방열판의 면적, dx 는 열전달거리, dT 는 거리에 따른 온도변화이다.

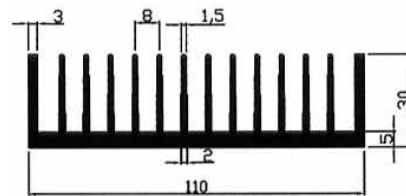


그림 5 히트싱크의 규격 및 구조

Fig. 5 Structure and size of Heat sink

3. 실험 및 성능분석 결과

실험은 구형렌즈를 적용한 CPV 모듈과 기존의 실리콘 태양전지와 동일한 조건에 24시간 동안 발전성능을 분석하는 방식으로 진행하였다. 기존의 태양광발전 시스템이 실리콘태양전지로 집중되어 있으므로 가장 비교분석하기 용이한 데이터의 확보를 위한 비교분석을 수행하였다. 그림 6은 실험을 위한 실리콘태양전지와 CPV 모듈 사진으로 실리콘 태양전지 외형은 340 × 280 mm이고, CPV의 외형은 120 × 180 mm이다. 설치위치 정보는 방위각은 정남향이며 실리콘 태양전지는 경사각 30°로 하였으며, 구형렌즈를 적용한 CPV 모듈은 경사각 10°로 고정하여 10 W급 단결정실리콘 태양전지를 사용하였다.



그림 6 실험을 위한 실리콘 태양전지와 CPV 모듈 사진
Fig. 6 Photograph of the experiment setup with Si and CPV module

AM 1.5 (100mW/cm², 25°C) 조건에서 측정한 결과, 비교실험을 위한 실리콘 태양전지는 개방전압 $V_{open} = 21.5V$, 단락전류는 $I_{short} = 690mA$, MPP 전압은 $V_{mpp} = 17.3V$, MPP 전류는 $I_{mpp} = 580mA$ 이고 충전율 FF = 0.68이다. 구형렌즈를 적용한 CPV모듈은 개방전압 $V_{open} = 3.899V$, 단락전류는 $I_{short} = 197mA$, MPP 전압은 $V_{mpp} = 3.871 V$, MPP 전류는 $I_{mpp} = 180mA$ 이고 충전율 FF = 0.73이다. 이들 결과로부터 발전효율을 식 (5)에 의하여 산출하면 실리콘 태양전지의 발전효율은 13% 이었으며, 구형렌즈를 적용한 CPV 모듈은 21%의 발전효율을 나타낸다. 그림 7부터 그림 9는 실험에 따른 CPV의

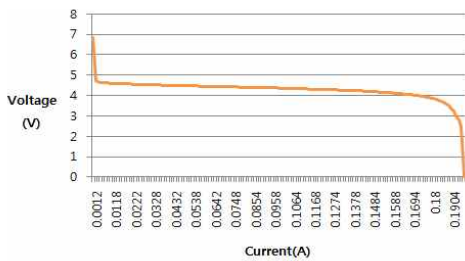


그림 7 실험에 따른 V-I 특성곡선
Fig. 7 Experimental result of the V-I characteristics curve

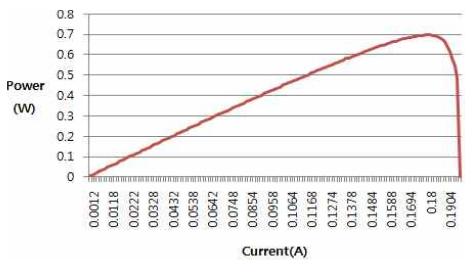


그림 8 실험에 따른 P-I 특성곡선
Fig. 8 Experimental result of the P-I characteristics curve

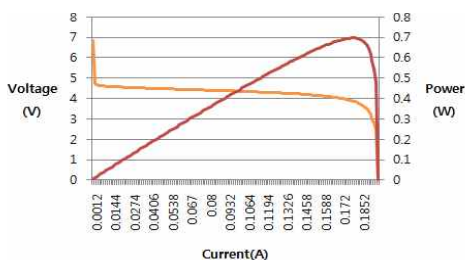


그림 9 실험에 따른 P-V-I 특성곡선
Fig. 9 Experiment result of P-V-I characteristics curve

V-I, P-I, P-V-I의 특성곡선을 나타낸다. 이는 플래쉬 테스트의 시뮬레이터를 이용한 실험결과 과형으로 실험결과를 실리콘 태양전지의 발전특성과 동일한 현상을 관찰할 수 있다.

시스템 성능분석은 일정기간동안 태양전지의 발전출력특성을 분석하는 방법으로 분석 기간 동안의 발전전력량의 산출, 변환효율 등을 기상조건(일사량, 습도, 풍속, 온도변화 등)의 변화와 이에 따른 영향을 분석함으로써 시스템효율에 직접적으로 영향을 미치는 팩터를 분석하여 설계상에서 이를 보완하여 성능의 업그레이드를 이루고자 하는 분석방법이다. 그림 10은 CPV와 실리콘태양전지 모듈의 1일 동안의 전압과 전류특성을 나타낸다.

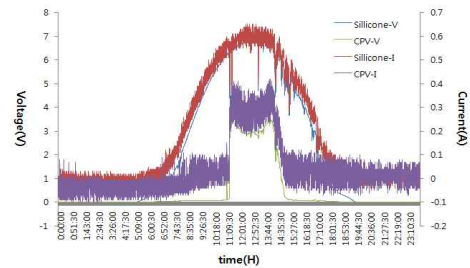


그림 10 CPV와 실리콘태양전지모듈의 1일 동안의 전압과 전류특성
Fig. 10 Voltage and current characteristics of CPV vs. Si PV module in a day

그림 11은 일사량, CPV 모듈 발전량, 실리콘태양전지 모듈 발전량을 비교한 그래프이고 그림 12는 온도와 습도, CPV 모듈 발전량, 실리콘태양전지 모듈 발전량을 비교한 그래프이다. CPV 모듈은 추적기가 사용되지 않고 셀의 병렬연결을 통해 일중 태양위치의 변위, 즉, 경사각과 방위각의 변위를 포괄영역 내부로 매칭 시키는 형태이므로 최대 발전량을 갖는 위치에서 오목한 현상을 보이고 있다. 이는 고정식 구조에서 집광형 태양전지의 병렬연결된 영역 중 상단부를 지나는 시간의 영향을 나타낸다. 여름철과 겨울철의 자오시 동안은 이러한 현상이 나타나게 된다. 집광형태양전지 셀의 온도와 습도에 영향은 거의 없는 것으로 판단되며 특히, 메탈 PCB와 방열판의 부착으로 인해 열점현상이 해소되는 것으로 판단된다. AM1.5 조건의 플래쉬 테스트에서는 셀의 접촉면 온도가 35 °C로 나타났다.

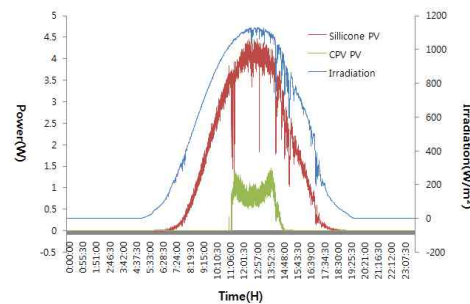


그림 11 일사량, CPV모듈 발전량, Si 태양전지모듈 발전량 비교
Fig. 11 Comparison of the Irradiation vs. CPV power vs. Si-PV power generation

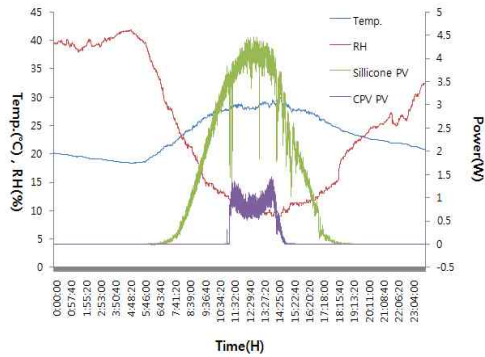


그림 12 온도와 습도, CPV모듈 발전량, Si 태양전지모듈 발전량 비교

Fig. 12 Comparison of the Temp. & %RH vs. CPV power vs. Si-PV power generation

4. 결 론

CPV 시스템은 기존에 태양광발전시스템의 방식과 달리 높은 집적도와 고효율 에너지원이라는 장점을 갖춘 시스템이다. 집광형 태양광발전시스템의 셀은 이미 수십 년간 인공위성의 전원으로 사용되어 신뢰성이 입증되었고 BOS인 유리, 플라스틱, 알루미늄과 같은 재료들 역시 대량생산의 용이함과 제품의 높은 신뢰성 및 생산성이 입증되어 전력플랜트 분야에 적용될 때 경쟁력을 갖출 것으로 예측된다.

본 연구에서는 구형렌즈를 적용한 집광형태양광발전 모듈의 성능을 분석한 결과 경사각보정기능이 확보된 결과로 20% 이상의 발전효율을 확인할 수 있었다. 또한, 태양의 위치변동에 따른 구형렌즈의 포커 영역의 불일치를 화합물반도체 태양전지의 병렬연결을 통해 보상하는 설계를 통해 추적기 없는 멀티집합 화합물반도체 태양전지를 설계하였고 이를 이용한 태양광발전 시스템의 구현함으로써 추적기 없는 새로운 CPV 발전시스템의 모델을 제시하였다. 그러나 산란일사량이 커지는 경우는 셀의 면적이 작아 그에 대한 대응이 부족한 현상이 나타남을 확인할 수 있었고 발전시간을 늘리고 성능을 향상시키기 위해서는 고품질물 렌즈 소재가 필요하였다. 향후에 실증연구를 통해 국내 환경에서 실리콘 태양전지와 비교를 통해 상업화가능성에 대한 타당성을 검토하고자 한다.

참 고 문 헌

[1] 소정훈, 최주엽, 유권중, 정영석, 최재호, “3kW급 계통 연계형 태양광발전시스템의 성능특성 비교분석에 관한 연구”, 한국태양에너지학회, Vol. 24, No. 2, 2004.
 [2] 한원석, 김현수, 최병석, 오대곤, “차세대 고효율 태양전지 기술동향”, 제 22권, 5호, 전자통신동향분석, pp. 86-94, 2007.
 [3] 강은철, 아메드 나비드, 김용환, 조일식, 이의준, “고집광 PV 모듈 성능비교 연구”, 한국태양에너지학회 2006년도 춘계 학술대회논문집, pp. 263-269, 2006.
 [4] Frank Dimorth and Saeah Kurtz, “High-efficiency Multijunction Solar Cells,” MRS BULLETIN, Vol.32, Mar. pp.230-235, 2007.

[5] A. W. Bett et al “FLATCON/TM and FLASHCON/TM: Concepts for high concentration PV”, 19th European PVSEC, pp. 2488-2491, 2004.
 [6] R. R. King et al., Appl. Phys. Lett. 90, p. 183516, 2007.
 [7] A.W. Bett1, et. al “HIGH-CONCENTRATION PV USING III-V SOLAR CELLS” , Presented at the 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, pp. 7-12, 2006.
 [8] C. Baur et al “Triple-junction III-V based concentrator solar cells: perspectives and challenges”, J. Sol Eng Engineering, pp. accepted for publication, 2006.

저 자 소 개



정병호 (鄭炳湖)

1997년 전남대학교(여수) 기관공학과 졸업. 1999년 조선대학교 전기공학과(석사). 2006년 조선대학교 전기공학과(박사). 2006-2009년 (주)기영미다스 선임연구원. 2009-현재 남부대학교 전임강사.

E-mail : energy@nambu.ac.kr



김남오 (金南伍)

1994년 조선대 공대 전기공학과 졸업. 1996년 조선대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현 조선이공대학 전기과 부교수

E-mail : nokim@chosun-c.ac.kr



이강연 (李康淵)

1997년 조선대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1999년 조선대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현 조선대학교 전기공학과 겸임교수.

E-mail : space122@hanmail.net