

III-V 화합물 반도체를 이용한 고효율 집광형 태양광 발전시스템 설계 및 성능분석

(Designed and Performance Analysis of High Efficiency Concentrated Photovoltaic System using III-V Compound Semiconductor)

고재홍*

(Jae-Hong Ko)

Abstract

For photovoltaic power generation need certainly decreasing module's price and increasing promote efficiency technology. Almost of solar panel is on the decrease energy efficiency since 2,000. like silicone(Si) solar panel, thin film solar panel and etc. Silicone(Si) solar panel was best efficiency in 1999. It's 24%. But after that time, It didn't pass limit of energy efficiency. That's why, nowadays being issued that using III-V compound semiconductor to high efficiency of concentrating photovoltaic system for making an alternative proposal. In Korea, making researches in allied technology with III-V compound semiconductor solar panel, condenser technology, and solar tracker. but feasibility study for concentrating photovoltaic power generation hasn't progressed yet. This thesis made a plan about CPV(Concentrating Photovoltaic)system and CPV has a higher energy efficiency than PV(Photovoltaic)system in fine climate conditions from comparing CPV with using silicone(Si) solar panel to PV's efficiency test result.

Key Words : CPV(Concentrating Photovoltaic), Fresnel Lens, Solar Tracker, Solar Collector

1. 서 론

지난 세기의 기후 변화는 인류가 사용한 화석 에너지에 의해서 급격한 증가를 가져온 온실가스가 주요

원인임을 IPCC 보고서를 통해 구체적으로 근거가 제시된 바 있다[1].

그래서 세계 각국에서는 석유자원의 고갈 우려 및 지구 환경문제의 심각화와 관련하여 선진국 38개국의 온실가스 배출량에 대하여 강제 감축을 규정한 교토 의정서가 2005년 2월에 발효된 가운데 총에너지의 97% 이상을 수입에 의존하고 있는 우리나라의 경우 에너지 소비의 연평균 신장률이 1.1%에 달하며 특히 전체 에너지원의 83%를 화석연료에 의존하므로 선진국에 비해 이산화탄소 배출량이 많기 때문에 기후변

* 주저자 : 한국폴리텍광주대학 전기과 교수
* Main author : Dept. of Electricity, Gwangju
Campus of Korea Polytechnics
Tel : 062-519-7190, Fax : 062-519-7191
E-mail : kojh@kopo.ac.kr
접수일자 : 2012년 5월 24일
1차심사 : 2012년 5월 30일, 2차심사 : 2012년 7월 13일
심사완료 : 2012년 7월 23일

화협약에 의한 온실가스의 배출규제나 국제 환경규제의 강화 등에 따라 수출경쟁력이 점점 약화되고 있는 실정이다. 예로 우리나라의 온실 가스 배출량이 538백만 CO_2 환산 톤으로 세계 9위가 예상되고 있으며, 연평균 배출량 증가율이 4.3%로 2013년 이후 포스트-교토 체제에서 온실가스 감축의무를 부과 받게 될 것으로 예상하고 있다[2].

따라서 정부에서도 환경 및 자원 위기에 대응하는 전략으로서 저탄소 녹색성장을 제창하며 대체 에너지 확보를 위한 신재생 에너지에 많은 연구가 진행되고 있으며 그중에서도 태양에너지를 직접적으로 이용하는 대표적인 방법인 태양광발전 시스템이 가장 빠르게 성장하고 있다. 태양전지의 경우 환경오염에 대한 문제가 없고, 거의 무한한 에너지 공급이 이루어질 수 있어 고유가 시대에 화석에너지의 대체, 온실가스 절감효과, 관련 산업의 성장에 따른 이윤 창출 측면에서 수급안정, 환경보존, 경제 성장의 순환 고리를 이어주는 핵심역할을 할 수 있을 것이라 본다.

태양광발전은 태양으로부터의 빛에너지를 직접 전기에너지로 바꾸어주는 발전방식으로서 태양빛을 받아 반도체 물질로 이루어진 태양전지의 광전효과를 통해 전기를 생성하게 된다. 이러한 광전효과에 의한 전기에너지 생성원리를 이용한 발전방식은 지금까지 단결정 혹은 다결정 실리콘 연료전지에 직접 방사된 대기광 발전에 대부분 의존해왔다. 태양광 발전 활용을 위해서는 대면적 모듈의 저가화와 효율을 높이는 상용화 기술이 반드시 필요하므로 지금 널리 활용되고 있는 실리콘(Si) 태양전지뿐만 아니라 박막 태양전지 등 거의 모든 태양전지가 2000년 이후에는 효율 향상이 둔화된 상태이며 실리콘 태양전지는 1999년 최고효율 24% 달성 후 발전효율이 한계에 이르면서 그 대안으로 유럽 및 기타국외에서 핵심 화두로 떠오르고 있는 것이 바로 집광형 태양광 발전시스템(Concentrate Photovoltaic System)이다.

태양전지는 주로 태양광이 태양전지 면적만큼 조사된 광량으로 발전하였으나 최근 렌즈를 이용하여 태양전지의 면적은 작게 하고 조사되는 광량은 수 백, 수 천 배로 하는 집광형 태양전지가 개발되고 있다[4]. 최근에는 40% 이상의 고효율의 태양전지 개발과 집광

효율의 상승 등으로 성능검증이 요구되어지고 있다.

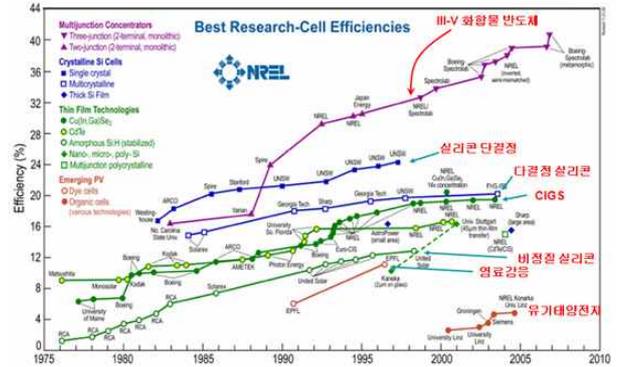


그림 1. 태양전지 최고효율(NREL 2011)
Fig. 1. Best Research-Cell Efficiencies(NREL 2011)

하지만 아직 우리나라에서는 집광형 태양광 발전 시스템 관련 기술인 III-V 화합물반도체 태양전지 제조 기술, 집광 렌즈 기술, 태양광 추적 트래커 등에 대한 연구는 활발히 진행되고 있지만 적용가능성에 대한 연구가 진행되지 못하였기에 본 논문에서는 III-V 화합물 반도체를 구성으로 저가화 및 발전효율의 향상성을 갖춘 집광형 태양광 발전시스템을 구현하여 기존 PV시스템 대비하여 국내에서의 발전효율을 비교 분석하여 적용가능성 여부를 검증하여 보았다.

2. 집광형 태양광 발전 시스템 개요

집광형 태양광 발전 시스템은 기술적/환경적/경제적 측면에서의 여러 한계점을 안고 있는 기존 PV 시스템을 보완 및 대체할 수 있는 새로운 개념의 태양광 발전 시스템으로, 보다 적은 대지 면적에, 보다 적은 비용으로, 보다 많은 에너지를 생산해낼 수 있도록 한다는 것을 목표로, 실리콘이 아닌 인조화합물로 구성된 소형화된 셀에 태양광을 돋보기와 비슷한 형태로 집광시켜 발전함으로써, 원가 및 비용 절감, 효율 증대를 위한 시스템이다.

집광형 시스템은 집광방식에 따라 점시형 점 초점 방식, 반원형 선형 초점 방식, 점형 초점(포인트 포커스), 선형 초점 방식 집광형 시스템이 있으나 이중 효율성, 기술 개발성, 원가절감 효과가 가장 큰 포인트

포커스(Point-Focus)방식의 집광 시스템을 설계 및 구현하였다. 포인트 포커스 방식의 집광형 시스템은 태양전지에 프레넬 렌즈(Fresnel Lens)를 통해서 빛을 수배에서 수백 배로 집광하여 발전 및 열원을 생산하는 것으로 태양광을 추적하는 기능을 탑재하고 있는 것을 그림2에서 보여주고 있다.

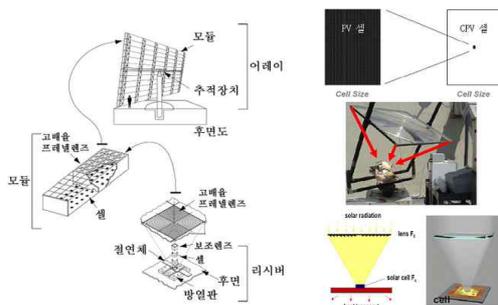


그림 2. 포인트 포커스 집광형 모듈
Fig. 2. Point-Focus CPV module

포인트 포커스(Point-Focus) CPV 모듈을 보면 다음 그림 3의 구조 및 원리를 가지고 있다.

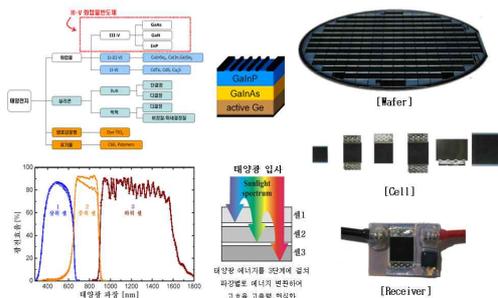


그림 3. 포인트 포커스 CPV 모듈 구조 및 원리
Fig. 3. Modular structure and principle of CPV Point-Focus

태양전지는 III-V 화합물 반도체를 주로 사용하여 만들고 있으며, 태양광의 에너지를 3단계에 걸쳐 파장 별로 변환하여 고효율, 고출력이 가능하다.

3. 집광형 태양광 발전 시스템 구현

집광형 시스템은 크게 집광장치, 리시버, 태양위치 추적장치로 구성되며 본 논문에서 연구된 각각의 내

용은 다음과 같다.

3.1 집광장치(Solar Collector)

집광장치는 태양전지 모듈에 도달하는 태양빛을 증가 시켜주는 역할을 하게 된다. 프레넬 렌즈는 집광시스템 등에 주로 사용되며 빛을 수집 및 집광하는 용도에 사용이 가능하나 왜곡 레벨이 높은 편이어서 렌즈 집광효율을 높이기 위해 수차제거가 필요하다.

비구면 계수 데이터 적용에 따른 비구면 수식은 다음과 같다.

$$z(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + Ar^4 + Br^6 + Cr^8 + Dr^{10} + Er^{12}$$

$$Fr^4 + Hr^{18} + Jr^{20}$$

$$r^2 = x^2 + y^2$$

c : 곡률의 정점

k : 코닉상수

A, B, C, D, E, F, G, H, J : 비구면 계수

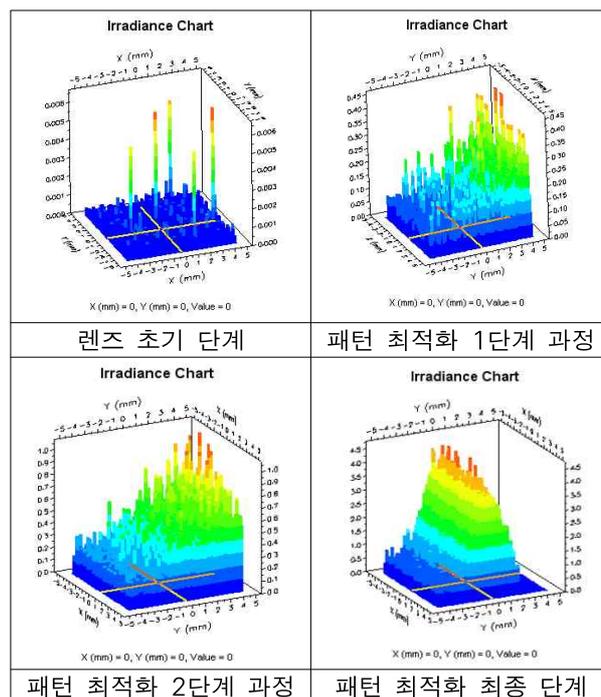


그림 4. 프레넬 렌즈 시뮬레이션
Fig. 4. Fresnel lens Simulation

그림 4는 프레넬 렌즈 곡률 반경, 코닉상수, 비구면 계수 적용 후 최적화과장에 따른 시뮬레이션 결과이다. 프레넬 렌즈 초기 설계부터 패턴 최적화 과정을 지나 최적화된 설계 데이터를 얻을 수 있었다.

3.2 리시버(Receiver)설계 및 구현

전력 발생부 리시버를 구현함에 있어 외관 형태와 내부적 패턴의 선정은 다른 부품의 설계에 영향을 미치는 부분이므로, 외관 디자인은 Metal PCB의 물성, CELL의 사이즈 및 내부 부품배열의 특성 등을 고려해야 한다. 따라서 본 논문에서는 다음의 집광셀을 이용하여 리시버를 구현하였다. 집광 셀의 규격은 다음 표 1과 같다.

표 1. 적용된 집광셀 규격
Table 1. Applied light collection cell standard

적용 셀 타입	CDO100, C2MJ 효율 : 38.5%
셀의 크기	98.9mm ²
다이오드	12A Schottky
허용온도	-40C to 100C
최대온도	180C
온도저항력	<= 0.22C/W(modeled)

구현된 리시버는 3W 5×5 III-V Cell을 사용하여 산화알루미늄(Al₂O₃)로 Sub-mount를 구축하고, 전극부와 열전도부를 분리함으로써 전기적 성능 및 방열 성능을 개선하였다. 또한 직사각형의 형태를 취하여 Assembly 구성시 초점의 중심점을 기준으로 취부 위치의 설정하였다. 그리고 다이오드의 경우 Bypass Diode만을 구성하여 내부 사이즈를 줄이고, 내부에 머무는 열의 정체시간을 줄이고자 하였다.

3.3 태양위치 추적장치(Solar Tracker)

집광형 시스템의 가장 큰 특징은 태양의 위치를 추적하는 트래킹 시스템(tracking system)이 필요하다. 이것은 집광을 위한 광학계가 기본적으로 망원경과 같은 원리이므로, 먼 물체의 아주 작은 부분만을 보게

되어 있다. 따라서 태양을 정확하게 향하지 않고 그 각도가 조금만 틀어지더라도 초점이 어긋나서 태양전지 셀에 집광할 수 없다. 따라서 항상 태양을 향하도록 이축(two-axis) 트래킹 시스템이 요구된다. 태양광 위치 추적 장치는 태양광 센서의 출력 값에 따른 구동 드라이브의 기능을 수행하면서 태양의 위치를 정밀 추적하는 장치로 4분할 추적 센서를 이용하여 다음의 동작 프로세스를 따라 센서 방식으로 구동되어 진다. 표2의 전기적 특성을 가진 장치로서 동작원리는 그림 5와 같다.

표 2. 솔라 트래커의 전기적 특성
Table 2. electrical Characteristics of Solar Tracker

항 목	규 격
사용전원	24V/220V 60Hz
소비전력	Max/Min(300W/10W)
DC MOTOR 소비전력	DC24V 90W
통 신	RS-485
입 력	UART(RS-232), PWM

태양의 위치 추적 장치는 포토다이오드의 조사되는 초점 및 조사 광량에 따라 1μs 단위 출력을 발생시키고, 4분할 포토다이오드 사이의 전압차가 0.3V 이상 나게 되면 출력면의 반대방향으로 모터의 구동신호를 보내게 된다.

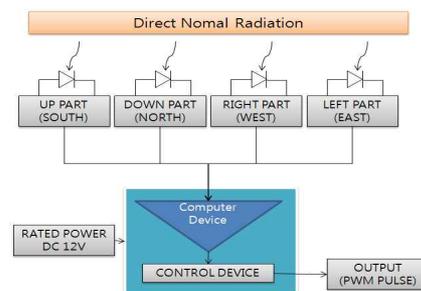


그림 5. 블록 다이어그램(센서 추적)
Fig. 5. Block Diagram(Sensor Tracking)

3.4 센서 추적 오차범위 성능실험

고집광을 위해 산란광을 제외한 직사광만을 사용하

기 때문에 집광도가 커질수록 추적 오차의 범위를 최소화하기 위한 정밀한 추적 트래킹 시스템이 필요하여 진다.



그림 6. 추적센서의 성능 실험
Fig. 6. Performance Test of Solar Tracker Sensor

그림 6은 프레즈넬 렌즈를 통하여 투과한 태양의 초점이 시간에 따라 포토다이오드 센서에 맺히는 것을 보여주고, 그림 7은 태양광 초점은 집광형 발전 시스템에서 필요로 하는 4분할 포토다이오드 좌표평면의 위치 안에서 원점으로 이동하고 있는 특성을 보여 준다.

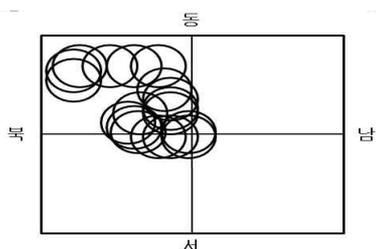


그림 7. 투과된 추적센서의 시간에 따른 초점 이동 특성
Fig. 7. Transmitted tracking characteristics of the sensor to move the focus over time

실험결과로 추적시간 전역에 걸쳐 추적오차 $\pm 0.5^\circ$ 이내 수준으로 나타남에 따라 현재 국내 기술의 오차 범위 $\pm 1^\circ$ 수준에 비교하면 집광형 시스템의 태양 위치 추적이 가능함을 알 수 있다.

4. CPV 시스템의 실험 결과 및 분석

4.1 CPV 시스템 실험 환경

위도 34.95, 경도 127.52 지역에서 3KW시스템의 발

전량의 1개월 동안 누적데이터를 토대로 다음과 같은 분석을 실시였다. 그림 8은 본 논문에서 적용한 시스템 구성도이다.

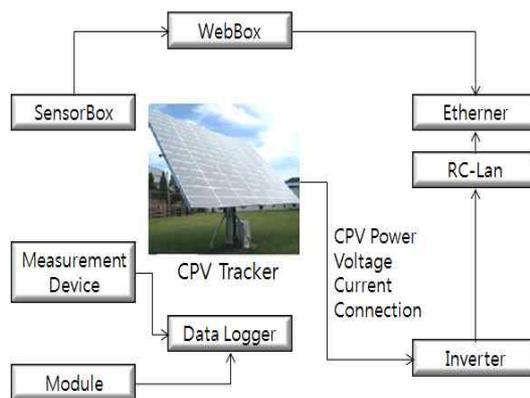


그림 8. 3KW CPV 시스템 계측 시스템 구성
Fig. 8. 3KW CPV System Configuration

4.2 성능 실험 분석 결과

그림 9는 9월 한 달간 계측한 데이터로서 동일시간대에 CPV 및 PV 모듈의 발전량을 비교하여 측정된 결과이다.

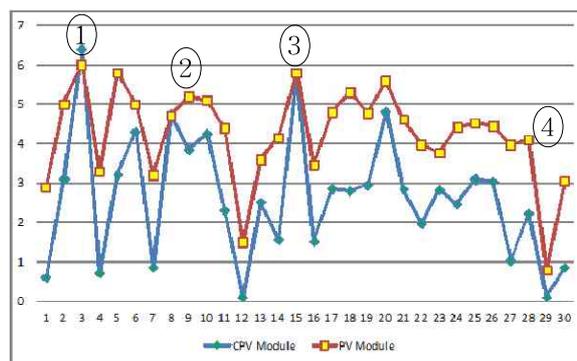


그림 9. CPV/PV 모듈의 9월 발전량 데이터
Fig. 9. September Power data of CPV/PV module

그림 9의 출력양상에서 나타나는 4가지의 유형별 특성은 그림 10, 그림 11, 그림 12, 그림 13과 같다.

그림 10은 그림 9의 표기 ①과 같이 일사량의 IEC 기준값 $850W/m^2$ 이상일 때 CPV > PV의 경우로 나타난 데이터이다. 그림 11은 그림 9의 표기 ②로서 700

~800W/m² 근위일 때 CPV < PV로 나타난 데이터이고, 그림 12는 그림 9의 표기 ③으로서 700W/m² 이하의 경우로 CPV ≃ PV의 특성이, 그림 14는 그림 9의 표기 ④로 직달일사가 없고 구름에 의한 산란광이 지속되는 기후에서는 CPV=0, PV≠0의 출력양상이 나타난 결과이다.

실험 결과 PV 모듈에 비하여 현재 CPV 시스템이 경쟁력을 갖추기 위해서는 다음의 조건들이 충족되어야 함을 확인할 수 있다[5].

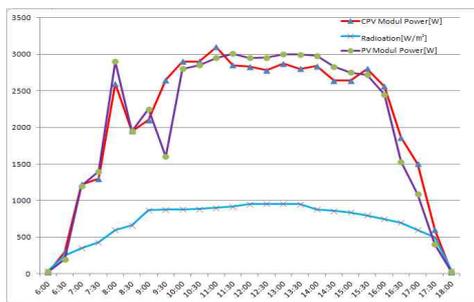


그림 10. 표기 ①의 CPV > PV 경우
Fig. 10. Indication ① CPV > PV type

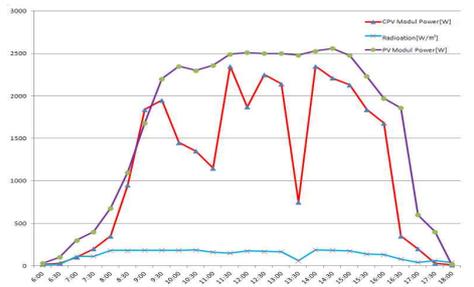


그림 11. 표기 ②의 CPV < PV 경우
Fig. 11. Indication ② CPV < PV type

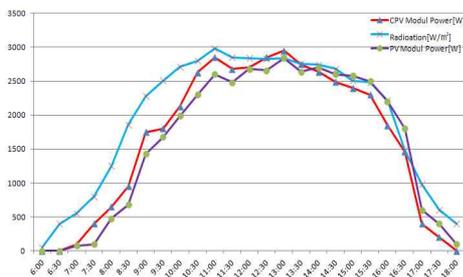


그림 12. 표기 ③의 CPV ≃ PV 경우
Fig. 12. Indication ③ CPV ≃ PV type

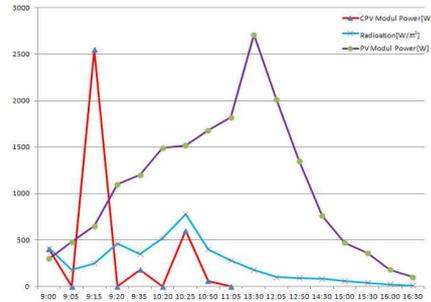


그림 13. 표기 ④의 CPV=0, PV≠0 경우
Fig. 13. Indication ④ CPV=0, PV≠0 type

첫째로, 환경적인 조건은 평균 직달일조량(Direct Normal Irradiance : DNI)은 800W/m²(청명일 때)에서 평균 MPP(Maximum Power Point) 가능한 운영시간은 하루 8시간 이상이어야 하고, 년 평균 150일 이상 청명일 유지해야 한다.

둘째로 기술적인 조건으로서 태양광의 위치 추적 오차 범위가 ±0.1'정도로 정밀해야 하고, 태양광 전지 모듈의 효율이 최소 25% 이상이어야 한다. 태양광 추적 오차 범위 ±0.1'는 시스템을 구성하는 광센 등 장치들의 지속적인 연구로 정밀성을 높일 때 가능하며, 현재 국내 기술의 오차 범위는 ±1'정도 이므로 이 부분에 대한 연구의 필요성도 요구된다.

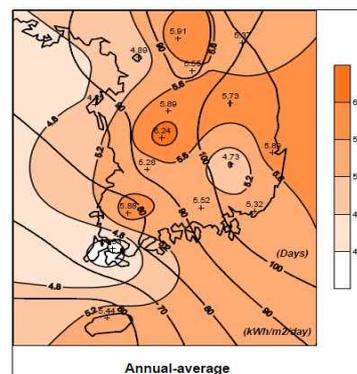


그림 14. 연평균 법선면 직달일사량과 청명일수
Fig. 14. DNI and Clear days Annual-average

기술적인 조건은 향후 지속적인 연구 발전으로 향상 되겠지만, 기후 조건은 집광형 발전시스템의 설치 지역에 따라 발전효율이 유동적일 것이다. 따라서 우리나라의 지역별 직달일사량과 청명일 수 데이터의 중

요성이 강조된다.

우리나라 주요 16개 지역에서 1982년 1월~2004년 12월 사이에 분석된 자료[5]를 살펴보면 그림 14와 같다.

4. 결 론

국내의 현재 태양광 집광 모듈 시스템 기술은 성장 단계로 PV(실리콘 모듈) 제조업체가 핵심 부품에 대한 수입 조립 수준으로 자체 개발에 대한 기술력은 미흡하고, 국내외 시장경기 불안(환율, 유가 등)에 따른 PV모듈의 원가 상승으로 인한 교토의정서 의무사항 이행에 어려움을 겪고 있다. Si 모듈에 비해 가격이 저렴한 III-V 화합물 반도체를 이용한 태양광 집광 시스템의 연구는 원천 기술력 확보와 경쟁력 강화로 시장 창출에 도움이 될 것이라 판단된다.

본 논문에서는 III-V 화합물 반도체를 이용하여 고효율 집광형 태양광 발전시스템을 구현하였으며 실험을 통하여 기존의 실리콘을 이용한 태양광 발전시스템과의 성능을 분석하였다.

실험결과를 통하여 PV시스템은 CPV에 비하여 낮은 효율을 가지고 있으나 직사광선을 필요로 하지 않아 흐린날과 일사량이 많은 지역에 적합하며, 직달일사량과 청명일이 우수한 지역에서는 CPV 발전에 적합한 시스템 요소들이 기술적인 조건을 갖춘다면 실리콘 전지를 적용하는 것 보다 높은 태양광 발전 효율을 얻을 수 있음을 확인하였다.

우리나라에서는 소백산 일대와 경북일대 지역, 전남 지역 일대가 청명일 수가 년 100일 이상이며 법선면 직달일사량이 6,000kwh/m²/day 정도 되기에 CPV 시스템을 구축하는 것이 태양광 발전의 효율을 높일 수 있는 지역으로 판단되어진다.

그러나 태양의 위치를 정밀하게 추적할 수 있는 시스템에 대한 연구 및 태양전지의 효율 향상과 생산발전 단가를 줄이는 부분에 대한 연구가 더 진행이 된다면 III-V 화합물 반도체를 이용한 집광형 시스템 적용으로 화석에너지 고갈에 따른 신재생에너지 발전에 기여될 수 있을 것이 판단된다.

References

- [1] Hana Institute of Finance "Outlook and Competitive Analysis of the Domestic Wind Power Industry" Vol. 17. 2009.
- [2] Kim Ji-Su, Lee Eung-Jik, Lee Chung-Sik "Best Practices Research Use of Solar Energy For Low Carbon Green City" KSES 2009 Spring Annual Conference Vol. 19. No. 1. DAEGU BEXCO.
- [3] Kim Je-Ha "Photovoltaic Technology and Industry" OPTICAL SCIENCE AND TECHNOLOGY January 2012.
- [4] Park won-keuw, Park Kyung-Ho "High Condensing Solar Photovoltaic Technology" OPTICAL SCIENCE AND TECHNOLOGY January 2012.
- [5] Jo Dok-Ki, Kang Young-Heack "A Detailed Survey of Direct Normal Radiation and Clear-day for the Construction of Solar Concentrating System in Korea" The Korean Solar Energy Society Vol. 26. No3. 2006.
- [6] Concentrator photovoltaics for solar power plants, Andreas Gombert Intersolar North America, 07/2008, San Francisco, USA Original Source: METEOTEST, www.meteonorm.com.
- [7] Yizhu Guo, Jianzhong Cha "A System Modeling Method for Optimization of a Single Axis Solar Tracker" 2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM 2010).
- [8] F. Rubio, M. Martínez, J. Perea, D. Sánchez, P. Banda "COMPARISON OF THE DIFFERENT CPV RATING PROCEDURES:REAL MEASUREMENTS IN ISFOC" 978-1-4244-2950-9/09/\$25.00 ©2009 IEEE.
- [9] Dezso Sera, Remus Teodorescu, Jochen Hantschel, Michael Knoll "Optimized Maximum Power Point Tracker for Fast Changing Environmental Conditions" 978-1-4244-1666-0/08/\$25.00 '2008 IEEE.
- [10] B. Stafford1, M. Davis1, J. Chambers1, M. Martínez2, D. Sanchez2 "TRACKER ACCURACY: FIELD EXPERIENCE, ANALYSIS, AND CORRELATION WITH METEOROLOGICAL CONDITIONS" 978-1-4244-2950-9/09/\$25.00 ©2009 IEEE.

◇ 저자소개 ◇



고재홍 (高在洪)

1962년 8월 21일생. 2001년 8월 경상대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2010년 8월 순천대학교 대학원 전자공학과 수료. 1991년 2월~현재 한국폴리텍대학 전기과 교수.

관심분야 : 태양광 발전, 전기시스템 제어