

고집광 태양광 발전을 위한 렌즈 및 광 파이프 특성 시뮬레이션

유광선*, 신구환*, 차원호*, 명로훈*, 김용식**, 정호윤***, 김동균***, 강기환****

*한국과학기술원(ksryu@satrec.kaist.ac.kr),
**(주)비제이파워(swkang@bjpower.co.kr),
***그린광학(cj285@greenopt.com),
****한국에너지기술연구원(ghkang@kier.re.kr)

Simulation of Characteristics of Lens and Light Pipe for High Concentration Solar PV System

Ryu, Kwang-Sun*, Shin, Goo-Hwan*, Cha, Won-Ho*, Myung, Noh-Hoon*,
Kim, Young-Sik**, Chung, Ho-Yoon***, Kim, Dong Kyun***, Kang, Gi-Hwan****

*SaTReC, KAIST(ksryu@satrec.kaist.ac.kr),
**BJ Power(swkang@bjpower.co.kr),
***Green Optics(cj285@greenopt.com)
****Korea Institute of Energy Research(ghkang@kier.re.kr)

Abstract

The artificial increase in the solar intensity incident on solar cells using lenses or mirrors can allow solar cells to generate equivalent power with a lower cost. In application areas of Fresnel lenses as solar concentrators, several variations of design were devised and tested. Some PV systems still use commercially available flat Fresnel lenses as concentrators. In this study, we designed and optimized flat Fresnel lens and the 'light pipe' to develop 500X concentrated solar PV system. We performed rigorous ray tracing simulation of the flat Fresnel lens and light-pipe. The lightpipe can play important roles of redistributing solar energy at the solar cell and increase the mechanical tolerance so that it can increase the lifetime of the high-concentration solar PV system and decrease the cost of manufacturing. To investigate the sensitivity of the solar power generated by the concentrated solar PV according to the performance of lens and light pipe, we performed raytracing and executed a simulation of electrical performance of the solar cell when it is exposed to the non-uniform illumination. We could conclude that we can generate 95 % or more energy compared with the energy that can be generated by perfectly uniform illumination once the total energy is given the same.

Keywords : 집광형태양전지(Concentrated photovoltaic solar cell), 3중 접합태양전지(Triple junction solar cell), 해밍창문함수(Hamming window function), 태양전력조절기(Solar power regulator)

1. 서 론

화석연료 고갈로 인한 대체에너지에 대한 연구의 필요성이 제기되어 다양한 대체 에너지 시스템이 연구 및 개발되고 있다. 그 중 하나가 태양광을 이용한 전력발생 장치를 개발하는 것이다. 과거에는 단순하게 입사되는 태양광을 전기로 바꾸는 형태의 대체 발전시스템이 상용화되었는데, 단위 면적을 고려할 때 발생 전력이 낮다. 따라서, 단위 면적을 고려한 발생 전력을 극대화시키기 위한 기술이 많이 연구되고 있다. [1]

프레넬 렌즈를 사용하여 입사광을 태양전지에 집광하는 기술이 연구되었으며[2, 3], 집광된 태양광이 태양전지에 균일하게 분포되도록 하는 광 파이프 기술이 또한 연구되었다. 본 연구에서는 프레넬 렌즈를 경유한 입사광이 광 파이프를 경유하여 불 균일하게 태양전지의 표면이 분포되었을 경우 대한 전압-전류 특성에 대한 연구를 수행하였다.

1차적으로 프레넬 렌즈를 경유한 입사광은 회절을 이용하여 광 파이프의 입력단에 1차적으로 집광하게 된다. 그리고, 1차로 집광된 입사광은 광 파이프의 입력단에 모이게 되는데, 광 파이프의 물리적 특성, 광학계의 특성, 그리고 제작상의 오차 등을 고려하면 집광된 광의 분포가 고르게 태양전지의 표면에 입사되지 않는 것을 알 수 있다.

태양전지의 전압-전류는 우주환경 또는 대기환경에 따라 이의 동 특성이 많은 변수를 갖고 있는 것을 알 수 있으나[4], 본 연구에서는 이와 같은 많은 변수는 일정하며 영향이 없다는 가정 하에 연구를 수행하였다.

입사광의 분포는 라이트파이프의 길이에 따라 분석을 수행하였다. 광 파이프를 통하여 입사된 광량의 분포에 따른 태양전지의 전압-전류 특성에 대하여 고찰하였으며 이의 결과를 제시하고자 한다.

2. 태양 입사광의 복사분포

2.1 집광형 렌즈를 통한 복사조도

고효율의 전력을 생성하기 위하여 입사되는 태양광은 프레넬 렌즈를 통하여 1차적으로 집광이된다. 집광된 태양광은 태양전지 표면에 균등하게 조사되도록 광 파이프를 사용하게된다. 이때, 집광된 태양광의 복사량은 광 파이프의 광특성 및 기타 특성에 의하여 균일하게 분포되지 않고 비균일하게 조사될 수 밖에 없다. 아래 그림 1은 프레넬 렌즈와 광 파이프를 통한 입사광의 복사조도 원리를 나타내고 있다. 프레넬 렌즈의 디자인과 제작 성능에 대한 결과는 발표를 한 바 있으므로 여기서는 생략하도록 하겠다. [5]

그림 1에 나타난 바와 같이 프레넬 렌즈는 태양의 직사광을 좁은 영역(지름 5 mm 미만)으로 모아주는 역할을 한다. 그러나, 프레넬 렌즈만을 사용하는 경우 태양전지의 일부에만 강하게 조명되는 점 때문에 여러 가지 부작용일 발생할 수 있다. 첫째로, 빛이 아주 좁은 영역에 집중되는 경우 태양전지의 일부분에 강한 열이 발생하여 전기적인 파손이 일어날 수 있으며, 같은 기판위에 형성된 태양전지에서 나머지 부분이 내부저항의 역할을 하여 생성 전력이 감소하는 효과가 발생한다. 프레넬 렌즈만으로 이를 해소하기는 어렵고, 태양전지를 프레넬 렌즈의 초점에서 벗어나도록 인위적으로 조정을 할 수 있으나 이때에는 태양전지에서 벗어난 영역에 빛이 형성되어 에너지 변환 효율이 급격하게 감소될 수 있다.

이러한 단점을 해결하기 위해 여러 가지 형태의 이차광학계(secondary optics)를 생각할 수 있는데, 본 연구에서는 사각기둥 형태의 light pipe를 고려하였다. Light pipe를 통과하면서 빛이 굴절과 옆면에서의 전반사등의 과정을 거쳐 처음 입사하는 빛의 분포가 비교적 고른 분포를 갖게 되어 태양전지의 수명을 늘리고, 광변환 효율을 향상시킬 수

있게 된다. 또한, 고집광 태양광 발전 시스템에서는 필수적으로 정밀 태양 추적기가 필요한데, 요구되는 구조적 정밀도를 완화할 수 있는 부가적인 효과도 거둘 수 있다. 본 연구에서는 가시광과 적외선 영역에서 비교적 높은 투과도와 저렴한 가격 등의 특성을 지닌 BK7을 light pipe로 사용한다는 가정을 하였다.

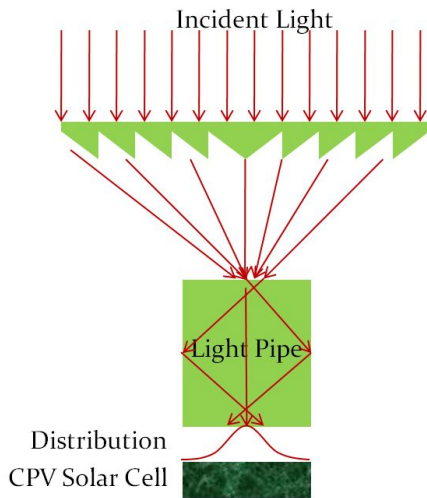


그림 1. 프레넬 렌즈와 광 파이프의 집광원리

2.2 입사된 태양광의 복사조도

앞 장의 그림과 같이 광 파이프를 통한 태양광은 작게는 100 배, 크게는 500에서 1000 배 정도의 배율로 에너지를 집광하게 된다. 이때, 최종적으로 집광된 태양에너지는 태양전지의 표면에 균일하게 분포되어야 집광형 태양전지로부터 안정적인 최대 전력을 얻을 수 있다. 그런, 현실적으로는 광학계의 특성과, 구조적인 특성, 제작에 따른 불균일성 등으로 태양전지의 표면에는 그림 2와 같은 형태로 태양광이 분포된다. 태양전지 표면에서의 광분포는 프레넬 렌즈의 광학적 특성과 light pipe의 물성과 구조(geometry)에 의해 결정된다. 본 연구에 사용된 프레넬 렌즈는 초점거리가 275 mm로 조정하였으며, 광 파이프의 경우 40 mm의 길이를 가정하였다.

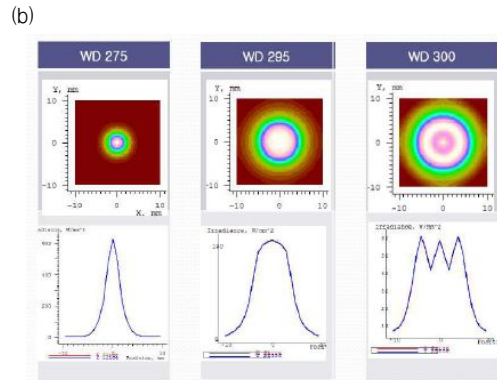
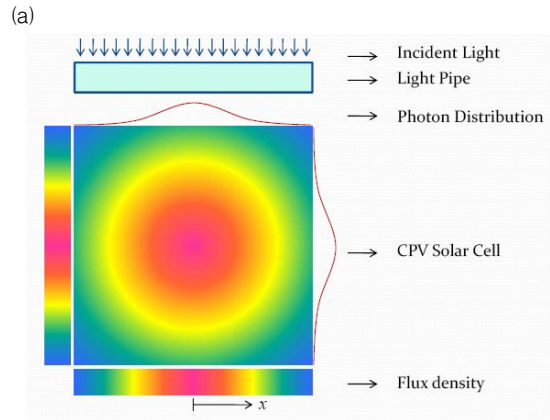


그림 2. (a) 광 파이프를 통과한 입사광의 분포와 (b) 프레넬 렌즈와 광 파이프 거리에 따른 태양전지 상에서의 복사 분포

일반적으로 광 파이프를 경유한 태양 입사광은 그림 2(a)와 같이 분포되나, 본 연구를 위하여 세부적인 광 분포의 경우를 그림 2(b)와 같이 프레넬 렌즈와 광 파이프 사이의 거리(WD: working distance)에 따라 분리하여 모사하였다.

3. 시뮬레이션 결과

3.1 입사광이 첨두 형태로 분포된 경우

그림 2(b)의 첫 번째 경우와 같이 광 파이프를 경유한 태양광이 첨두(peak) 형태로 분포되었을 경우에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과가 그림 3에 나타나 있다. 시뮬

레이션은 태양전지의 구조를 미소한 단위 면적으로 나누어 등가회로 원리를 적용하는 방법을 이용하였다. [6] 이때의 프레넬 렌즈와 광 파이프 사이의 거리는 275 mm이다. 그림 3, 4, 5 에는 각각의 경우에 대한 시뮬레이션 결과가 나타나 있으며, 공통적으로 x 축은 태양전지의 중심에서의 거리를 나타내며, y 축과 z 축은 태양전지의 개방전압과 단락전류를 나타낸다. 입사광의 중심점에서는 최대의 입사광량이 집중되며, 중심점에서 거리에 따라 급격히 입사광량이 감소하는 형태의 결과로서 태양전지의 중심점에서는 최대의 전력이 생성된다. 그림상의 편의를 위하여 그림 3의 z 축은 반전되어 나타내었다. 중심점에서 멀어질수록 생성전력이 급격히 감소되는 것을 알 수 있으며 최외각 지점에서는 입사광량이 없어 오히려 다이오드 역할을 하는 것을 알 수 있다. 이는 전력생성에 도움이 되지 않은 부작용이 발생됨을 알 수 있다.

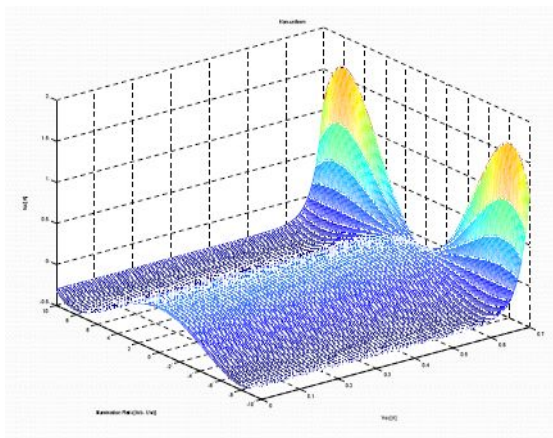


그림 3. 침투 형태의 입사광 분포와 전압-전류 특성 (WD=275 mm)

3.2 입사광이 중절모 형태로 분포된 경우

그림 2(b)과 같은 두번째 경우에는 광 파이프를 경유한 태양광이 중절모 형태로 분포되었을 경우를 가정한 경우이다. 이때의 프레넬 렌즈와 광 파이프 사이의 거리는 295 mm이다. 그 결과가 그림 4에 나타나 있다.

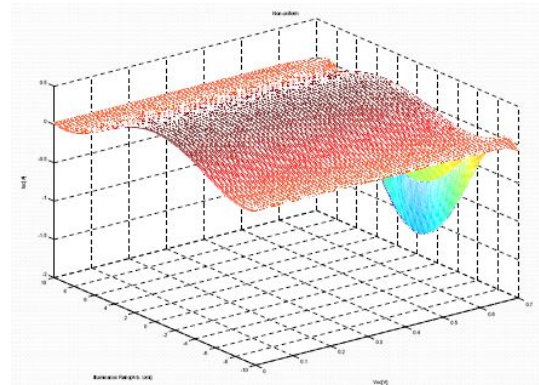


그림 4. 중절모 형태의 입사광 분포와 전압-전류 특성 (WD=295 mm)

입사광량의 분포가 태양전지의 중심점에서 일정거리 구간에서는 균일하게 분포되며, 태양전지의 모서리 부분에서는 입사광량이 감소하는 형태의 입사광 분포에 대한 전압과 전류의 특성을 나타낸다. 침투 형태의 시뮬레이션과는 다른 형태의 전기적 특성을 나타내는 것을 알 수 있다. 즉, 태양전지의 최외각 지점에서도 다이오드의 효과가 거의 사라져 태양전지의 전력생성에 부작용이 많이 감소한 것을 알 수 있으며, 전반적으로 국소 최대전력점이 감소한 것을 알 수 있다.

3.3 입사광이 톱니파 형태로 분포된 경우

그림 2(b)의 마지막 세번째 경우에는 광 파이프를 경유한 태양광이 톱니파 형태로 물결치듯 입사된 형태의 광 파이프에 대한 태양전지의 전기적 특성에 대한 시뮬레이션을 나타낸다. 그 결과가 그림 5에 나타나 있으며, 이때의 프레넬 렌즈와 광 파이프 사이의 거리는 300 mm이다.

앞서 분석한 결과와는 다른 형태의 전압-전류 특성을 나타내는 것을 알 수 있다. 입사광량이 중심점에 치우치는 것이 아닌 균일하게 분포되어 국소 최대전력점이 사라졌으며 최대전력점이 오차 범위 내에 위치하는 것을 알 수 있다. 이는, 최대점을 찾는 알고리즘이

반영되었을 때 단시간에 추적되어 최대전력이 생성됨을 의미하며 태양전지에서 발생하는 전력감소가 최소가 됨을 의미한다.

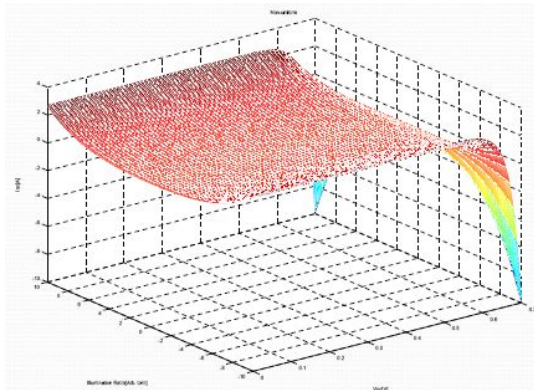


그림 5. 톱니파 형태의 입사광 분포와 전압-전류 특성 (WD=300 mm)

5. 결 론

프레넬 렌즈와 광 파이프를 경유한 입사광량은 이론적으로는 균일하게 분포되어야 한다. 그러나, 광학계의 물리적 특성, 제작상의 오차 등으로 인하여 태양전지의 표면에 균일하게 분포되지 않고 한쪽에 치우치는 형태로 분포된다. 프레넬 렌즈와 광파이프 사이의 거리에 따라 태양전지 상에 형성되는 광분포가 달라짐을 확인하였으며 이에 따라 광분포 형태를 침두형, 중절모형, 톱니파형 분포로 분류하여 이에 따른 태양전지의 전력 형성을 발생전력과 등가회로 분석기법을 이용하여 시뮬레이션하였다. 전반적으로 침두형의 경우는 발생되는 출력이 50%이하로 감소되는 형태의 그래프를 보였으며, 중절모자 형태로 분포되는 입사광의 경우에는 약 70%의 전력이 발생되는 것을 알 수 있었다. 그리고, 톱니파 형태의 경우에는 입사광이 밀집되어 있으므로 그림자효과 및 다이오드 효과 등이 사라져 전반적으로 균일하게 분포되는 형태이므로 최소 95%이상의 전력이 발생되는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 신재생에너지기술개발사업 ‘초고효율 III-V족 태양전지 고집광 모듈 패키징 기술개발업의 지원으로 수행되었습니다. (과제번호 : 2009T100100013)

참 고 문 헌

1. Whitfield et al., 1999. The development and testing of small concentrating PV systems. *Solar Energy* 67, 23~34
2. Lorenzo, E., Luque, E., 1981. Fresnel lens analysis for solar energy applications. *Appl. Opt.* 20(17), 2941~2945
3. Ryu et al., 2006, Concept and design of modular Fresnel lenses for concentration solar PV system. *Solar Energy*, 80, 1580~1587
4. Goo-Hwan Shin et al, Radiation Effect Test for Single-Crystalline and Polycrystalline Silicon Solar Cells, JKPS, 2008.
5. 유광선, 차원호, 신구환, 조희근, 김용식, 강성원, 강기환, 2011, 고집광 태양광 발전을 위한 광학시스템 개발, 한국태양에너지학회지 4월호 게재 예정
6. 신구환, 유광선, 차원호, 명로훈, 김용식, 강기환, 2011, 고집광 태양전지의 비균등 조사에 의한 출력특성, 한국태양에너지학회, 춘계학술대회