

2차 광학계가 필요없는 프레넬 렌즈를 이용한 중집광 광학계 시뮬레이션

강성원*, 김용식**, 심창호***

*(주)비제이 파워 (swkang@bjpower.co.kr), **(주)비제이 파워 (yosikim@bjpower.co.kr),
***(주)비제이 파워(chsim@bjpower.co.kr)

Fresnel lens optics simulation with middle sized linear concentration without secondary optics

Kang, Sung-Won*, Kim, Yong-Sik**, Sim, Chang-Ho***

*R&BD Center, BJ Power Co.,Ltd(swkang@bjpower.co.k),
**Business Center, BJ Power Co., Ltd(yosikim@bjpower.co.kr),
***Production Center, BJ Power Co.,Ltd(chsim@bjpower.co.kr)

Abstract

HCPV(High Concentrated PV) systems have well known for CPV market all over the world. Low concentration type silicon based modules have been introduced in the market. But low cost of standard flat silicon modules made them useless nowadays. High cost of compound semiconductor solar cell reduced cost effective cpv module production than that of recently silicon solar cell. In order to overcome increasing cost of CPV module, we study middle concentration type fresnel lens simulation using concentrated type silicon based solar cell. Linear type fresnel lens made production of CPV module without secondary optics such as light pipe or light tunnel. This type of fresnel lens design makes more cost effective solution for cpv niche market.

Keywords : 고집광 태양광 (High concentrated PV), 프레넬 렌즈(Fresnel lens)

1. 서 론

집광용 태양광 집속기(photovoltaic concentrator)는 빛에너지를 이용하여 전기를 생산하는데 가격을 낮출 수 있는 높은 잠재적 가치를 갖는다. 여러 분야의 연구에서 높은 직달일사량

을 갖는 나라에서 평판형 모듈 플랜트(plant)의 에너지 생산 가격보다 저렴하게 전기를 생산할 수 있는 가능성이 더 높다는 결과가 얻어지고 있다[1]. 이런 가격 감소는 빛을 집속하는 저렴한 광학 요소를 이용하여 매우 효율이 높고 꽤 비싼 태양전지를 작은 면적으로 집광시켜 얻어질 수 있다. 반면 집광 시

시스템의 태양전지의 가격은 증가하는 집광배율에 따라 감소할 수 있지만 광학계와 트래킹 시스템의 가격은 증가한다. 트래킹 시스템은 광학요소를 사용하여 직달 일사량을 모으기 위해 필요하다. 집광 시스템은 단축 트래킹 시스템 대신에 더 높은 집광 배율을 얻기 위하여 양축 트래킹 시스템을 사용하게 되면 더 높은 가격 상승의 요인이 된다. 또한 상당히 높은 정밀도와 재료의 강도가 일반 양축 트래킹 시스템에 비해 제약이 커져 가격 상승의 결정적인 요인이 된다. 또한 국내의 실정상 다중 접합 화합물 반도체인 GaAs 계열의 태양전지의 가격은 현재 실리콘 태양전지의 가격 하락과 달리 큰 변화가 없어 고집광 태양광 시스템의 가격을 낮추는 데는 아직까지 요원한 상황이다. 이에 주목해 중집광에 적합한 실리콘 집광용 태양전지를 목표로 중집광 수준에서 적합한 프레넬 렌즈 기반으로 한 태양전지 면적에 2차 광학계 없이 면집광할수 있도록 하여 기존의 동심원 방향의 점 집광을 통해 2차 광학계가 반드시 필요한 고집광 태양광 시스템보다 저렴한 광학계의 모델링을 통해 그 가능성을 확인해 보았다. 현재 실리콘 태양전지의 가격이 전반적으로 급격하게 떨어지고 있고 기타 다른 태양전지의 가격이 이에 경쟁하기에는 어려운 실정이다. 이를 감안하여 실리콘을 재료로 이용하여 저렴한 수준의 집광용 태양전지의 제작이 가능하면 집광배율은 태양전지 가격과 광학계의 가격을 고려하여 경제성이 있는 솔루션이 이루어진다.

집광용 태양전지에 개념은 지난 25년간 다음과 같은 목표를 갖고 개발 되었다. 앞면 전극에서 그림자 손실을 최소화시키고 그리드 구조에서 저항손실을 낮추고 그리드 라인 사이에 있는 산란 층(diffused layer)에서 측면 전류로 인한 저항 손실을 작게 하며, 베이스 층에서 측면 전류를 낮춘다. 또한 접촉부위(contact) 바로 아래에서 재결합 전류를 낮

추고 낮은 접촉 저항을 만든다. 입사광을 최대한으로 사용하기 위해 광 트랩을 이용한다. 저가의 저집광 시스템을 위해 V-groov 형태의 태양전지는 5X에서 40X의 집광을 위해 만들어 졌다. 또 다른 접근 방식으로 수직 접합 태양전지(vertical junction solar cell)는 40X의 집광 배율까지 이용할수 있도록 설계되었고 BP의 새턴 셀(saturn cell)은 이 개념에 기초하여 EUCLIDES plant에 적용되었다. 1982년부터 샌디아 연구소(Sandia National Laboratory)에서 고 집광 수준에 최적화 시킬수 있는 태양전지 디자인으로 p⁺⁺-n-n⁺⁺ 형태의 태양전지가 만들어졌고 효율은 40X에서 200X수준까지 도달하며 약 20%의 효율을 갖게 되었다[2].

스탠포드 대학에서 개발한 후면 접합 점 접촉 실리콘 태양전지(Back Junction point-contact silicon solar cell)은 후면에 contact을 가지고 있다[3]. contact 밑에만 작은 국부 산란 점이 사용된다. 이것은 높은 전압과 낮은 접촉 저항을 갖는다. 이 태양전지의 디자인은 200X 이상의 기하학적 집광배율을 갖는 시스템에 적용된다. 실리콘 계열의 고효율 태양전지는 지금까지 연구소수준에서 소규모 제작되었으며 최근 개발하고 있는 고효율 태양전지 제작기술에 접목한다면 경제성 있는 솔루션이 되리라 예상된다.

2. 중집광형 프레넬 렌즈 설계

중집광형 실리콘 태양전지를 중심으로 면 집광이 가능한 선형패턴의 집광기를 설계하였다. 25X와 49X의 집광이 가능하도록 태양전지 면적에 25배와 49배가 되도록 설계하였고 태양전지의 사이즈는 1cm²를 기준으로 하였다. 트래킹의 오차와 광학적 제작오차를 고려하여 1mm의 허용폭을 주었으며 정밀 트래킹으로 인한 비용 상승을 완화시키려고 하였다. 선형 집광방식을 이용한 면집광 배율은 배율이 높아질수록 복잡한 광학 공정이

들어가며 초점거리의 증가로 인해 적절한 trade off가 요구된다. 여기서는 광 효율 80% 이상이 되도록 설계되었으며 25배와 49배에서 각각 6cm와 8.4cm의 초점거리를 갖도록 설계하였다. 다음과 같은 프레넬 렌즈의 공식을 이용하여 프레넬 렌즈의 효율을 계산하였다[4-5].

$$R_s = \left(\frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \right)^2 \quad (1)$$

$$= \left[\frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \right)^2}}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \right)^2}} \right]^2$$

$$R_p = \left(\frac{n_1 \cos \theta_t - n_2 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_t + n_2 \cos \theta_i} \right)^2 \quad (2)$$

$$= \left[\frac{n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \right)^2} - n_2 \cos \theta_i}{n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \right)^2} + n_2 \cos \theta_i} \right]^2$$

$$T_s = 1 - R_s, \quad T_p = 1 - R_p \quad (3)$$

광이 편광되지 않은 상황이라면 $R = \frac{R_s + R_p}{2}$ 로 계산된다. 따라서 투과율은 $T = 1 - R$ 로 계산되어 진다. 여기서 n_1 은 프레넬 렌즈의 재료인 PMMA의 굴절율, n_2 는 공기의 굴절율이다. θ_i 는 프리즘의 facet angle로 태양전지로 들어가도록 설계되어 있다.

25배의 집광형 렌즈는 총 6개 타입의 렌즈 형상을 제작해야 한다. 각 렌즈는 4개의 같은 형상으로 태양전지에 균일하게 집속하도록 설계 되어 있다. 또한 가운데 부분은 태양전지에 직접 빛이 들어오기 때문에 형상 설계는 고려되지 않았다. 이런 방식을 통해 계속 집광 배율을 늘릴수는 있지만 서로 다른 렌즈 형상 개수는 증가하게 된다.그림 1은 25X 집광했을때 위에서 본 형상이다.

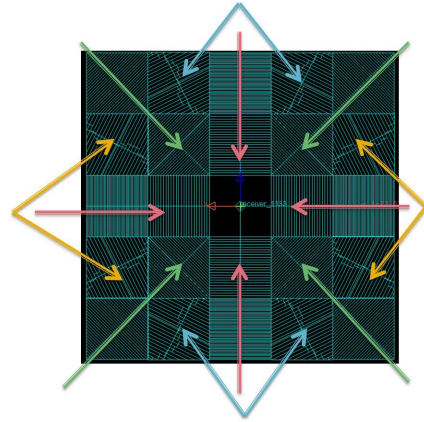


그림 1. 25X집광형 프레넬 렌즈의 설계 형상

그림 2는 집광배율을 높여 49배로 집광한 위에서 바라 본 형상이다. 총 12개의 프레넬 렌즈 설계 디자인이 들어가며 이런 선형 배열의 면집광은 가로, 세로가 7*7로 49배로 각 프레넬 렌즈의 설계 디자인은 위, 아래, 좌, 우 대칭으로 4개씩 같은 형상을 갖는다.

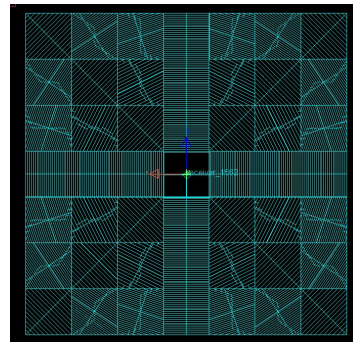


그림 2. 49X 집광형 프레넬 렌즈의 설계 형상

동심원 방향의 점 집광 프레넬 렌즈는 면집광이 아니기 때문에 태양전지의 효율을 향상시키고 태양전지 내구성을 위해 hot spot 현상을 방지하기 위해서는 2차 광학계가 반드시 요구되지만 위와 같은 선형 집광방식을 통한 면집광은 2차 광학계없이 태양전지에 균일하게 빛을 입사시킬수 있어 모듈 제작비용을 현저하게 줄일수 있는 강력한 장점이 있다.

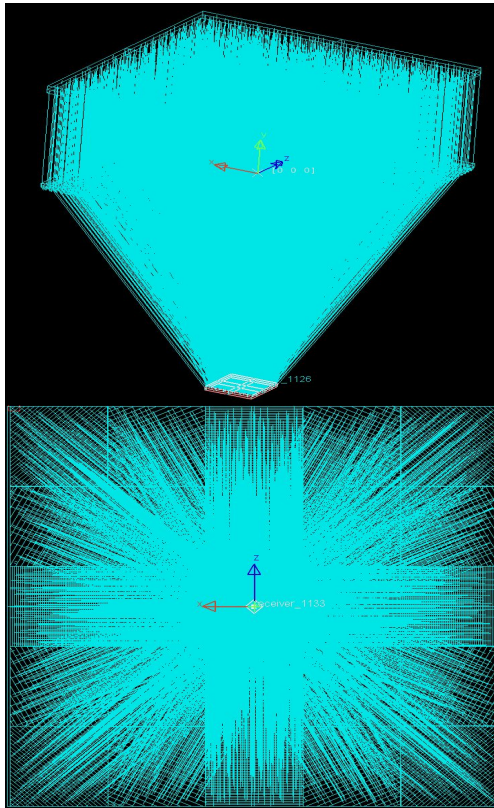


그림 3. 태양광이 25X 프레넬 렌즈에 normal하게 입사되어 초점거리 6cm에 있는 태양전지에 입사될때 빔 경로를 나타낸 모습. (a) 빔 경로를 옆면에서 봤을때 (b) 빔 경로를 위면에서 봤을 때

그림 3은 25배 집광 배율을 갖는 프레넬 렌즈의 빔 경로 모의 시험을 통한 빔이 태양전지에 입사되는 모형을 나타낸 것이다.

3. 중집광형 프레넬 렌즈 광 효율 및 추적오차에 따른 빔 분포 및 광효율 시뮬레이션

선형 집광을 이용한 면집광은 아래 도표를 통해 다음과 같은 광 효율이 예측된다.

태양전지 사이즈를 10mm × 10mm 기준으로 PMMA를 렌즈 사양으로 결정했을때 렌즈 투과율은

표 1. 25X 집광 배율의 렌즈 spec 및 각 렌즈의 facet angle 과 광 반사율 및 광 투과율

단위			
렌즈 가로/세로 사이즈 (mm)	12	렌즈 투과율 (%)	92.4
초점거리(mm)	60	반사율 (%)	투과율 (%)
렌즈 굴절율	1.49		
정방향1 (°)	21.056	4.1	95.9
정방향2 (°)	33.481	6.9	93.1
대각선 1 (°)	27.281	4.7	95.3
대각선 2 (°)	38.472	14.6	85.4
side 방향 1 (°)	36.619	10.3	89.7
side 방향 2 (°)	36.619	10.3	89.7

$$t_{lens} = (1-R)^2 = \left(1 - \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2\right)^2 = 0.924 \quad (4)$$

로 계산되어진다.

각 렌즈의 투과율은 각 렌즈의 태양전지로의 굴절각을 통해 렌즈의 facet angle이 구해지면 프레넬 렌즈 공식 (1)~(3)을 이용하여 반사율과 투과율이 결정된다. 따라서 프레넬 렌즈의 총 투과율은 렌즈 자체의 투과율과 각 렌즈의 facet angle을 걸쳐 태양전지로 입사하는 투과율의 합을 곱한 값으로 정의된다.

$$T_{tot} = t_{lens} \times (1 + 4(t_{정방향1} + t_{정방향2} + t_{대각선1} + t_{대각선2} + t_{사이드각1} + t_{사이드각2}))/25 \quad (5)$$

위식(5)를 통해 총투과율은 84.9%로 나타난다.

49배 집광 배율의 경우, 표2에서 렌즈 spec 및 각렌즈의 facet angle과 광 반사율및 광투과율에 대해 나타냈다.

49X 배율의 프레넬 렌즈의 투과율은 설정한 초점거리에 대해 각 렌즈의 태양전지로

표 2. 49X집광 배율의 렌즈 스펙 및 각 렌즈의 facet angle과 광반사율 및 광투과율

단위			
렌즈 가로/세로 사이즈(mm)	12	렌즈 투과 율(%)	92.4
초점거리(mm)	70		
렌즈 굴절율	1.49	반사율(%)	투과율(%)
정방향1	18.52	4	96
정방향2	30.80	5.6	94.4
정방향3	37.28	11.5	88.5
대각선1	24.45	4.3	95.7
대각선2	36.47	10	90
대각선3	40.81	29.3	70.7
사이드각1	32.76	6.5	93.5
사이드각2	37.96	13.1	86.9
사이드각3	39.43	18.5	81.5
사이드각4	32.76	6.5	93.5
사이드각5	37.96	13.1	86.9
사이드각6	39.43	18.5	81.5

의 굴절각을 통해 렌즈의 facet angle이 구해지며 프레넬 렌즈 공식 (1)~(3)을 이용하여 반사율과 투과율이 결정된다. 앞에서와 마찬가지로 프레넬 렌즈의 총 투과율은 렌즈 자체의 투과율과 각 렌즈의 facet angle을 걸쳐 태양전지로 입사하는 투과율의 합을 곱한 값으로 정의되며 식 (6)으로 계산된다.

$$T_{tot} = t_{lens} \times (1 + 4(t_{정방향1} + t_{정방향2} + t_{정방향3} + t_{대각선1} + t_{대각선2} + t_{대각선3} + t_{사이드각1} + t_{사이드각2} + t_{사이드각3} + t_{사이드각4} + t_{사이드각5} + t_{사이드각6}))/49 \quad (6)$$

이식을 통해 구한 전체 투과율은 81.7%로 25X 집광 렌즈보다 광 효율이 낮다. 이 부분을 해소하기 위해서는 초점거리를 더 길게 하여 전체 투과율을 증가시킬수 있지만 모듈의 높이 증가는 광학적 tolerance 및 제품 단

가를 증가시킬수 있기 때문에 이부분에 대해서는 렌즈 설계시 효율 및 단가에 대한 trade off를 통해 조정할수 있다.

그림 4는 빔 모의 입사를 통해 x-y축은 태양전지에 들어오는 빔의 분포를 z축은 빔의 세기를 나타내는 그림과 2차원에서 본 입사된 빛의 빔 분포에 대한 모의 실험한 결과를 나타낸다.

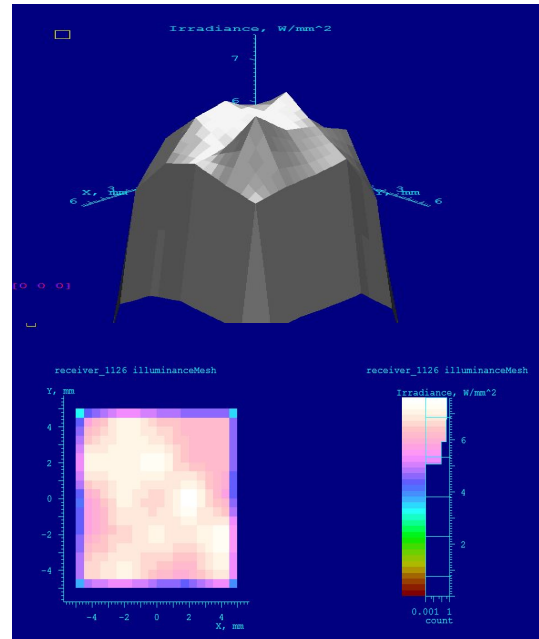


그림 4. 25X 집광배율을 이용한 프레넬렌즈를 사용시 렌즈시 수직입사되었을때 빔분포 (a) 태양전지 사이즈에 들어오는 빔 세기를 나타낸 빔 분포 (b)2차원면에서 태양전지를 채우는 빔 분포

위 빔 분포는 정확히 태양의 위치를 따라갈 때 구한 것이다. 추적오차로 인해 (방위각, 고도각)방향에 대해 각각 (-0.5,0), (-1,0), (2,0), (2,2)의 위치 추적 오차가 생겼을 때 빔 분포를 나타낸 그림은 그림 5에 나타나 있다. 이 빔 분포를 통해 손실되는 광손실량은 각각 추적오차가 없을때 대비, 3%, 10%,17%,30%로 나타난다.

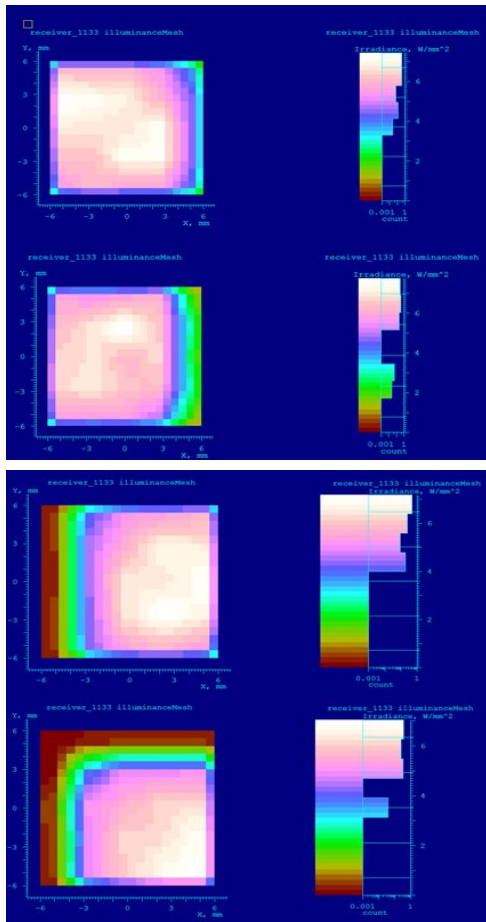


그림 5. 각각 방위각, 고도각 방향에 대해 추적오차가 (a)(-0.5,0)(b)(-1,0)(c)(2,0)(d)(2,2)인 빔 분포. 정상적으로 추적오차없이 들어온 광 투과율에 비해 각각 3%,10%,17%,30%의 손실이 발생한다.

위 그림을 통해 방위각, 고도각 방향의 추적오차가 각각 최대 2도가 허용된다고 하더라도 추적오차가 없을때의 광량중 70%는 흡수할수 있으므로 기존의 동심원 형태의 고집광용 프레넬 렌즈를 통해 손실되는 광 흡수량에 비해 많은 광량을 사용할수 있고 이로 인해 태양전지의 광효율은 추적오차로 인해 생기는 심각한 손실을 줄일수 있는 장점이 있다.

그림 6은 49X 집광 배율을 갖는 프레넬

렌즈의 12개의 facet angle이 초점거리를 증가함에 따라 facet angle이 감소하는 그림이다. 초점거리 증가에 따라 facet angle의 감소가 전반적으로 균일한 분포로 감소하는 것을 알수 있다. 이것은 facet angle의 감소로 실제 입사된 빛의 광 투과율의 증가를 일으키는데 초점거리 증가로 수직으로 입사된 빛이 감소된 facet angle에 덜 꺾이게 되고 이것은 광손실을 감소시키는 역할을 한다. 49X 집광에서 총 12개의 프레넬 렌즈의 facet angle은 초점거리가 증가함에 따라 감소하는 형상을 통해 초점거리 증가는 입사된 광의 굴절을 적게 하여 광효율 증가를 유도하는 것을 알 수 있다.

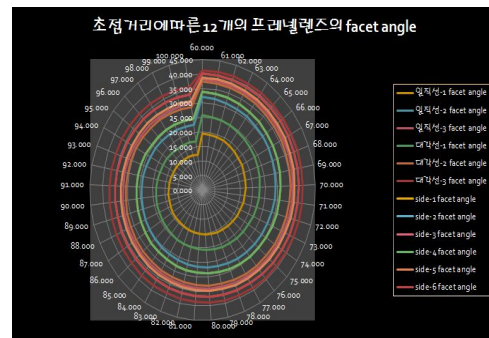


그림 6. 49X 집광 배율을 갖는 프레넬 렌즈에서 초점거리에 따른 프레넬 렌즈의 facet angle.

그림 7은 49X 집광배율의 렌즈에서 초점거리에 따른 광효율을 나타낸다.

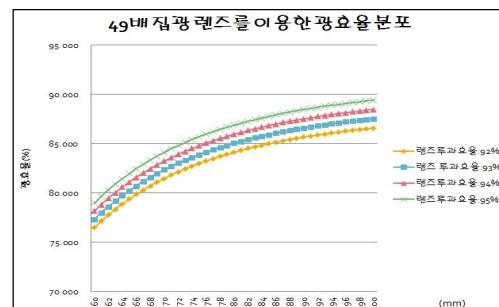


그림 7. 49X 집광 배율을 갖는 프레넬 렌즈에서 초점거리에 따른 프레넬 렌즈의 facet angle.

초기 입사된 빛의 렌즈자체 투과효율은 식 (4)에서 계산되지만 렌즈 두께에 따라 렌즈 자체의 흡수에 의한 손실을 고려해서 임의적으로 92%에서 95%일때 초점거리에 따른 광효율을 나타낸 그림이다. 초점거리와 광효율의 trade off를 통해 70mm 근처가 안정적인 경제적 접근치가 가능할 것이다. 이 부분에서는 모듈 제작시 단가및 효율을 제고해 검증이 필요한 사안이다.

4. 결론 및 향후 계획

실제로 고집광용 프레넬 렌즈를 이용시 2차렌즈의 제작을 통한 광 균일성 확보는 매우 중요한 태양전지 효율을 결정하는데 추적 오차가 커질수록 광 균일성 확보는 매우 어려워지고 2차 렌즈의 높이도 길어져 전체적으로 모듈 높이를 증가시켜서 모듈 제작비용을 증가시키게 된다. 또한 2차 광학계가 알루미늄 재질의 반사형 tunnel 이던 BK glass type의 light pipe이던 태양전지위에 고정시키는 비용과 정렬문제도 실제적으로 광손실로 인해 많은 영향을 준다. 중저집광형 타입의 선형 프레넬 렌즈 제작을 통해 2차 광학계 없이 균일한 광량을 태양전지에 공급해 주는 방식은 태양전지의 효율 증가, 정밀 추적에 대한 부담을 줄여주어 전체 시스템의 가격 상승을 감소시킨다. 또한 2차 광학계의 설치가 필요없어 모듈 제작 단가를 획기적으로 낮출수 있으며 III-V 족 고가의 화합물 반도체 재료의 사용으로 인한 가격 상승에 의한 모듈 가격의 상승을 막을 수 있다. 다만 저가의 집광용 실리콘 태양광 전지가 아직까지 많은 수요를 갖고 있지 않고 최소 25%이상의 효율을 갖는 중집광용 태양전지가 요구된다. 이렇게 되었을때 최대 중집광 태양광 모듈은 20%이상이 가능하며 grid parity에 근접하는 솔루션을 제공할수 있는 강력한 후보가 될수 있다. 향후 실제 프레넬 렌즈의 제작을 통해 성능

증명 및 집광용 실리콘 태양전지의 개발이 그에 발맞춰 이루어진다면 강력한 경쟁력을 갖게 될 것으로 보인다.

후 기

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 중소기업청의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(과제번호 : NO.S1071686)

참 고 문 헌

1. Kurtz "Opportunities and Challenges for Development of a Mature concentrating Photovoltaic Industry" Technical report of NREL(2009)
2. R.J.Schwartz and M.D.Lammert, "Silicon solar cells for high concentration applications", Technical Digest of the International Electron Devices Meeting,(1975)350-2
3. R.M.Swanson and R.A.Sinton "Point contact silicon solar cells", Proceedings of the 7th European Photovoltaic Solar Energy Conference, (D.Reidel Publishing Company 1986) 742-8
4. R.Leutz,A.Suzuki, "Nonimaging Fresnel lenses: Design and Performance of Solar Concentrators", Springer,Berlin(Heidelberg/New York) 2001.
5. Naichia Yeh, "Optical geometry approach for elliptical Fresnel lens design and chromatic aberration" Solar Energy Materials& Solar cells 93, pp.1309-1317,2009