

고집광 태양광 발전을 위한 광학시스템 렌즈 개발

유광선*, 차원호*, 신구환*, 조희근*, 김용식**, 강성원**, 강기환***

*한국과학기술원 인공위성연구센터(ksryu@satrec.kaist.ac.kr, whcha, ghshin, hkcho),
**(주)비제이파워(yosikim@bjpower.co.kr, swkang),
***한국에너지기술연구원 태양광연구단(ghkang@kier.re.kr)

The Development of the Lens of the Optical System for High Concentration Solar PV System

Ryu, Kwang-sun* Cha, Won-ho* Shin, Goo-hwan* Cho, Hee Keun*
Kim, Young-sik** Kang, Seong-won** Kang, Gi-Hwan***

*SaTReC, KAIST(ksryu@satrec.kaist.ac.kr, whcha, ghshin, hkcho),
**BJ Power(yosikim@bjpower.co.kr, swkang),
***(c)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. There are two types of concentration optics for solar energy conversion. One is to use mirrors, and the other is to use Fresnel lenses. The gains that can be achieved with a Fresnel lens or a parabolic mirror are compared. The result showed the gains are comparable and the two configurations were developed competitively. 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. A convex linear Fresnel lens to improve the concentration ratio and the efficiency is devised and flat linear Fresnel lens in thermal energy collection is utilized. In this study, we designed and optimized flat Fresnel lens and the 'light pipe' to develop 500X concentrated solar PV system. In the process, we compare the transmission efficiencies according to groove types. We performed rigorous ray tracing simulation of the flat Fresnel lenses. The computer aided simulation showed the 'grooves in case' has the better efficiency than that of 'grooves out case'. Based on the ray-trace results we designed and manufactured sample Fresnel lenses. The optical performance were measured and compared with ray-trace results. Finally, the optical efficiency was measured to be above 75%. All the design and manufacturing were performed based on that InGaP/InGaAs/Ge triple junction solar cell is used to convert the photon energy to electrical power. Field test will be made and analyzed in the near future.

Keywords : 태양광 발전(Solar PV System), 집광 렌즈(Concentration Lens), 프레넬 렌즈(Fresnel Lens), III-V 족 고효율 태양전지(III-V high efficiency solar cell)

투고일자 : 2011년 2월 11일, 심사일자 : 2011년 3월 10일, 게재확정일자 : 2011년 3월 28일
교신저자 : 유광선(ksryu@satrec.kaist.ac.kr)

1. 서 론

태양광 발전은 현재 주력 전력원인 화석연료와 원자력 발전의 환경이나 안전에 대한 위협을 극복하고 이들을 대체할 수 있는 차세대 에너지원으로서 각광을 받고 있다. 현재까지는 태양광 발전 시스템에 소요되는 비용이 다른 에너지원에 비해 경쟁력을 갖지 못하고 있다. 이러한 이유로 인하여 태양광 발전 시스템의 건설비용을 줄이고자 하는 연구가 다각도로 진행되고 있으며, 이중 광학계의 대량 생산을 통하여 제조비용을 획기적으로 낮출 수 있는 집광형 발전 시스템에 대한 관심은 계속 증가하고 있다.¹⁾²⁾

집광형 태양광 발전에는 두 가지 타입이 있는데, 하나는 반사경을 이용하는 것이고³⁾, 다른 하나는 프레넬 렌즈를 이용하는 것이다.⁴⁾ 이들 두 가지 타입의 광학적 이득에 대한 비교연구가 이루어진 바 있으며⁵⁾, 결과적으로 큰 차이가 없으며 각각에 대한 연구가 경쟁적으로 이루어지고 있다. 프레넬 렌즈를 이용한 태양광발전 시스템의 경우 몇 가지 변형된 형태가 발명되어 실제 테스트가 이루어지고 있다.⁶⁾

어떤 경우에는 상업적으로 판매되는 평면형 프레넬 렌즈를 이용하여 집광형 발전 시스템을 구성하기도 하며, 효율을 높이기 위하여 볼록렌즈 형태로 곡면으로 구성된 선형 프레넬 렌즈를 사용하기도 한다. 본 연구에

서는 제작이나 시스템 구성 면에서 이점을 가지고 있다고 판단되는 프레넬 렌즈와 광 파이프(light pipe)를 이용하여 500배 집광의 태양광 발전 모듈을 구성하기 위한 프레넬 렌즈의 설계와 제작, 그리고 이에 대한 효율 측정 등에 대한 연구를 수행하였다.

연구의 과정에서 프레넬 렌즈의 각은 면 (facet) 방향이 아래와 위 방향에 각각 제작된 'groove in' 경우와 'groove out' 경우⁷⁾에 대한 투과 효율에 대한 비교 연구가 이루어졌으며, 컴퓨터를 이용한 ray tracing 과정을 통해 입사 방향 반대인 아래 방향으로 facet 이 제작된 'groove in' 경우가 좀 더 높은 광학적 효율을 가짐을 알 수 있었다. 렌즈만 사용할 경우 태양전지 상에 빛의 분포가 고르지 못하며, 이는 효율 감소와 열적 비등방성으로 인하여 태양전지의 수명이 감소되는 효과가 발생할 수 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 광 파이프를 보조 렌즈 형태로 구성하여 태양전지 위에 위치하도록 하였으며, 집광을 하였을 때, 효율이 증가하는 삼중 접합 태양전지 (InGaP/InGaAs/Ge)를 사용하도록 디자인 하였다. 설계된 렌즈를 제작하여 광학적 특성을 측정하여 이를 소개한다.

2. 렌즈 설계

본 연구에서 채택한 집광형 렌즈 시스템은 그림 1에 나타난 바와 같이 프레넬 렌즈의 어레이를 이용하여 집광모듈을 반복적으로 배치하는 점집광 프레넬 렌즈(point focus Fresnel) 방식이다. 점집광 프레넬 렌즈 방식은 제작이나 효율에 있어 접시형 반사경 방식(point focus dish)이나 선형 집광 렌즈 방식(linear focus trough)에 비해 뛰어난 것을 알려져 주로 미국을 중심으로 기술이 발전하고 있다.

본 연구에서는 집광형 태양광 발전에 사용할 수 있는 프레넬 렌즈의 디자인을 위하여 제

- 1) Whitfield et al., 1999. The development and testing of small concentrating PV systems. *Solar Energy* 67, 23~34
- 2) Kaiyan et al., 2011. A novel multiple curved surfaces compound concentrator. *Solar Energy* 85, 523~529
- 3) Feuermann, D., Gordon, J.M., 2001. High-concentration photovoltaic designs based on miniature parabolic dishes. *Solar Energy* 70, 423~430
- 4) Lorenzo, E., Luque, E., 1981. Fresnel lens analysis for solar energy applications. *Appl. Opt.* 20(17), 2941~2945
- 5) Lorenzo, E., Luque, E., 1982. Comparison of Fresnel lenses and parabolic mirrors as solar energy concentrators. *Appl. Opt.* 21(10), 1851~1853
- 6) Ryu et al., 2006, Concept and design of modular Fresnel lenses for concentration solar PV system. *Solar Energy*, 80, 1580~1587

- 7) Fresnel Technologies Inc. 2003, Fresnel Lenses, <http://www.fresneltech.com/pdf/FresnelLenses.pdf>, Fort Worth, Texas

한적인 프레넬 렌즈 디자인 기능만을 제공하는 상업용 광학 디자인 소프트웨어를 사용하는 대신, 광학적 효율과 초점면에서의 성능을 예측하기 위한 소프트웨어를 직접 코딩하여 사용하였다. 프레넬 렌즈 디자인을 위한 소프트웨어로는 과학 및 공학용 프로그램 언어인 IDL(Interactive Data Language, C 언어나 Fortran 언어의 특성을 모두 지닌 프로그래밍 언어의 일종⁸⁾을 이용하였다. 소프트웨어는 투과 효율을 계산하는 부분과, 실제 광선추적(ray tracing) 기법을 적용하여 초점면에서 광의 분포를 계산하는 부분으로 구성하였다.

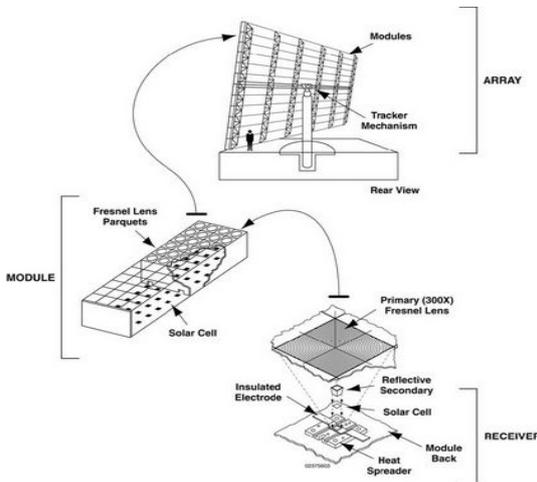


그림 1. 점집광 방식의 프레넬 렌즈를 이용한 태양광 발전 모듈의 일반적 형상. 어레이 전체의 크기는 용량에 따라 5~10 m 까지 다양함.

첫 번째 부분은, 프레넬 렌즈의 형태에 따라 각 면의 각도를 결정(스넬의 법칙 이용)하고 굴절면에서의 투과도와 반사도를 결정하는 프레넬 방정식⁹⁾을 적용하여 렌즈 전면에서 걸쳐 태양광이 투과할 때 발생하는 에너지 손실을 계산하게 된다. 다음 그림 2에는 프레넬 렌즈의 각 면이 안쪽으로 나있는

'grooves in' 경우와 밖으로 나있는 'grooves out' 경우에 대하여 초점거리(f)에 따른 투과 효율이 나타나 있다.

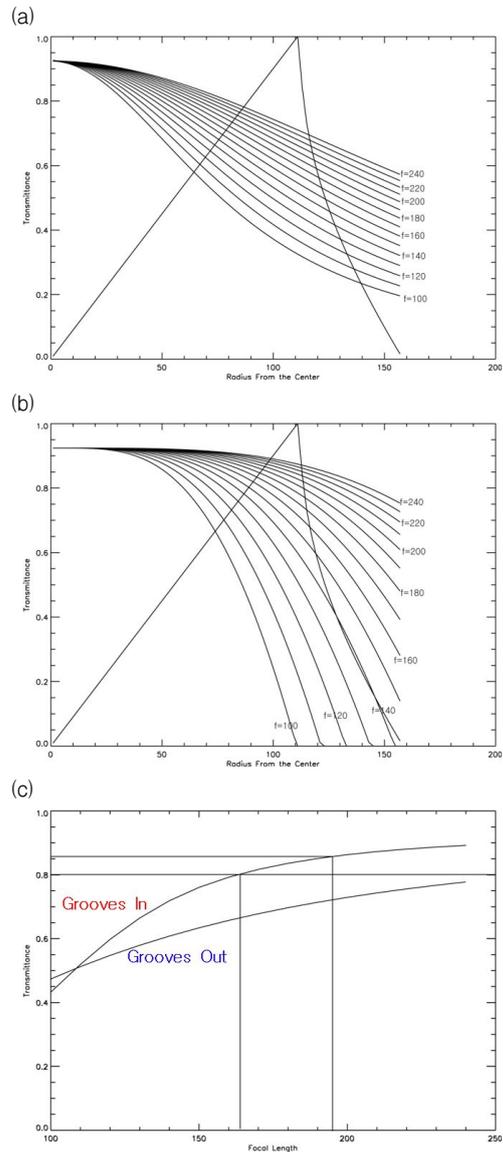


그림 2. 두 가지 프레넬 렌즈 타입에 대한 투과 효율 계산 결과. (a) grooves in case, (b) grooves out case. 렌즈로 입사하는 모든 빛이 태양전지에 결상된다는 가정 하에 투과율을 구한 것으로 초점 거리를 다르게 했을 때, 프레넬 렌즈의 중앙에서부터 투과 효율을 구하였음. (c)는 초점 거리에 따른 투과 효율.

8) IIT Visual Information Solutions, <http://www.itvis.com/>

9) Born, M. and Wolf, E. 2002, "Principles of Optics, 7th edition", Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom

그림 2 (a)와 (b)에서 x-축은 렌즈 중앙에서의 거리를 나타내며, 거리가 증가함에 따라 효율 자체는 감소하지만, 면적 효과는 선형적으로 증가하다가 면과 맞닿으면서 급격히 감소한다. 모든 조건이 같은 경우 초점거리가 클수록 효율이 증가한다. 전체적인 투과율(η)은 단위거리에서의 투과 효율($T(r)$)과 면적에 의한 효과를 다음 식 (1)과 같이 적분하여 구하였다. η 는 렌즈 상으로 입사하는 태양광 에너지에 대해 실제로 태양전지로 입사하는 에너지의 비율을 나타낸다.

$$\eta = \frac{\int_0^{r_{edge}} T(r)C(r)dr}{\int_0^{r_{edge}} C(r)dr} \dots\dots\dots \text{식 (1)}$$

여기서, r_{edge} 는 렌즈의 중심에서 정사각형의 모서리까지의 거리이다. $C(r)$ 은 렌즈 중심에서의 거리 r 에서의 프레넬 렌즈가 차지하는 둘레를 나타내며, 정사각형의 한 변의 길이의 반에 이르기 전까지는 $2\pi r$ 로 정의되며, 그 이상이 되면 다음 식 (2)와 같이 주어진다.

$$C(r) = \left(2\pi - 8\arcsin\left(\frac{D}{2r}\right)\right)r \dots\dots\dots \text{식 (2)}$$

여기서, D 는 정사각형으로 디자인된 프레넬 렌즈의 한 변의 길이이다. 이러한 면적에 의한 효과가 그림 2 (a)와 (b)에 정규화하여 나타내었다.

그림 2(c)에서 볼 수 있듯이 같은 초점거리를 갖는 경우 'grooves in' 경우의 투과효율이 높음을 알 수 있었으며, 본 연구에서도 이를 선택하여 광학계를 디자인 하였으며, 초점거리와 프레넬 렌즈의 면적을 결정하는 기본 자료로 활용되었다.

두 번째 부분은 실제 태양광이 프레넬 렌즈

에 입사하여 진행되는 방향을 추적하여 태양전지가 놓여있는 초점면에 이르는 전 과정을 모사하여 태양전지 면에서의 광 분포를 모사한 부분이다. 빔이 시작하는 부분에서 광의 위치와 방향을 벡터로 지정하고 빛이 렌즈 면에 입사하는 부분, 렌즈 면에서 빠져나가는 부분에서 다시 교차 위치와 빛의 진행 방향을 스넬의 법칙에 의거하여 새로이 유도하고, 최종적으로 태양전지 면과 교차하는 부분의 좌표를 구하여 빛의 분포를 구하게 된다. (그림 3 참조)

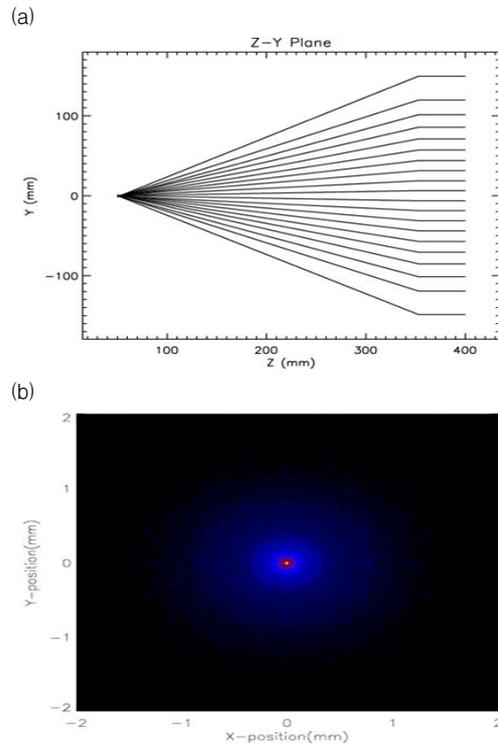


그림 3. IDL로 구성한 프레넬 렌즈 광학 Ray-Tracing 코드의 결과물. (a) 빛의 진행 방향을 추적하는 모습은 단면으로 보여주고 있음. (b) 태양전지 상에서 빛의 분포

프레넬 렌즈의 성능을 계산하는 과정에서 실제 상황을 충분히 고려하기 위해서는 파장에 따른 분석을 각각 수행한 후에 태양광의 스펙트럼과 태양전지의 파장에 따른 양자효율을 고려한 종합적인 분석이 요구된다.

과장에 따른 효과를 고려하기 위해 조사된 화합물 반도체 III-V족 태양전지의 양자효율, 그리고 태양의 스펙트럼과 태양전지의 발전 파장 범위 내에서, 재료로 사용한 PMMA(polymethyl methacrylate)의 굴절률 등을 고려하여 파장별로 각각 광선추적을 수행하여 초점면 상에서 빛의 분포를 구하고($F_{\lambda}(x,y)$), 각 파장별 가중치(weight)를 태양 스펙트럼과 태양전지의 양자효율을 곱하여 구한 후(w_{λ}), 각 파장의 분포를 다음 식(3)과 같이 최종적으로 유도하였다.

$$F(x,y) = \sum_{\lambda} w_{\lambda} F_{\lambda}(x,y) \dots\dots\dots \text{식 (3)}$$

3. 렌즈 제작

렌즈의 설계와 더불어 사용될 수 있는 태양전지에 대한 선택을 하였으며, 두 가지 종류의 태양전지를 사용하여 샘플 모듈을 제작하였다. 10 mm × 10 mm 태양전지용으로는 224 mm × 224 mm의 면적으로, 5.5 mm × 5.5 mm 태양전지용으로는 124 mm × 124 mm의 면적으로 디자인하였다. 태양전지의 특성과 전체 시스템의 출력 등에 대해서는 추후에 전체 시스템에 대한 논문으로 따로 발표할 예정이다.

연구의 결과로 디자인 된 렌즈에 대한 샘플 렌즈를 제작하였다. 재질은 PMMA가 사용되었으며, 가공은 한국기초과학지원연구원의 초정밀 렌즈 제작용 다이아몬드 가공기 (Freeform 700A)를 이용하여 이루어졌다. (그림 4 참조) 두 가지 버전에 대해 모두 가공이 이루어졌으며, 렌즈의 성능과 직결되는 표면 거칠기와 형상을 측정하였으며 표면 거칠기의 경우 Ra = 10 nm 이하의 요구사항을 제시하였으며, 측정 결과는 Ra 값이 약 3 nm로 나와 굴절면에서 광학적인 손실은 없을 것으로 예상된다. 참고로 Ra 는 중심선 평균 거칠기를 나타내

는 수치로서 거칠기 곡선에서 기준선이 전체에 걸쳐 평균선으로부터 벗어나는 모든 봉우리와 골짜기의 편차 평균값을 의미한다.

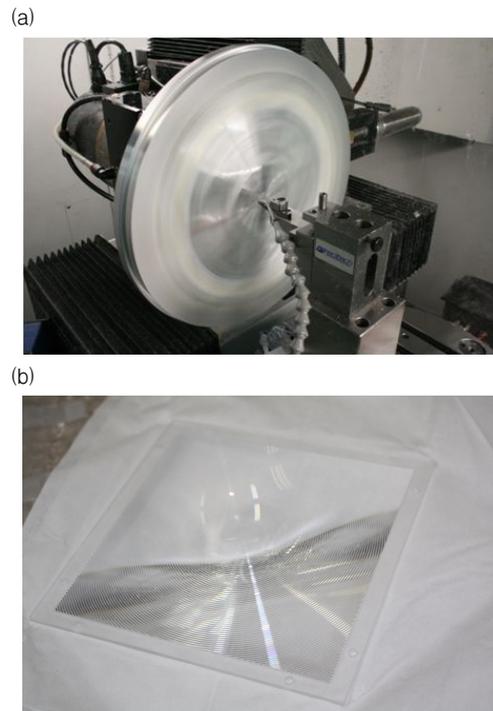


그림 4. (a) 프레넬 렌즈의 제작과정 및 (b) 완성된 프레넬 렌즈

형상의 경우 작은 면에서는 거의 오차가 없었으나, 작은 면의 모서리(edge) 부분에서 가공 시간과 난이도의 문제로 곡면이 생성되는데, 반경을 20 μm 이하로 요구하였으나 가공시간이 너무 많이 걸리는 문제와 가공 팁이 파손되는 문제점 등으로 인하여 약 50 μm로 형성되었으며 이는 광학적인 손실로 이어질 수 있는 부분이다.

4. 렌즈 성능 측정 실험 및 결과

가공이 완성된 후에는 실제 광학적 성능을 테스트하기 위하여 평행광을 만들어 주는 장치인 콜리메이터(collimator)와 CCD(charge coupled

device) 카메라, 그리고 광도계(Photometer) 등을 이용하여 초점의 형성과 광효율을 측정하였다. 현재 보유하고 있는 콜리메이터의 직경은 126.5 mm로서, 렌즈 면적이 124 mm × 124 mm 인 5.5 mm × 5.5 mm 태양전지용 프레넬 렌즈에 대한 성능 측정이 이루어졌으며, 실험 과정과 결과가 다음 그림 5에 나타나 있다. CCD를 이용한 결상 성능 측정의 경우 CCD가 프레넬 렌즈의 초점에 위치할 경우, 그림 5(a)와 (b)에 나타나 있듯이 빛의 대부분이 영상의 중앙에 잘 형성되고 있으며, 분산을 구해보면 σ 값이 x 축과 y 축에 대하여 각각 0.2 mm와 0.33 mm로서 거의 대부분의 빛(95% 이상)이 지름 0.3 mm 안에 형성됨을 알 수 있었으며 태양전지의 크기가 5.5 mm × 5.5 mm임을 고려하면 결상이 거의 완벽하게 이루어지고 있음을 알 수 있다.

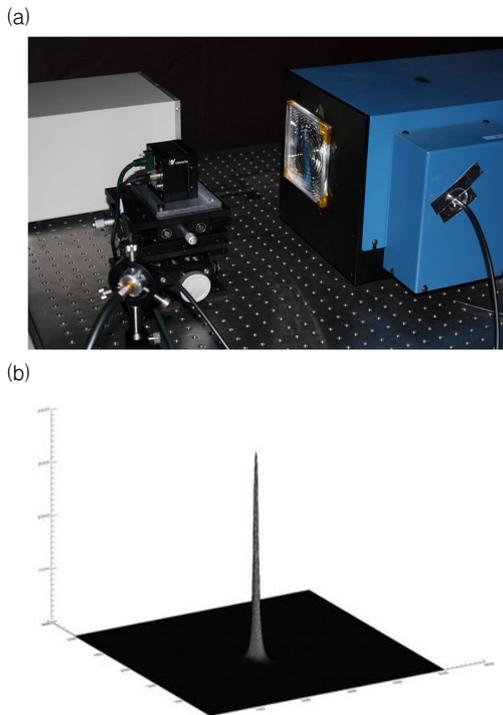


그림 5. (a) 가공된 5.5 mm × 5.5 mm 태양전지용 렌즈의 성능을 측정하기 위해 CCD 센서를 이용하여 초점면에서의 광분포 측정 및 (b) 측정 결과

224 mm × 224 mm의 면적을 갖는 10 mm × 10 mm 태양전지용 프레넬 렌즈의 경우 LED(발광 다이오드, light-emitting diode)와 광도계를 이용하여 효율 측정을 시도하였으며 렌즈의 중심에서부터 일정한 간격을 두고 투과율을 측정하였다. 그림 6에는 렌즈의 중심에서 거리에 따른 투과율 측정 방법과 측정결과가 나타나 있다. 전체 면적에 대한 투과율을 측정한 최종 결과 값은 76.2%로서 렌즈의 유효 면적이 렌즈 중심에서부터의 거리의 제곱에 비례하므로 전체 면적에 대한 투과율을 중심으로부터의 거리의 제곱만큼 비중을 두어 평균을 취하여 획득한 값이다.

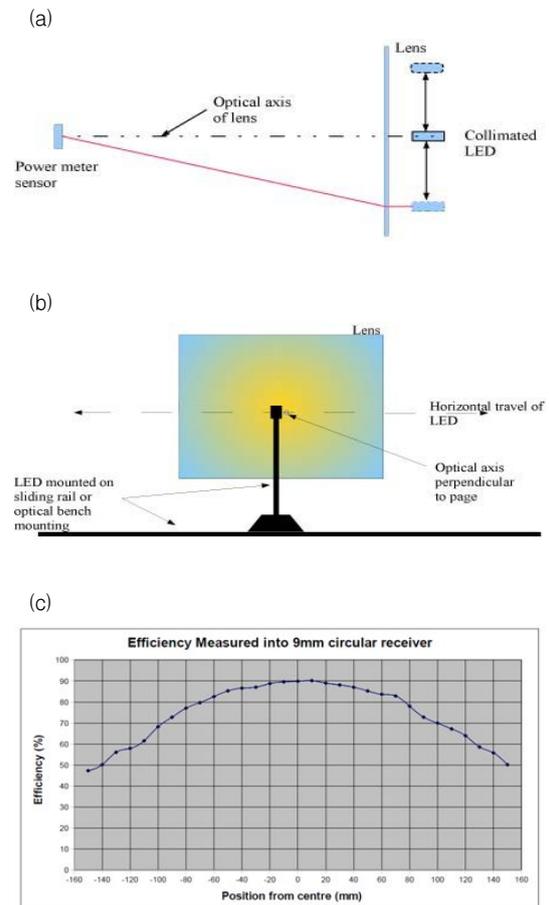


그림 6. 렌즈 중심에서부터의 거리에 따른 투과율 측정 (a) LED를 이용한 측정 방법 (b) 뒤에서 본 측정 방법 (c) 측정결과

5. 결 론

본 연구를 통하여 고집광 태양광 발전에 사용할 수 있는 프레넬 렌즈를 설계하고 실제로 제작하여 광학적 특성을 측정하였다. 결상 특성 결과에 따르면, 거의 대부분의 빛(95 % 이상)이 지름 0.3 mm 안에 형성됨을 알 수 있었으며 2차 광학계로 사용되는 광 파이프 상에 결상이 정상적으로 이루어지고 있음을 알 수 있었다.

전체 면적에 대한 투과율을 유도한 최종 결과 값은 76.2 % 로서 설계치 보다는 낮지만 외국 수준과 유사한 투과율을 가짐을 알 수 있었다. 투과율을 향상시키기 위해서는 현재 가공된 렌즈의 성능을 향상시켜야 한다. 가공할 때, 가공 시간이나 가공 팁 파손 등의 문제로 발생할 수 있는 곡선면의 문제 등으로 인해 효율 상의 손실이 있을 수 있으며, 피치의 값을 증가하는 방법에 의해 이를 최소화 하는 방법 등을 고려할 수 있다. 또, 광학적 코팅을 하여 반사율을 감소시키는 방법을 사용할 수도 있다. 이러한 문제점 해결은 후속 연구의 중요한 부분을 차지할 것으로 기대한다. 광학적 문제 이외에도 집광에 의해 발생하는 열에 의한 효율 감소도 중요한 요소로서 이에 대한 연구도 병행하고 있다.

후 기

본 연구는 신재생에너지기술개발사업 ‘초고효율 III-V족 태양전지 고집광 모듈 패키지 기술개발사업’의 지원으로 수행되었습니다. (과제번호 : 2009T100100013)

참 고 문 헌

1. Feuermann, D., Gordon, J.M., 2001. High-concentration photovoltaic designs based on miniature parabolic dishes. Solar

- Energy 70, 423~430
2. Kaiyan, H., Hongfei, Z., and Tao, T. 2011, A novel multiple curved surfaces compound concentrator, Solar Energy 85, 523~529
3. Lorenzo, E., Luque, E., 1981. Fresnel lens analysis for solar energy applications. Appl. Opt. 20(17), 2941~2945
4. Lorenzo, E., Luque, E., 1982. Comparison of Fresnel lenses and parabolic mirrors as solar energy concentrators. Appl. Opt. 21(10), 1851~1853
5. Ryu et al., 2006, Concept and design of modular Fresnel lenses for concentration solar PV system. Solar Energy, 80, 1580~1587
6. Whitfield et al., 1999. The development and testing of small concentrating PV systems. Solar Energy 67, 23~34
7. Fresnel Technologies Inc. 2003, Fresnel Lenses, <http://www.fresneltech.com/pdf/FresnelLenses.pdf>, Fort Worth, Texas
8. ITT Visual Information Solutions, <http://www.itvis.com/>
9. Born, M. and Wolf, E. 2002, "Principles of Optics, 7th Edition", Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom