

평판 구조의 집광형 태양광 모듈 구조에 관한 연구

박승재^a, 홍민성^{b*}

A Study on Concentrating Photovoltaic Module with Plate Structure

Seung-Jae Park^a, Min-Sung Hong^{b*}^a Graduate School of Engineering, Ajou University, San 5, Woncheon-Dong, Yeongtong-Gu, Suwon, 443-749, Republic of Korea^b Dept. of Mechanical Engineering, Ajou University, San 5, Woncheon-Dong, Yeongtong-Gu, Suwon, 443-749, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	22	April	2013
Revised	27	May	2013
Accepted	29	May	2013

Keywords:

Concentrating photovoltaic
Fresnel lens
Solar cell
Solar battery
Plate structure

ABSTRACT

This study aims to investigate a new structure for a concentrating photovoltaic (PV) module using a III-V compound semiconductor solar cell to solve the problems of existing concentrating PV modules and to explore a concentrating optical system with a flat structure, which shows remarkable advantages in terms of manufacturing cost, installation, and maintenance. This study should greatly contribute toward the development of concentrating PV modules. This study was performed to achieve an improvement in efficiency and economy and to implement an actual product. A new source of renewable energy is the only way in which countries that cannot produce oil can even emerge as an energy power. Therefore, this work can serve as a fundamental study that will help South Korea grow into a country that is a PV power generation force.

1. 서론

근래에 들어 석탄, 석유, 원자력, 천연가스 등에 대한 에너지 소비의 급격한 증가와 이로 인한 에너지원의 고갈로 인해 대체에너지의 연구가 현재 활발히 이루어지고 있다. 이러한 대체에너지는 풍력, 조력, 파력, 지열, 수소, 태양열 등이 있으며, 이 중에서도 태양광을 이용한 대체 에너지가 많은 각광을 받고 있어, 이에 대한 다양한 연구가 이루어지고 있다.

태양광 에너지를 대체 에너지로 사용하기 위한 태양광 발전 모듈은 크게 실리콘 평판 모듈, 박막형 모듈, 및 집광형 모듈로 나눌 수 있으며, 그 중에서 집광형 태양광 모듈은 렌즈 또는 반사경과 같은 광학계를 사용하여 수백 배의 높은 배율로 태양광을 집광시킨

후, 작은 면적을 갖는 고효율의 III-V족 화합물 반도체 태양전지 셀에 입사시켜 발전하는 차세대 태양광 발전 모듈이다.

이러한 집광형 태양광 모듈은 기존의 실리콘계 태양전지 셀을 이용한 평판형 태양광 모듈에 비해 높은 발전 효율 및 낮은 제조원가를 구현할 수 있는 장점이 있다^[1].

본 연구는 이러한 III-V족 화합물 반도체 태양 전지를 사용하는 집광형 태양광 모듈의 새로운 구조의 개발에 관한 것으로, 기존의 집광형 태양광 모듈이 갖는 문제점들을 해결하고 제조 원가, 설치, 유지 보수 등에서 획기적인 장점을 갖는 평판 구조의 집광형 모듈의 집광 광학계를 개발하였다. 또한, 평판 구조의 집광 광학계의 설계 및 시뮬레이션 과 화합물 반도체 태양전지 셀의 리시버 제작과 특성 평가 까지 수행하여 실질적인 제품 구현을 목표로 한다.

* Corresponding author. Tel.: +82-31-219-2526

Fax: +82-31-219-1611

E-mail address: mshong@ajou.ac.kr (Min-Sung Hong).

2. 태양광 관련 이론

2.1 태양 전지 이론

태양광 발전은 태양광을 직접 전기에너지로 변환시키는 기술로 햇빛을 받으면 광전효과에 의해 전기를 발생하는 태양전지를 이용한 발전방식으로, 태양광 발전시스템은 태양전지(solar cell)로 구성된 모듈(module)과 축전지 및 전력변환장치로 구성된다.

2.1.1 태양전지의 발전 원리

태양에너지를 전기에너지로 변환할 목적으로 제작된 광전지로서 금속과 반도체의 접촉면 또는 반도체의 PN접합에 빛을 조사(照射)하면 광전효과에 의해 광기전력이 일어나는 것을 이용 한다. 태양 전지는 Fig. 1에서와 같이 전기적 성질이 다른 N (negative)형의 반도체와 P (positive)형의 반도체를 접합시킨 구조를 하고 있으며 2개의 반도체 경계 부분을 PN접합(PN-junction)이라 일컫는다. 이 PN접합에 의해 전계(電界)가 발생하며, 태양전지에 빛이 입사 되면 반도체내의 전자(-)와 정공(+)이 여기 되어 반도체 내부를 자유로이 이동하는 상태가 된다. 자유로이 이동하다가 PN접합에 의해 생긴 전계에 들어오게 되면 전자(-)는 N형 반도체에, 정공(+)은 P형 반도체에 이르게 되며, 이때 P형 반도체와 N형 반도체 표면에 전극을 형성하여 전자를 외부 회로로 흐르게 하면 전류가 발생된다.

2.1.2 태양전지의 종류

태양전지(solar cell, solar battery)는 Fig. 2와 같이 재료에 따라 결정질 실리콘, 비정질실리콘, 화합물반도체 등으로 분류 되며, 현재 실용화 되어 전원용으로 이용되고 있는 것은 주로 실리콘 태양 전지이며, 실리콘 태양전지는 이미 반도체 분야에서 서 많은 연구 개

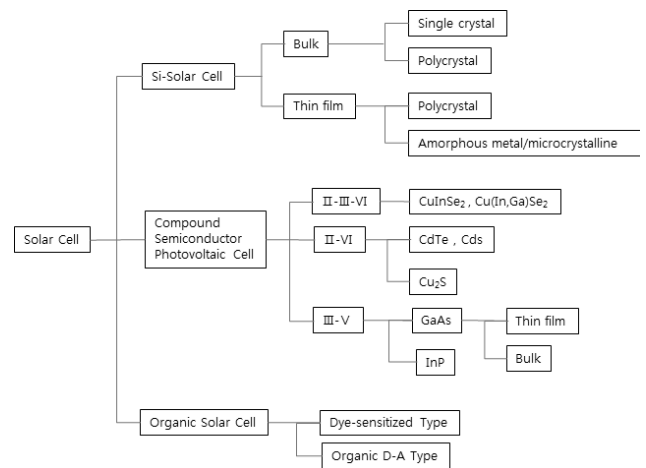


Fig. 2 Classification by solar cell materials

발이 되어 있고, 또 그동안 누적 보급 면에서 월등하므로 기술의 신뢰성이 높다^[3].

2.1.3 차세대 태양전지

삼중 접합 화합물반도체 태양 전지는 차세대 고집광을 위한 태양 전지 이다. 고집광 태양광 모듈에서는 GaAs III-V족 화합물 반도체 물질을 기반으로 하는 태양 전지를 사용하게 된다. 화합물반도체 태양 전지는 기존의 실리콘 계 셀에 비하여 다음과 같은 특성들이 우수하여 고집광 태양광 모듈에 매우 적합한 재료이다^[4].

2.2 집광형 태양광 발전

2.2.1 종래의 집광형 태양광 모듈 구조

집광형 태양광 모듈은 태양광을 집광시키는 방식에 따라 크게 Fig. 3와 같이 프레넬 렌즈를 이용하여 태양광을 집광시키는 굴절식 태양광 모듈 과 Fig. 4과 같이 파라볼릭 반사경을 이용하여 태양광을 집광시키는 반사식 태양광 모듈로 나누어지며, 굴절식 태양광 모듈에는 Fig. 5과 같이 리플렉터를 이용한 저집광 태양광 모듈과

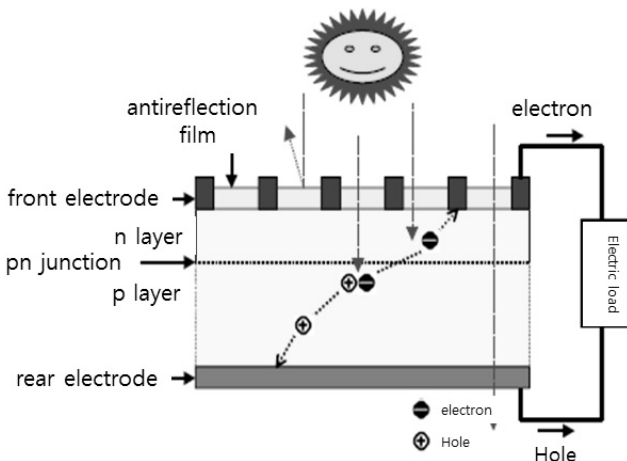


Fig. 1 The principle of solar power by the PN junction^[2]

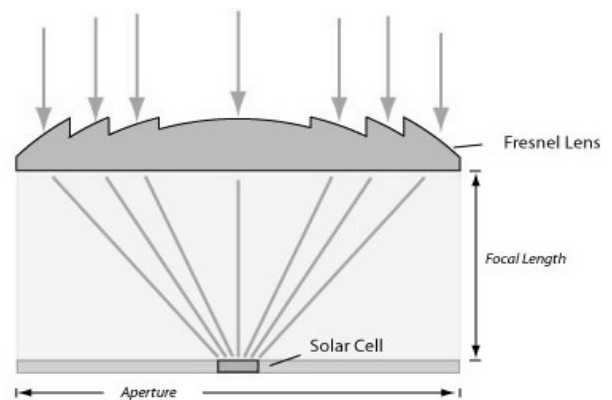


Fig. 3 Representative concentration PV module structure^[5]

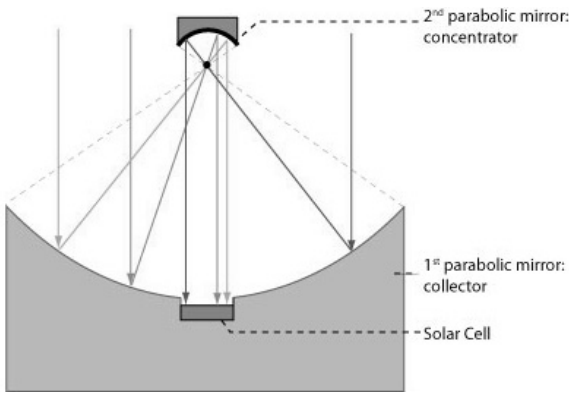


Fig. 4 Parabolic mirrors structure^[5]

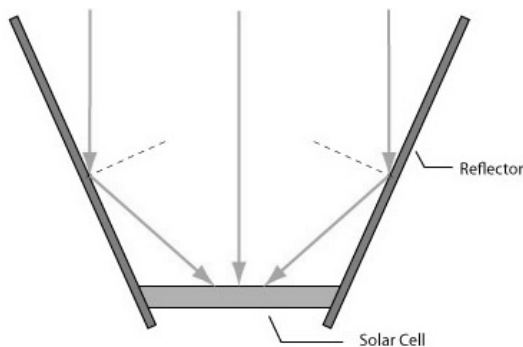


Fig. 5 Reflectors guide structure^[5]

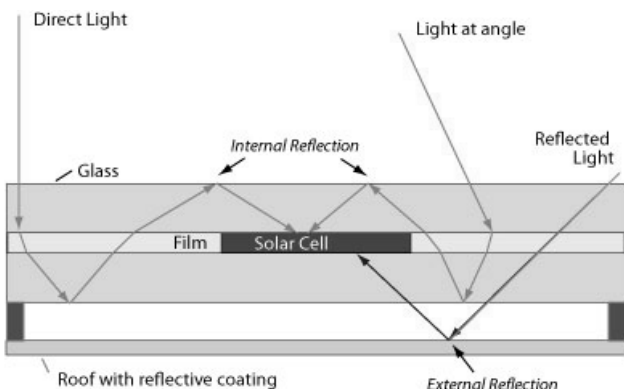


Fig. 6 Luminescent concentrators structure^[5]

Fig. 6과 같이 발광 굴절을 이용한 굴절 반사식 모듈도 개발되고 있다.

2.2.2 평판 구조의 집광형 태양광 모듈 구조

본 연구에서는 수직으로 집광된 태양광을 수평면으로 방향을 바꾼 후 수평면에서 집광이 이루어지도록 한 새로운 구조의 집광 광학계 개발을 하고자 하며, 본 연구의 평판 구조는 Fig. 7와 같이 기존의 집광형 모듈 광학계와는 획기적으로 구별된다.

본 집광 광학계는 크게 구획화된 집광 렌즈 판, 수직 집광된 빛을

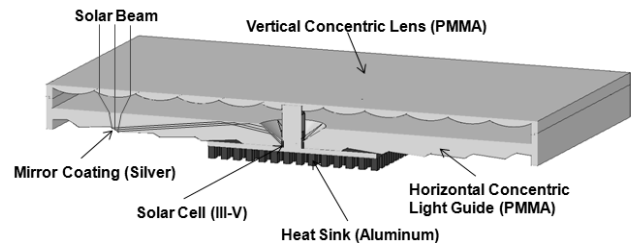


Fig. 7 Concentrating PV module with a flat structure

수평 방향으로 반사시킨 후 중심을 향하여 진행할 때 내부 전반사를 일으킬 수 있도록 설계된 수평 반사 도광판 및 중심에 모여 화합물반도체 태양 전지에 빛이 입사되는 구조로 구성되어 있다.

3. 평판 광학 설계

3.1 평판 광학계

3.1.1 평판 집광 광학계 설계 변수

(1) 설계 변수 결정

다음의 Fig. 8은 평판 구조의 집광 광학계 설계를 위한 설계 변수들을 정의하기 위한 개념도이다.

각각의 설계 변수들은 다음과 같이 정의된다.

- L: 집광형 태양광 모듈 광학계의 직경
- w: 구획화된 집광 영역의 단위 구간의 폭, 수직 집광 블록렌즈 폭
- n: 중심부의 블록 렌즈를 제외한 구획화된 집광 구간의 개수
- t1: 수직 집광 렌즈의 블록 렌즈가 없는 가장자리 부분의 두께
- t2: 수평 도광판의 가장자리 부분의 두께
- d: 수직 집광 렌즈와 수평 도광판 사이의 거리
- a: 수평 도광판의 파라볼릭 반사면의 높이
- b: 수평 도광판의 파라볼릭 반사면의 폭
- p: 수평 도광판의 중심부 반사면의 경사각

(2) 수직 집광 렌즈 설계 시 고려 사항

수직 집광용 블록 렌즈는 기본적으로 다음의 Fig. 9와 같은 구조를 갖는다.

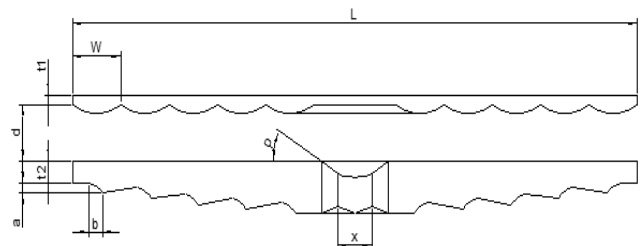


Fig. 8 Definition of variables necessary for the design of optical system

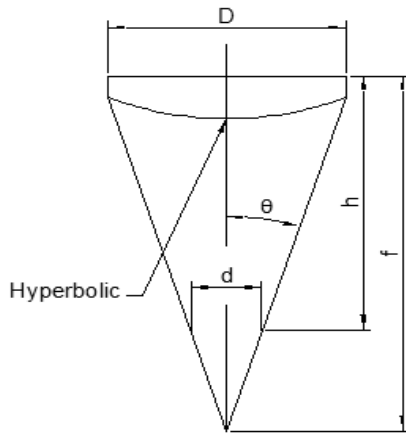


Fig. 9 Fundamental structure of the convex lens for vertical concentration^[6]

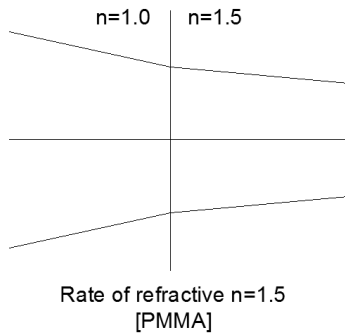


Fig. 10 Convergence angle after the occurrence of additional light refraction by a horizontal light guide plate

여기에서 D는 하나의 렌즈 구역의 직경, F는 초점 거리이고 θ 는 수렴각(converging angle)이다. 이들 변수들의 관계는 다음과 같다.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{D}{2F}\right) \quad (1)$$

$$d = D \times \frac{h}{F}$$

1차 집광 렌즈 설계 시 추가로 고려하여야 사항은 볼록 렌즈를 통하여 집광되는 빛은 초점 거리에 이르기 전에 그 하부에 위치한 수평 도광판 안으로 들어가게 된다. 이는 굴절율의 차이에 의한 빛의 굴절을 일으키게 되어 수렴각 θ 가 달라지게 되므로 이를 이차 수평 도광판 설계 시에 고려해 주어야 한다. 굴절율 1.5인 PMMA 또는 유리 재질의 수평 도광판 안으로 들어가는 빛은 다음의 Fig. 10에 나타난 바와 같은 경로를 갖게 된다.

(3) 수평 도광판 설계 시 고려 사항

수평 도광판 설계 시 고려하여야 할 가장 중요한 부분은 수직 입사된 빛을 반사시켜 중심을 향한 수평 방향으로 방향 전환하는

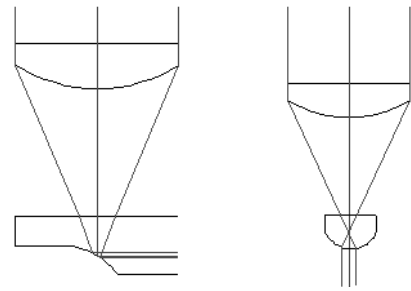


Fig. 11 Drawing of the concept of a reflector of a horizontal light guide plate

파라볼릭 반사경 부분이다.

Fig. 11에 제시된 바와 같이 빛이 꺾이지 않고 직진하는 구조로 설계하여도 개념적으로는 동일하다.

3.1.2 평판 집광 광학계 시뮬레이션

(1) 340 mm 크기의 모듈용 광학계 시뮬레이션

먼저 한 변의 길이가 340 mm이고, 중심부를 제외한 집광 영역 n의 개수를 8개로 한 경우의 평면 집광 광학계에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 위하여 Fig. 12에 나타난 변수 값들이 결정되어야 한다.

이와 같이 결정된 모든 설계 변수를 대입하여 수직으로 입사된 빛에 대하여 광학계 내에서 빛의 전달 경로를 시뮬레이션 하였으

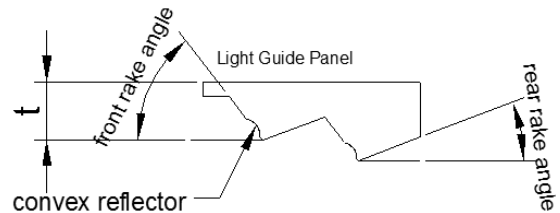


Fig. 12 Structural variables of the specular surface of a horizontal light guide plate

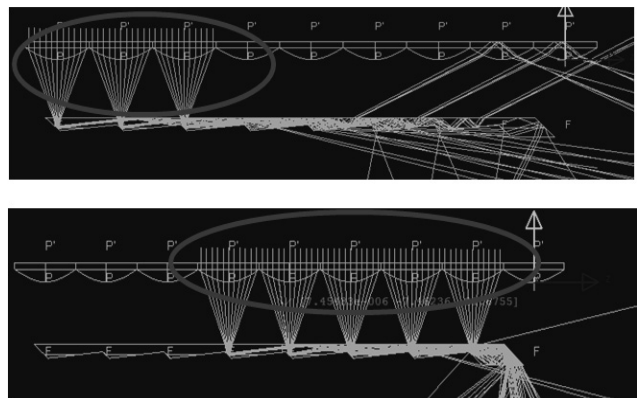


Fig. 13 Simulation result (n = 8)

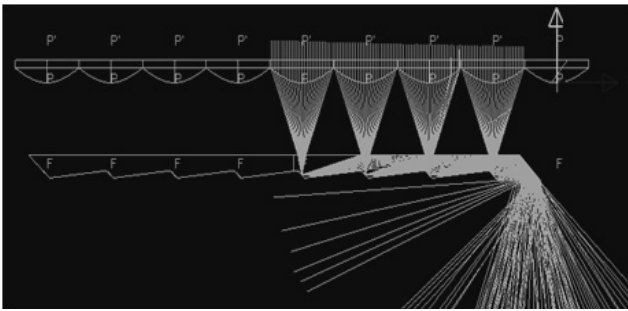


Fig. 14 Simulation result (n = 4)

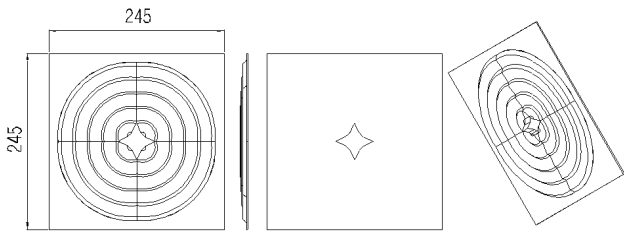


Fig. 15 Completely designed lens of concentrating optical system with a flat structure

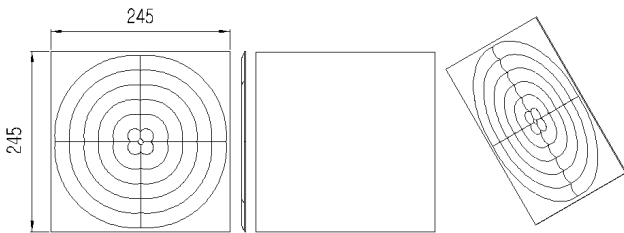


Fig. 16 Completely designed lens of light guide optical system with a flat structure

며, 그 결과가 Fig. 13에 나타나 있다.

(2) 170 mm 크기의 모듈용 광학계 시뮬레이션

Fig. 14는 모듈의 한 변의 길이를 170 mm로 정하고, 화합물반도체 셀의 크기를 5 mm x 5 mm로 변경하여 시뮬레이션을 수행하였다.

(3) 평판 구조의 집광형 태양광 모듈 광학계 설계도

위의 설계 및 시뮬레이션 과정을 거쳐 본 연구에서 제작하게 될 최종 평판 구조의 집광형 태양광 모듈 광학계의 설계 도면이 완성되었다. Fig. 15는 설계 완료된 평판 구조의 집광 광학계 설계 도면이며, Fig. 16은 설계 완료된 평판 구조의 도광 광학계 설계 도면이다.

3.2 태양전지 모듈 설계 및 제작

화합물반도체 태양전지 셀은 열 전도성 및 절연 특성이 우수한

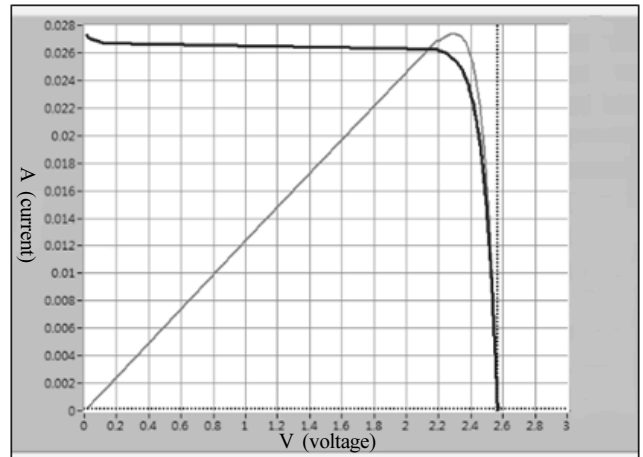


Fig. 17 Features of output made incidence of a receiver's two-fold concentrated solar energy

알루미늄 기판 위에 hybrid IC로 패키징 되어야 한다.

(1) 리시버(receiver) 광학 특성 평가

제작된 리시버는 기존의 Fresnel lens를 사용하여 태양광을 집광시켜 입사 시키므로 광전 변환 효율과 I-V 특성을 측정하였고 그 결과는 Fig. 17과 같다. 일사량계로 측정된 전일사량은 대략 950 W/m² 정도이나, 프레넬 렌즈에 의한 손실과 빛의 산란광 성분에 대한 명확한 데이터가 없어 실제 효율 값이 얼마인지는 알기 어려운 상황이다.

4. 평판구조의 집광형 태양광 모듈제작 및 평가

4.1 평판구조의 집광형 태양광 모듈 개발

4.1.1 태양전지 모듈 제작

제작 완료된 광학 부품과 솔라 셀 리시버를 조립하기 위하여 하

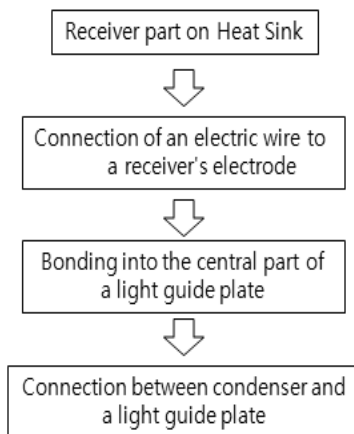


Fig. 18 Process of building a solar cell module



Fig. 19 Flat structure type concentrating module's front side picture



Fig. 20 Flat structure type concentrating module's rear picture

트 싱크와 프레임은 알루미늄으로 가공하였으며, 다음의 순서에 따라 모듈 시제품을 조립하였다. Fig. 18은 태양전지 모듈 제작 공정이다.

Fig. 19와 Fig. 20은 설계 도면에 의해 가공된 렌즈를 알루미늄 프레임을 이용하여 조립한 상태이며, 알루미늄 프레임은 머시닝 가공으로 제작되어 집광 및 도광렌즈의 정확한 반사특성을 유도하게 조립되었다.

4.1.2 모듈 특성 실험 분석

제작된 집광형 태양광 모듈의 특성 측정을 위해서는 태양광과 유사한 스펙트럼 분포를 갖으며, DNI (Direct Normal Irradiation) 값이 1 kW/m^2 의 에너지를 갖는 평행광원이 필요하다. 여기에서는 제작된 모듈을 태양광 아래에서 최대의 출력값이 얻어지도록 수동으로 정렬하여 그때의 전압 및 전류 값을 측정하였다.

제작된 광학계의 광 전파 특성을 알기 위하여 LED 광원을 사용하여 직경이 2 cm인 국소 광원을 만들고 이 국소 광원을 각각의 집광 렌즈 영역에 부분적으로 빛을 입사시키므로 위치에 따른 상대

Table 1 Results from the measurement of each position with the use of local light source

Item	Unit	1	2	3	4	5
Current	[mA]	0.92	1.00	0.78	0.83	1.38
Comparison	[%]	1	1.09	0.85	0.90	1.50

적인 빛의 전파 손실을 측정하여 보았다. 모듈의 가장자리부터 중심부로 2 cm 씩 이동하면서 측정한 다섯 곳의 집광 영역의 출력값과 이를 가장자리인 1번 위치의 값으로 표준화시킨 상대적인 값들이 다음의 Table 1에 나타나 있다.

5. 결론

본 연구에서는 집광형 태양광 발전소의 핵심 부품인 집광 모듈을 평판 광학구조로 변경하여 집광형 발전에서 가장 문제가 되고 있는 경제성을 개선하고 태양광 모듈의 가공 및 기초 특성 시험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

새로운 개념의 광학계를 적용한 집광형 태양광 모듈의 경우, 모듈의 두께를 5 cm 정도로 매우 얇게 만들 수 있다. 기존의 Fresnel lens 또는 반사경을 사용하여 500배 이상의 고집광을 이루는 집광형 모듈의 경우 단일 광학계에 의해 고집광으로 인하여 20% 이상의 많은 광손실을 감수할 수밖에 없지만, 본 집광은 10배 정도의 저배율 집광 광학계를 cascade로 연결하여 고배율을 달성하는 구조이므로 전체적인 광학계의 광손실을 획기적으로 줄일 수 있다.

또한, 본 연구에서 개발한 평판 구조의 집광형 태양광 모듈은 모듈의 구조가 평면형으로서 상부의 수직 집광 렌즈판과 하부의 수평 도광판 부분을 정밀 조립 과정 없이 단순히 접합시키기만 하면 된다. 따라서 매우 간단히 자동화시킬 수 있으며, 이는 대량 생산에 적합한 또 하나의 커다란 장점이 된다.

References

- [1] Hong, G. J., 2010, Concentrated Solar Power Trends, The Proceedings of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, 24:6 41-46.
- [2] Yun, G. H., 2004, Solar Cell Technology Development Trend Reports, The Magazine of the Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, 33:10 23-29.
- [3] Han, Y. S., Kim, H. S., Choi, B. S., Oh, D. G., 2007, The Next Generation of High-efficiency Solar Cells Technology Trends, Electronics and Telecommunications Trends, 22:5 86-94.
- [4] Spectrolab website, n.d. <<http://www.spectrolab.com>>.
- [5] Green Rhino Energy website, n.d. <<http://www.greenrhinoenergy.com>>.
- [6] Newport website, n.d. <<http://www.newport.com>>.