

수목형상에 따른 태양전지 모듈의 배열 연구

김기현*, 윤 린**

“한밭대학교 기계공학과”

Study on the tree-mimic array of solar cell modules

Kim, Ki-Hyun* Yun Rin**

Department of Mechanical Engineering, Hanbat University, Daejeon 305-719, Korea

Abstract

This study is about the installation of the solar cell modules. The solar cell modules are built by the tree-mimic structure, and the performance is compared with that of the flat-plate type solar cell module installation. The mathematical tree model, which was suggested by Fisher and Honda, is utilized to determine the location of the solar cell modules for the tree-mimic type. The experiment shows that the generated electric power of the flat-plate type is higher than that of the tree-mimic type by 30% for one month of July. This lower performance for the tree-mimic type comes from the shading effects among the solar cell modules. The theoretical calculation for the absorbed solar radiation on the two types of solar cell installation shows that the tree-mimic type is higher than the flat-plate type by 8.5%. The shading area for the tree-mimic model is calculated with time by using the 3D-CAD, which will be utilized for the optimization of the tree-mimic model in the future.

Keywords : Solar cell module, Nature-mimic(자연모사), Tree-mimic(수목형상), Shading(그림자), 3D CAD(삼차원 캐드)

기 호 설 명

a:	Altitude of sun [Rad]	m:	Number of branch complexes in a tier
a_s :	The normal to an inclined slope in terms of its altitude angle for slope [Rad]	uQa :	Amount of radiation absorbed by the upper surface of a tilted plate [W/m^2]
u_a :	Short wave absorptance [-]	R_a :	Longwave thermal radiation from clear skies [W/m^2]
N :	Order of branching	R_g :	Longwave radiation from ground [W/m^2]
n:	Number of branch tier	R_0 :	Ratio of adjacent segments of the erect leader axis

투고일자: 2011년 9월 7일, 심사일자: 2011년 9월 7일, 게재확정일자: 2011년 12월 12일
교신저자: 윤린(yunrin@hanbat.ac.kr)

R_B : Ratio of the length of the first branch unit of the complex to the subtending segment of the leader axis
 $Scos_{0i}$: Direct solar radiation [W/m^2]
 z : Zenith angle [rad]
 a_s : The normal to an inclined slope in terms its azimuth angle for slope [rad]
 α : Azimuth angle [rad]
 ϕ : Altitude of the observer [rad]
 θ : Slope angle [rad]
 θ_{0i} : Angle between the leader axis and the first unit of the branch complex [rad]

Subscript

d : Radiation amount by diffusion or scattering
 h : Hour angle, horizontal

1. 서 론

현재 국내를 포함한 전 세계는 에너지수요의 증가에 따라 에너지자원의 확보와 지구온난화와 같은 환경변화를 최소화하는데 많은 노력을 기울이고 있고, 이에 대한 대책으로 신재생에너지의 개발과 활용에 적극 투자하고 있다. 특히, 근래 들어 신재생에너지 중 태양광 발전이 급성장을 보이고 있다. 보통 태양광 연구는 크게 재료적인 측면에서 태양전지에 대한 연구와 응용적인 측면에서 전력변환에 대한 연구가 진행되고 있다. 선진국의 경우를 살펴볼 때 태양전지 효율을 15%에서 2030년까지 22 ~ 25%로 효율을 올리고, 이 같은 효율향상을 바탕으로 1800 ~ 2520 cent/kWh의 전력생산단가를 504 ~ 864 cent/kWh로 낮추겠다는 계획을 수립하고 있다. 이와 같이 지속적으로 발전효율을 향상시키는 목표와 함께, 태양광발전의 경우 비교적 많은 설치면적을 필요로 하기 때문에 효율적인 태양광 모듈의 설치에 대한 연구도 함께 진행되어야 할 것이다. 향후 태양광 발전 규모가 신재생에너지의 전력생산량 중 1/3을 담당

한다고 산출한다면 150,000 mile² 정도의 공간이 필요하다고 밝히고 있다[1]. 이에 따라 태양광 모듈의 설치면적을 가급적 최소화하면서 동일한 발전효율을 가질 수 있는 설치 방법에 대한 연구는 반드시 필요하다고 할 수 있다.

이에 본 연구는 열악한 자연환경과 최소한의 부지조건 속에서도 태양빛을 가장 잘 받도록 진화한 식물(나무)의 모사를 통해 태양전지 모듈의 설치방법을 제안하고자한다. 기존 평판형 태양전지모듈의 설치 방법은 태양 전지면에 받은 일사량에 따라 발전량이 변하기 때문에 태양 전지면이 태양광에 최대한 직각이 되도록 설치하는 방법을 취하고 있다. 일반적으로 10 ~ 40도 설치하며 이 사이의 경우 큰 차이가 없다. 본 수목형상의 경우 Fisher와 Honda의[2] 수목모델의 형상을 따르고 있다. Fisher 와 Honda의 연구에 따르면 열대식물인 T. catappa 경우 가장 최적화된 태양빛을 받기 위해 일정한 비에 따라서 나무의 형태가 진화되었고, 이들은 수목형상에 대해 수학적 모델링을 수행하였다. 본 연구에서는 Fisher 와 Honda가 제시한 수목의 수학적 모델을 바탕으로 태양전지 모듈을 설치하였고 태양광 발전량을 평판형 설치와 비교실험을 수행하였다. 이론적인 연구로는 본 수목형상 태양전지 설치 시 모듈들 간의 그림자 효과(shading effect)가 없다고 가정할 때 평판형 배열과의 태양복사량에 대한 비교와 3차원 CAD프로그램을 활용하여 실제 수목형상 태양전지에 발생하는 그림자의 양을 산출하였다. 향후 이들 방법을 이용하여 태양광 발전량을 최대화할 수 있는 배열을 찾아내는데 활용될 것이다.

2. 수목 모사 형상 결정

Fisher 와 Honda의 논문에 따르면, 열대수목의 경우 각 나무줄기는 일정한 간격 비를 형성하고 있다. 나무 기둥의 가장 윗부분을 T_0 라고 하고 가지가 처음으로 뻗어 나오는 부분을 T_1 ,

두 번째로 뺀어 나오는 부분을 T_2 라고 할 때 식 (1)로 정의 된다. 또한, 나무의 둘레로 뺀어 나온 가지의 길이는 식 (2)로 정의 된다. 나무줄기는 층을 이루어 가지를 뺀다. 주로 3 ~ 5층 정도 생성되는데, 위에서부터 $i = 1, 2, \dots, n$ 이 렇게 순서를 부여할 때, 줄기와 줄기에서 뺀어지는 가지의 각도는 식 (3)을 통해 구할 수 있다.

$$R_0 = T_0 T_1 / T_1 T_2 = T_1 T_2 / T_2 T_3 \quad (1)$$

$$= \dots T_{n-1} T_n / T_n T_{n+1} = const$$

$$R_B = T_1 P_{1j} / T_1 T_2 = T_2 P_{2j} / T_2 T_3 \quad (2)$$

$$= T_n P_{nj} / T_{n+1} T_{n+2} = const$$

$$\theta_{0i} = 14.7i + 34.9 \quad (i \leq 4) \quad (3)$$

$$\theta_{0i} = 93.7 \quad (i > 4)$$

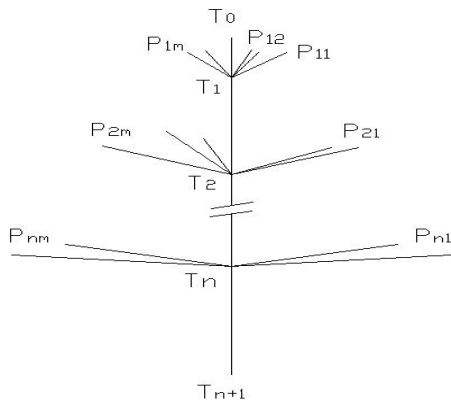


Fig. 1. Leader axis(trunk): T_0 and T_{n+1} , apex and base of leader

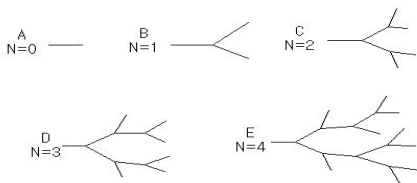


Fig. 2. Lateral branch patterns in xy plane with different orders of bifurcation (N) as indicated.

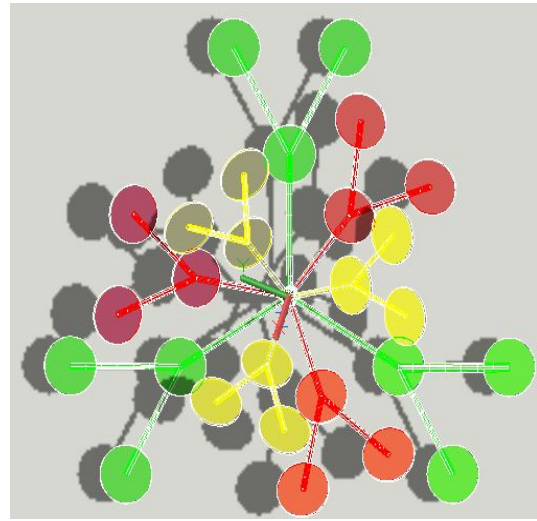


Fig. 3. Leaf surface area of a whole in xy plane with $N=5$; leaf area approximated by a circle of radius.

Fisher와 Honda가 제시한 R_0, R_B 값을 사용하여 Fig. 3은 $R_0 = 0.82, R_B = 0.66, n, m, N$ 이 각각 3, 3, 2 일 때를 기준으로 수목을 3차원 CAD를 활용하여 나타낸 것이다. 본 수목모델은 3층으로 구성되어 식 (3)에서 제시한 값에 따라 θ_{0i} 는 위 층부터 49.6, 64.3, 79도로 설정하였다. 나뭇잎은 가지에 달리는 영역을 나타낸 것인데 각층의 가장 마지막으로 뺀 가지의 0.8배의 지름을 가지는 원면적 안에 나뭇잎영역을 형성하였다.

3. 실험장치 및 방법

수목의 수학적 모델을 내용을 토대로 태양 전지 모듈을 제작하였다. 본 태양전지 모듈의 제작을 위해 사용된 태양전지 하나의 용량은 1.5V, 240mA이다. $n=3, m=3, N=2$ 의 형상으로 하였고 나뭇잎의 모사를 위해 태양전지 단위모듈이 원형이 아닌 관계로 동일한 사각형의 형태로 면적을 계산하여 설치하였다. 태양전지 모듈은 가지가 뺀 방향과 평행하게 설치하였고 가지 이음부에 각각 설치

하였다. Fig. 4는 완성된 수목형상 태양전지 모듈의 사진을 나타낸다.



Fig. 4. Photograph for the tree-mimic installation of the solar cell modules.

Fig. 5는 실험장치도를 나타낸다. 건물 옥상에 그들이 지지 않는 장소를 택해 동일한 사양의 태양전지 모듈을 각각 108개 부착한 기존 평판형 태양광 시스템과 수목형상 태양전지 모듈을 수 일간 생산전력량을 비교 측정하였다. 평판형의 경우 하절기 시 바닥과 51도의 경사각도로 설치하였다. 각 태양전지에 조사되는 태양복사에너지는 솔라미터로 측정하였고 생산된 전력은 파워미터로 측정하였다. 이에 대한 계측기 사양은 Table 1과 같다. 전력측정을 위해서는 본 측정 회로에 부하를



Fig. 5. Experiment diagram.

Table. 1. Specification of the solar meter and power meter.

	Solar meter	Power meter
Measurement range	0 - 2000 W/m^2	600V, 20A
Resolution	0.1 W/m^2	N/A
Accuracy	$\pm 10 W/m^2, \pm 5\%$	0.1% of reading

주어야 하는데 본 측정에서는 각각 태양전지의 출력 특성이 부하에 따라 달라지기 때문에 최적의 전압과 전류를 찾기 위해서 부하를 133.3 Ω 에서 몇 1000 Ω 으로 바꾸어가며 전력을 측정하였다. 실험결과 330 Ω 일 때 가장 높은 효율이 나타났다.

4. 수목형상 태양전지 배열과 평판형 배열 비교

본 실험 장치를 통해 측정한 실험결과를 Table 2에 나타냈고, 하루 중 태양복사에너지 및 전력생산량의 변화를 Fig. 6과 Fig. 7에 나타냈다. 각 그래프와 Table 2에 나타낸 바와 같이 비교적 맑은 날의 경우에는 평판형이 수목형상형에 비해 매우 높은 성능을 나타냈고, 흐린 날(overcast)의 경우에는 동등한 수준이거나 그 차이가 크지 않은 결과를 나타냈다. 7월 한 달 동안의 측정결과를 볼 때 평판형 배열이 수목형상배열에 비해 평균 30%정도 높은 전력생산을 나타냈다. 수목형상 태양전지 배열이 보다 작은 전력을 생산하는 원인으로서는 각 태양전지의 설치 방위와 평면과 이루는 각도가 서로 다른 점과, 태양전지 모듈 및 기둥에 의한 그림자가 다른 태양전지 모듈에 영향을 주기 때문이다. 이에 대한 정확한 분석을 위해 평판에 비치는 태양복사에너지 모델과 그림자(shading) 모델링을 활용하여 그 원인을 분석하였다.

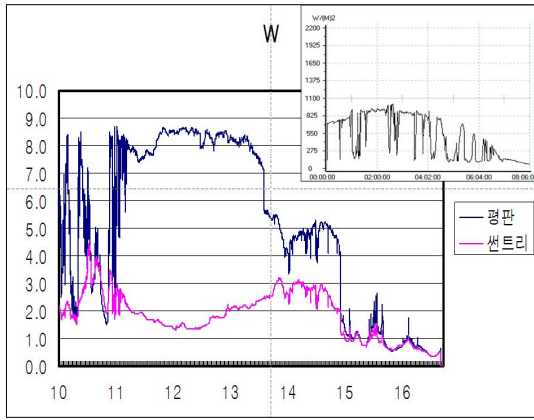


Fig. 6. Comparison of the electric power between the plate type and tree-mimic type solar cell installation with the solar radiation amount. (22th June.)

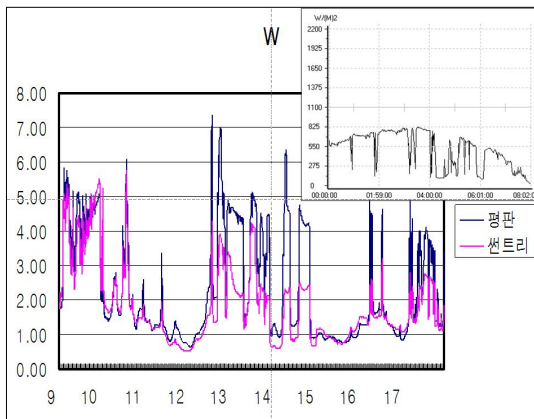


Fig. 7. Comparison of the electric power between the plate type and tree-mimic type solar cell installation with the solar radiation amount. (29th July.)

Table. 2. Comparison of the electric power generation between the tree-mimic and the flat plate model.

(Average solar radiation) (w/m^2)	Resistance	Plate type(W)	Tree-mimic type(W)
505.5	330 Ω	4.97	1.84
408.8		4.67	1.2
496.7		2.23	1.0
500.3		1.61	1.14
513.1		2.33	1.9

5. 태양전지 내 태양복사에너지 양 계산

평판형과 수목형상형에 주어지는 태양복사량을 경사진 면에서의 태양복사에너지 산출 방법[3]을 사용하여 계산하였다. 이에 대한 주요 계산 방법으로는 아래의 식들(식(4) - 식(8))과 같다.

$$uQa = a_1 [S \cos i + (\pi - \theta) / \pi R_d + \theta / \pi r (S +_h d)] + a_4 ((\pi - \theta) / \pi R_a + \theta / \pi R_g) \quad (4)$$

$$\cos i = \cos a_s * \cos a * \cos(\alpha - \alpha_s) + \sin a_s * \sin a \quad (5)$$

$${}_h S_0 = \bar{S}_o \left(\frac{\bar{d}}{d} \right)^2 \cos z \quad (6)$$

$$\tau^m = S / S_o = {}_h S / {}_h S_0 \quad (7)$$

$$Rg = \sigma * T^4 \quad (8)$$

Fig. 8은 수목형상 태양전지 배열에서 특정 태양전지 모듈의 시간에 따른 방위각(azimuth angle)과 태양복사량을 나타낸다. 정오에 가장 높은 태양복사에너지와 방위각을 나타내고 있다.

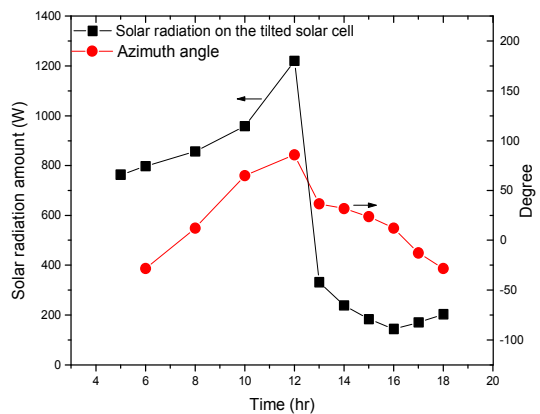


Fig. 8. Variation of the Azimuth angle and the Solar radiation on the tilted solar cell with time.

Fig. 9는 특정한 날 (6월 22일) 수목형상 태양전지 전체에 대한 태양복사에너지 및 경사각을 태양전지 배열에 따라 나타냈다. x축의 1 - 9번까지는 맨 하층, 10 - 18번까지는 중간 층, 19 - 27번까지는 수목형상 중 상층부를 나타낸다. 태양복사에너지는 각 층별 위치에 따라 큰 차이를 나타내지 않고 있음을 볼 수 있다. Table 3은 평판형과 수목형상 태양전지 모듈에 조사되는 태양에너지양을 나타낸다. 수목형상 모델이 평판형 모델에 비해 8.5% 높게 나타났다.

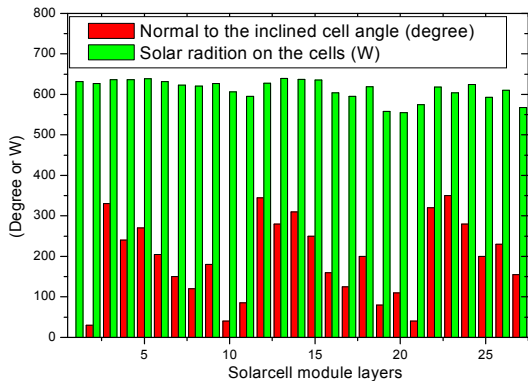


Fig. 9. Solar radiation on the total cells and alpha(s) with solar cell module layers for specific day.

Table. 3. Comparison of the amount of solar radiation between the plate type and tree-mimic type solar cell installation (W).

day	June 22th	June 23rd	July 20th	July 27th
Plate type	242.9 W	242.9 W	240.7 W	247.6 W
Tree-mimic type	264.1 W	264.1 W	259.9 W	268.6 W

6. 그림자(Shadow) 모델 적용 수목형상 태양전지배열의 태양 복사량 계산

Table 3에 나타난 바와 같이 이론적으로 흡수하는 태양복사에너지는 수목형상모델이 높게 나타났다. 그러나 실제 실험결과에서 보

인 바와 같이 평판형에 비해서 수목형상형이 매우 낮게 나타나는데 이에 대한 주원인은 태양전지 및 기둥에 의한 그림자(shading 현상)가 태양전지의 일부를 가리는 현상이 나타나기 때문이다. 일반적으로 이와 같은 그림자현상은 식물연구에 있어서 빛의 방향을 쫓아가면서 빛이 다른 면에 의해서 가려지는 지 혹은 가려지지 않은지를 판단하여 그림자의 발생하는지 유무를 판단하는Ray-tracing 모델을 적용하여 연구한다.[4] 이에 대해 본 연구에서는 3차원 CAD 프로그램을 활용하여 태양전지들 간의 간섭을 통한 그림자 가림량을 계산하고자 한다. Ray-tracing 모델을 통한 그림자량의 계산은 각 태양전지에 대한 정확한 수학적 표현이 가능한 경우에는 계산의 신속성 및 정확성으로 인해, 본 연구에서 제시한 3-D모델링을 활용한 그림자량의 계산보다 신속하게 처리할 수 있다. 그러나 실제적으로 각 태양전지에 대한 수직벡터 (normal vector)와 이를 바탕으로 한 평면의 방정식을 찾아내는 것은 많은 작업을 요구하고 실제 태양전지 위치 최적화를 위해서는 이들의 위치를 바꾸어서 계산해봐야 한다는 점을 고려할 때 그 복잡성이 매우 크다고 할 수 있다. 이와 같은 측면에서 CAD 프로그램을 활용하는 경우에는 다음의 두 가지 점에서 큰 장점을 제공한다.

- ① CAD 프로그램을 이용한 형상설계로부터 각 형상의 정보를 역으로 추출하여 평면의 방정식을 작성할 수 있다.
- ② CAD 프로그램에서 제시하는 그림자모델(shading model)로부터 직접적으로 그림자가 생기는 면적을 산출 할 수 있다.

7. 3D-CAD 프로그램을 활용한 shadow 모델

Fig. 10는 CAD프로그램을 활용하여 본 수목형상 태양전지배열을 모델링한 형상이다. Fig. 11은 특정한 날 즉 8월 02일 기준으로 오전

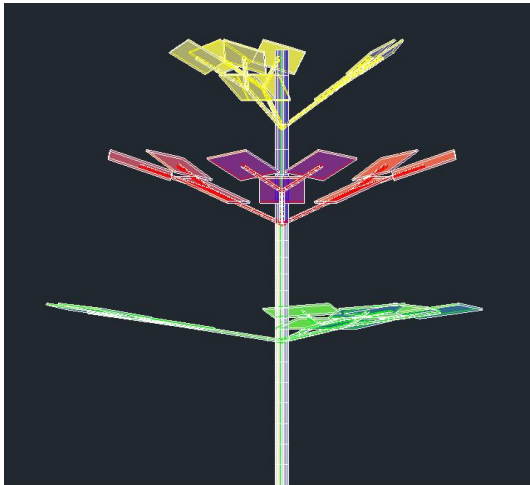


Fig. 10. Front-view of the three-mimic 3D model

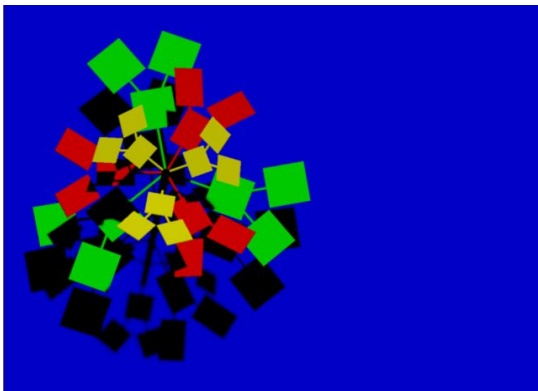


Fig. 11. Shape of shading on 1PM Aug. 2nd 2010.

Table. 4. Shading area(%) with day and hour

day/hr	1/ 17	2/ 20	3/ 20	4/ 15	5/ 17	6/ 22	7/ 29
8 hr	0	0	0	18.1	17.5	24.6	17.5
9 hr	0	19.3	18.6	9.2	2.9	2.6	2.5
10 hr	8.8	20.6	12.1	8.8	12.6	12.3	10.5
11 hr	9.8	11.7	13.1	6.1	13.1	10.2	13.1
12 hr	11.8	13.1	10.2	8.5	11.4	11.7	10.5
13 hr	8.8	6.8	7.6	8.8	11.7	10.1	10.1
14 hr	24.6	2.6	5.7	11.7	12.6	11.4	8.2
15 hr	24.6	19.1	15.8	7.6	2.6	5.3	6.1
16 hr	0	18.4	20.0	9.6	13.5	12.3	10.8
17 hr	0	0	0	20.5	9.5	12.0	9.6

9시부터 2시간 간격으로 오후 5시까지 태양광 그림자 모델을 적용하여 렌더링한 후 캡처 화면으로 나타낸 그림이다. 그림에서 확인 할 수 있는 바와 같이 그림자가 발생하는 부분의 면적을 산출하여 본 태양전지 배열 형상에 어느 정도의 효율 절감이 발생했는지를 확인해 볼 수 있다. Table 4는 솔라셀 전체면적 대비 그림자가 발생하는 면적 비를 1월부터 7월 까지 특정한 날에 계산한 값을 나타낸다. (단, 솔라셀 총 면적은 4275cm^2) 계절에 따른 차이가 있지만 그림자 효과는 태양의 고도가 낮은 아침과 저녁 시간에 크고 12시부터 2시까지는 그림자 현상이 상대적으로 작음을 볼 수 있다. 이를 통해 향후 수목형상 태양전지 배열의 그림자량을 최소화하는 배열을 찾는 데 활용될 것으로 예상된다.

8. 결 론

수목형상 태양전지의 배열에 대한 실험 및 이론적 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 7월 한 달 동안의 전력생산량을 비교할 때 평판형 배열이 수목형상 배열에 비해 30% 높게 나타났다. 특히, 맑은 날 태양광의 산란보다는 직사광선이 강한 때에는 평판형이 수목형상형에 비해 생산전력이 크게 나타났다. 그러나 직사광선이 약한 구름 낀 날이나 아침 및 저녁시간 에는 동등 수준의 생산전력을 얻을 수 있었다.
- (2) 수목형상형 배열의 모듈 간 Shading효과를 고려하지 않을 때, 수목형상형의 배열에 도달하는 복사에너지량은 평판형 배열에 비해 8.5% 더 높게 나타났다.
- (3) 3D CAD를 활용하여 수목형상 태양전지 모듈 배열의 Shading양을 계산할 수 있었으며 shading 효과는 태양의 고도가 낮은 아침과 저녁 시간에 크고 12시부터 2시까지는 shading현상이 상대적으로 작음을 볼 수 있었다.

후 기

본 논문은 2009년도 한밭대학교 교내 학술 연구비의 지원을 받았음. 수목형상 태양전지 모듈의 제작과 시험에 참여한 한밭대학교 열 시스템연구실 모든 연구원에게 감사합니다.

References

1. Wright. J., Conca. J., The Geo-Politics of Energy, North Charleston, SC, Booksurge Pub., 2007.
2. Fisher J.B., Honda.H., Computer Simulation of Branching Pattern and Geometry in Terminalia (combretaceae), a Tropical Tree, Botanical Gazette, Vol. 138, No. 4, 1977.
3. Gates D.M., Biophysical Ecology, Dover Publications, INC. Mineola, 1980, New York.
4. Obara S., Tanno I., Shiratori T., Study on the Light Receiving Characteristics of a Compact Solar Power Generation System with a Plant Shoot Shape, The Seventh JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, Sapporo, Japan, 2008.