

반자동 태양광 발전시스템의 설계 및 실험에 관한 연구

김우송*, 정태용*, 신동훈*, 남진현*

국민대학교 대학원 기계공학과, *국민대학교 기계자동차공학부

A Study on the Design and Experiment of Semi-Automatic PV Generation System

Woosong Kim, Tae-Yong Chung*, Donghoon Shin*, Jin Hyun Nam*

Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University

1. 서론

태양광 발전시스템은 발전 용량을 극대화하기 위해 태양의 궤도인 자오선 방향을 따라가는 방식에 따라 완전추적형, 반추적형, 고정형 태양전지 설비로 나뉜다. 추적형 태양전지는 태양자오선 정보에 의한 위치정보 프로그래밍 시스템과 광센서 자동추적 시스템으로 구분되어 상업화 되고 있다. 반추적형 태양전지는 태양전지 경사각을 계절 또는 월별로 따라서 상하로 위치를 변화시켜주는 방식으로 일반적으로 사계절에 한 번씩 경사각을 변화시키는 반고정형 시스템 방식이다. 고정형 태양전지 설비는 가장 값싸고 안정된 구조로써 비교적 원격 지역에 설치면적의 제약이 없는 곳에 많이 이용되고 있고, 특히 도서지역 등 풍속이 강한 곳에 설치하는 것이 보통이다. 완전추적형, 반추적형에 비하여 발전효율은 낮은 반면에 초기 설치비가 적게 들고 보수 관리에 드는 추가적인 경비가 없어서 상대적으로 많이 이용되는 방법이다.⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾

위에서 살펴본 태양 발전 시스템의 세 가지 방식에서 상대적으로 효율이 높은 완전추적형 태양전지 설비의 장점인 고효율 발전과 고정형 시스템의 이점인 단순성과 안정성을 결합한 반자동형 태양전지 설비의 개발을 목표로 하였다. 본 연구를 통해 보다 효율적인 태양광시스템의 설계에 대한 기본 자료를 획득할 수 있으리라 사료된다.

2. 시뮬레이션 및 실험

2-1. 시뮬레이션

태양광 발전시스템에 있어서 태양을 향하는 태양전지 모듈의 방향은 발전효율과 직결되는 매우 중요한 요소이다. 태양광 입사면적 효율은 Fig. 1에서 고도와 방위각의 함수로 나타낸 태양의 위치벡터와 Fig. 2에서 경사각과 방위각의 함수로 표현된 태양전지 모듈의 법선방향 벡터에 의해 설명된다.

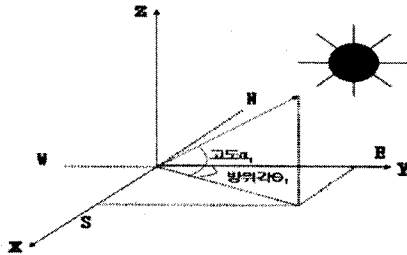


Fig. 1 태양의 고도와 방위각

$$\theta_1 = \text{방위각} - 90^\circ$$

$$\alpha_1 = \text{고도}$$

$$\vec{S} = \text{태양의 위치 단위벡터} (s_1, s_2, s_3)$$

$$s_1 = \cos \alpha_1 \cdot \sin \theta_1$$

$$s_2 = \cos \alpha_1 \cdot \cos \theta_1$$

$$s_3 = \sin \alpha_1$$

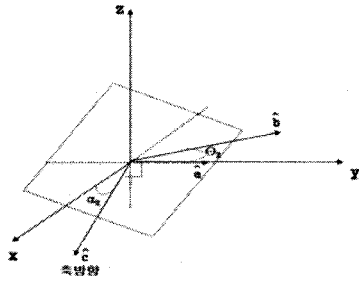


Fig. 2 태양전지모듈의 법선벡터

- θ_2 = 스텝모터에 구동에 의한 회전각도
- α_2 = 태양전지 모듈 축과 지평면의 경사각도
- \vec{B} = 태양전지 모듈의 법선 단위벡터(b_1, b_2, b_3)
- $b_1 = \sin\alpha_2 \cdot \sin\theta_2$
- $b_2 = \cos\theta_2$
- $b_3 = \sin\theta_2 \cdot \cos\alpha_2$

즉, 태양광 발전시스템의 태양광 입사면적 효율(η)은 태양의 위치벡터 \vec{S} 와 모듈의 법선벡터 \vec{B} 의 내적($\cos\phi$)으로 다음과 같이 정의된다.

$$\eta = \cos(\phi) = \cos\alpha_1 \cdot \sin\theta_1 \cdot \sin\alpha_2 \cdot \sin\theta_2 + \cos\alpha_1 \cdot \cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2 + \sin\alpha_1 \cdot \sin\theta_2 \cdot \cos\alpha_2 \quad (1)$$

2-1-1. 시뮬레이션 조건

본 시뮬레이션에서는 추적형 태양광 발전시스템의 입사면적 효율을 100%로 가정하였다. 고정형과 반자동형 시스템의 입사면적 효율은 식 (1)과 2006년의 태양의 방위각과 고도 데이터⁽⁴⁾를 이용하면 구할 수 있다. 연중 입사면적 효율의 변화를 관찰하기 위하여 2006년 각 달의 1일과 15일에 대하여 계산하였다.

2-2. 실험

2-2-1. 실험장치

위의 시뮬레이션의 결과를 토대로 설계된 15W급 반자동형 태양광 발전시스템의 구상도를 Fig. 3에 그리고 실제 제작된 모습을 Fig. 4에 나타내었다. 설계된 시스템에서는 태양전지 모듈의 방위각은 태양의 위치를 자동으로 추적하도록 12시간 동안 180도를 회전하며, 모듈의 고도는 계절에 따라 수동으로 조절가능하다. Fig. 3의 (가)부분은 태양의 방위각을 쫓기 위해 스텝모터를 이용한 구동부이고, (나)부분은 제어 및 전기장치를 보호하기 위해 제작된 컨트롤박스를 나타내며, 마지막으로 (다)부분은 계절별로 태양전지 모듈의 고도를 조절하는 수동 조절부이다.

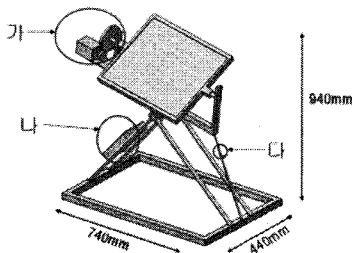


Fig. 3 구상도

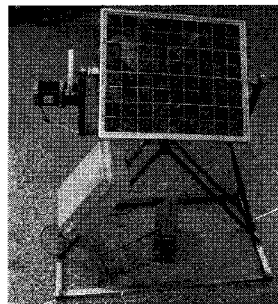


Fig. 4 실제 시스템

2-2-2. 실험 장소

실험위치는 태양전지 모듈이 그림자로 인하여 간섭받지 않고 태양광을 잘 받아들일 수 있도록 주위의 장애물로부터 충분히 떨어진 장소로 선정하였다. 따라서 실험은 국민대학교 내 공과대학건물(37° 36' 44"N, 126° 59' 39"E)의 옥상에서 수행되었다.

2-2-3. 실험 방법

전체 시스템을 정남향으로 고정시킨 후 태양전지 모듈을 태양광을 따라 동쪽에서 서쪽으로 움직이도록 하여 실험을 수행하였다. 약 75° 근방인 여름철 태양의 남중고도를 고려하여 최대의 일사량을 받을 수 있도록 태양전지 모듈을 지면과 15°의 경사각으로 고정하였다.⁽³⁾

3. 결과 및 고찰

3-1 시뮬레이션 결과

위의 이론을 바탕으로 완전추적형 태양광 발전장치의 효율을 100%로 가정하여, 월별, 계절별 반자동형 및 고정형 태양광 발전장치의 성능을 시뮬레이션을 하였다.

Table 1 각 시스템 별 입사면적 효율

	월별로 조절		계절별로 조절		고정형(15도)	고정형(30도)	고정형(45도)
	수평면과의 각도(deg.)	입사면적 효율(%)	수평면과의 각도(deg.)	입사면적 효율(%)	입사면적 효율(%)	입사면적 효율(%)	입사면적 효율(%)
2006-01-01	60	99.56	45	95.74	60.23	75.61	67.15
2006-01-15	56	99.37	45	96.42	63.21	77.97	64.19
2006-02-01	54	99.14	45	97.64	64.9	77.93	58.81
2006-02-14	50	99.23	45	98.72	73.69	85.44	46.08
2006-03-01	45	99.41	30	96.43	71.74	80.75	74.26
2006-03-15	39	99.59	30	98.47	74.44	81.00	71.53
2006-04-01	33	99.73	30	99.73	62.48	64.90	63.24
2006-04-15	28	99.72	30	99.59	75.61	76.45	49.53
2006-05-01	22	99.53	30	98.57	77.28	75.76	59.18
2006-05-15	19	99.30	30	97.32	79.25	76.11	55.96
2006-06-01	15	98.83	15	98.85	76.48	71.71	56.10
2006-06-15	14	98.99	15	98.92	81.66	76.64	53.71
2006-07-01	14	98.84	15	98.78	81.54	76.52	48.47
2006-07-15	16	98.45	15	98.49	68.54	63.26	71.85
2006-08-01	19	99.11	15	99.12	80.66	77.93	46.21
2006-08-15	23	99.30	15	99.2	69.94	68.33	65.60
2006-09-01	29	99.76	45	96.82	75.23	76.74	63.60
2006-09-15	34	99.95	45	98.61	78.44	82.68	68.80
2006-10-01	41	99.99	45	99.82	75.00	82.02	70.38
2006-10-15	46	99.94	45	99.90	71.42	80.77	55.48
2006-11-01	52	99.84	45	98.99	67.21	89.09	56.27
2006-11-15	56	99.64	45	97.65	59.11	72.31	37.21
2006-12-01	59	99.63	45	96.36	58.36	73.04	44.19
2006-12-15	61	99.88	45	95.92	63.26	78.97	75.30

Table 1에서 고정형에 비해 반자동형 태양광 발전장치의 입사면적 효율이 월등히 뛰어난 것을 확인할 수 있다. 또한 태양전지 모듈과 지표면과의 경사각을 15°, 30°, 45°씩 변화시키는 것은 각 시스템의 입사면적 효율에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다. 위의 Table 1의 시뮬레이션 결과를 그래프로 나타낸 아래의 Fig. 5를 통해 반자동형의 효율성을 보다 쉽게 이해할 수 있다.

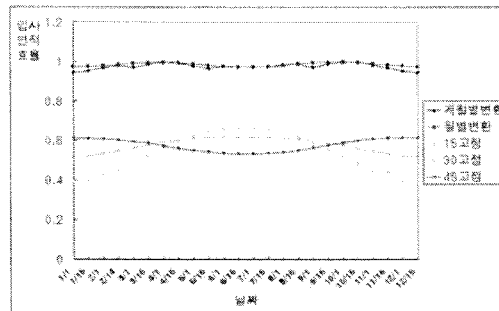


Fig. 5 각 시스템에 따른 입사면적 효율

태양광 입사면적 효율의 하루 중 시간에 따른 변화를 겨울, 봄, 여름의 각 계절에 관하여 아래의 Fig. 6, 7, 8에서와 같이 나타내었다. 그림에서 고정형 시스템보다는 계절별로 또는 월별로 경사각을 조절하는 반자동형 시스템이 더 효율적임을 확인할 수 있다.

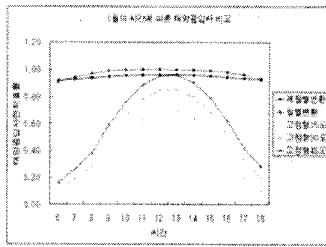


Fig. 6 1월의 입사면적 효율

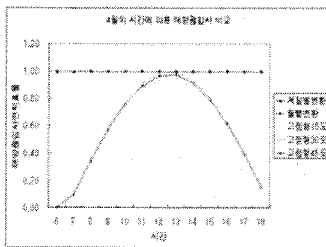


Fig. 7 4월의 입사면적 효율

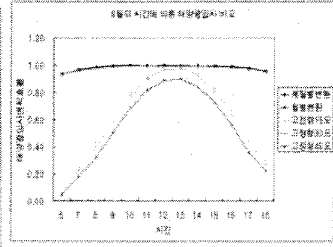


Fig. 8 8월의 입사면적 효율

또한 태양광 발전시스템은 태양의 일사량에 따라서 그 발생 전력이 크게 변한다. 따라서 본 시스템을 실험하기 전에 이론적으로 생산할 수 있는 예상 전력을 계산하였다. 먼저 기상청에서 수집한 2006년 1년 동안의 서울시의 일사량 자료⁽⁵⁾를 이용하여 태양전지 모듈의 예상 전력으로 변환하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

Table 2 2006년 서울시 월, 시간별 평균 일사량(4)

	6시	7시	8시	9시	10시	10시	12시	13시	14시	15시	16시	17시	18시	19시	20시
1월			0.00	12.55	51.77	90.77	121.29	135.65	127.65	102.97	66.52	23.74	1.26		
2월			1.75	31.32	79.21	117.71	157.11	169.71	176.11	148.14	107.57	59.39	12.39	0.00	
3월		0.23	17.45	64.74	120.06	166.94	206.48	219.77	209.68	179.00	125.90	77.71	28.45	1.06	
4월	0.00	4.47	30.33	66.03	114.07	152.07	180.00	190.63	182.23	158.73	125.93	97.50	47.67	7.70	0.00
5월	0.29	18.45	60.23	113.32	160.26	196.87	217.81	223.74	220.42	191.42	152.06	111.29	62.13	18.39	0.26
6월	1.00	19.77	53.83	94.47	136.30	170.20	183.97	199.57	201.57	169.33	136.53	109.57	62.97	23.00	2.07
7월	0.10	6.32	25.71	48.48	61.39	84.10	96.81	108.32	111.06	91.16	74.84	63.23	31.32	12.68	1.10
8월	0.00	10.48	49.42	97.39	146.74	172.74	194.71	206.29	185.35	165.55	138.52	109.77	63.55	19.61	0.29
9월		3.43	38.70	91.07	143.67	193.17	208.97	209.03	186.47	168.50	126.00	77.90	31.53	2.40	
10월		0.00	16.06	61.71	106.68	141.26	159.58	173.77	163.81	137.39	95.87	45.13	6.77		
11월			3.07	30.97	68.60	102.23	127.03	138.10	119.90	97.80	61.80	19.17	0.97		
12월			0.10	15.03	53.13	91.42	110.90	121.55	113.35	86.61	52.71	12.94	0.00		

단위 : 0.01MJ/m² · hr

Table 3 실험에 사용한 태양전지모듈의 예상 생산 전력

	6시	7시	8시	9시	10시	10시	12시	13시	14시	15시	16시	17시	18시	19시	20시
1월			0.00	0.49	2.01	3.53	4.72	5.28	4.96	4.00	2.59	0.92	0.05		
2월			0.07	1.22	3.08	4.58	6.11	6.60	6.85	5.76	4.18	2.31	0.48	0.00	
3월		0.01	0.68	2.52	4.67	6.49	8.03	8.55	8.15	6.96	4.90	3.02	1.11	0.04	
4월	0.00	0.17	1.18	2.57	4.44	5.91	7.00	7.41	7.09	6.17	4.90	3.79	1.85	0.30	0.00
5월	0.01	0.72	2.34	4.41	6.23	7.66	8.47	8.70	8.57	7.44	5.91	4.33	2.42	0.72	0.01
6월	0.04	0.77	2.09	3.67	5.30	6.62	7.15	7.76	7.84	6.59	5.31	4.26	2.45	0.89	0.08
7월	0.00	0.25	1.00	1.89	2.39	3.27	3.76	4.21	4.32	3.55	2.91	2.46	1.22	0.49	0.04
8월	0.00	0.41	1.92	3.79	5.71	6.72	7.57	8.02	7.21	6.44	5.39	4.27	2.47	0.76	0.01
9월		0.13	1.51	3.54	5.59	7.51	8.13	8.13	7.25	6.55	4.90	3.03	1.23	0.09	
10월		0.00	0.62	2.40	4.15	5.49	6.21	6.76	6.37	5.34	3.73	1.76	0.26		
11월			0.12	1.20	2.67	3.98	4.94	5.37	4.66	3.80	2.40	0.75	0.04		
12월			0.00	0.58	2.07	3.56	4.31	4.73	4.41	3.37	2.05	0.50	0.00		

단위 : W/m²

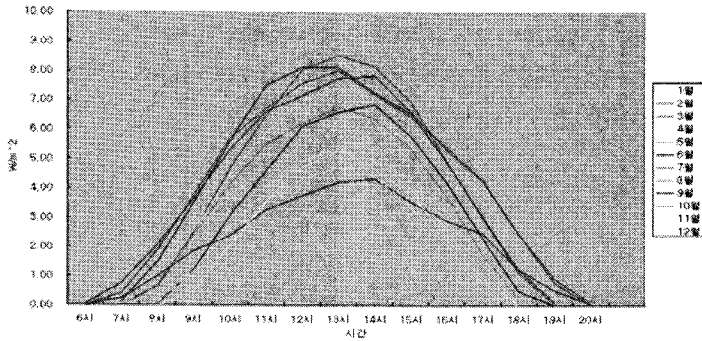


Fig. 9. 2006년 월별 태양전지의 예상 생산전력(Table 3의 자료이용)

위의 Fig. 9에서 10시부터 15시까지 전력 생산이 전체 전력 생산의 가장 큰 비중을 차지함을 확인할 수 있다. 따라서 반자동형 추적시스템이 위의 시간대에서의 태양의 고도에 맞게 월별 혹은 계절별로 모듈의 경사각이 조절되면 완전추적형의 생산 전력에 거의 근접할 것으로 예상된다.

마지막으로 2006년 기준 각 시스템의 일일평균 입사에너지 효율과 1년간 예상평균 입사에너지 효율을 나타내었다. 평균 입사에너지 효율은 다음의 식으로 정의된다.

$$\text{평균 입사에너지 효율} = \frac{\int \text{태양입사량} \times \text{입사면적 효율 } dt}{\int \text{태양입사량 } dt} \quad (2)$$

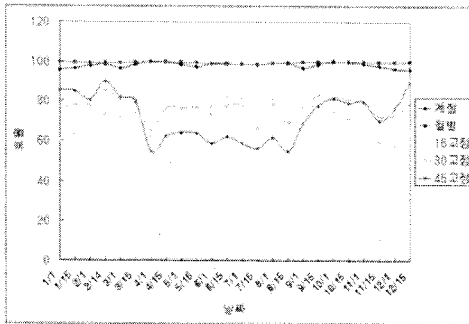


Fig. 10 각 시스템의 일일평균 입사에너지효율

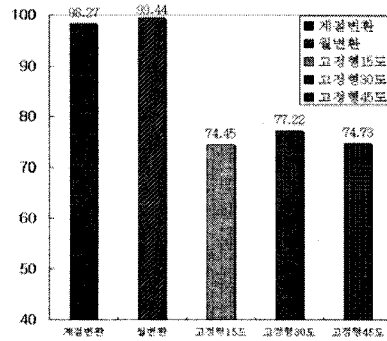


Fig. 11 각 시스템의 2006년 평균 입사에너지효율

위의 결과에서 고정형 태양광 발전시스템에 비해 반자동형 태양광 발전시스템의 성능이 월등히 뛰어남을 확인할 수 있으며, 또한 추적형 태양광 발전시스템과 비교하여서도 차이가 거의 없음을 확인할 수 있다.

3-2. 실험 결과

실험한 결과 다음과 같이 측정되었다. 다음의 Table 4는 측정된 전력을 나타내고 Table 5는 일사량을 바탕으로 한 예상 발생 전력을 나타낸다.

Table 4 2007년 시간별 측정된 발생 전력

	11시	12시	13시	14시	15시	16시
8월 27일		12.6	14.0	12.0	12.0	8.4
8월 29일	5.0	9.8	12.6	14.4	8.5	9.0
단위 : W/m ²						

Table 5 2007년 시간별 예상 발생 전력과 일사량

	11시	12시	13시	14시	15시	16시
8월 27일	3.38 (0.87)	6.69 (1.72)	8.36 (2.15)	3.23 (0.83)	3.66 (0.94)	6.18 (1.59)
8월 29일	4.51 (1.16)	6.57 (1.69)	4.78 (1.23)	2.02 (0.52)	4.63 (1.19)	0.93 (0.24)
* 예상발생전력 (일사량)			단위 : W/m ² 단위 : MJ/m ² /hr			

위의 Table 4와 Table 5가 차이가 나는 이유는 일사량이 측정지의 일사량이 아닌 대표값인 서울시 기준일사량이고, 또 실험에서 측정한 전력은 날씨변화에 따라 변화가 심하게 나타났기 때문에 정확한 데이터의 수집이 어려워서 오차가 발생한 것으로 예상된다.

4. 결론

본 설계와 실험을 수행하면서 추적형 태양광발전시스템과 고정형 태양광발전시스템 그리고 반자동형 태양광발전시스템을 비교했다. 반자동형 태양광발전시스템은 고정형에 비해 태양광 입사 효율이 20%이상 뛰어나고, 추적형 시스템과 비교하면 태양광 입사 효율이 거의 비슷하다. 또한 추적형 태양광발전시스템의 제작비용과 시스템자체의 유지를 위해 소모되는 전력과 비교하면 반자동형 태양광발전시스템이 더 효율적이라 생각된다. 실험기간이 짧고 실험장비의 미비로 인해 정확한 데이터를 얻지 못해서 정확한 규명은 힘들지만 시뮬레이션과 실험을 통해 효율적인 태양광발전장치의 설비에 관한 기초 자료를 마련했으며, 향후 소형 태양광발전시스템을 최적화 할 수 있을 것이라 사료된다.

5. 참고문헌

1. 송현갑 외. 열에너지공학, 문운당, 2006.
2. 김규홍; 김영선. 경사면 일사량에 따른 태양광발전장치의 용량 산출법에 관한 연구, 전기통신연구, 1992, 24, 80-86.
3. 조덕기; 전일수; 전명석; 강용혁; 오정무. 방위별 경사면일사량 분석에 관한 연구, 한국태양에너지학회 논문집, 2001, 21, 11-17.
4. 한국천문연구원 보현산천문대, 태양고도방위각(2006~2007)
5. 기상청, 기상년·월보(2006~2007)