

# Perez Model을 적용한 태양광 시스템 별 최적 설치 조건 및 최대 발전량 분석

## An Analysis of Optimal Installation Condition and Maximum Power Generation of Photovoltaic Systems Applying Perez Model

이 재 덕\* · 김 철 환†  
(Jaydy Lee · Chul-Hwan Kim)

**Abstract** - Photovoltaic(PV) system is one of power generation systems. Solar light in PV system is like the fuel of the car. The quantity of electricity generation, therefore, is fully dependent on the available quantity of solar light on the system of each site. If a utility can predict the solar power generation on a planned site, it may be possible to set up an appropriate PV system there. It may be also possible to objectively evaluate the performances of existing solar systems. Based on the theories of astronomy and meteorology, in this paper, Perez model is simulated to estimate the available quantity of solar lights on the prevailed photovoltaic systems. Consequently the conditions for optimal power generation of each PV system can be analyzed. And the maximum quantity of power generation of each system can be also estimated by applying assumed efficiency of PV system. Perez model is simulated in this paper, and the result is compared with the data of the same model of Meteororm. Simulated site is Daejeon, Korea with typical meteorological year(TMY) data of 1991~2010.

**Key Words** : Photovoltaic system, Optimal condition, Beam diffuse, Irradiance, Perez model

### 1. 서 론

햇빛은 태양광 발전 시스템의 연료와 같다. 따라서 기존 태양광 시스템의 성과와 계획된 부지의 재정적 실행 가능성을 정확하게 분석하기 위하여 연료에 대한 고도의 지식과 미래 신뢰성을 확보하는 것이 필수적이다. 태양광 시스템의 성과를 예견하는 데에, 태양광 공급의 변화가 가장 큰 불확실성을 나타낸다. 그 이유는 대기의 상태에 따라 태양광이 대기를 통과하면서 전달, 산란, 흡수되는 작용이 다르고, 불안정한 대기가 변화무쌍하기 때문이다.

지표에 도달하는 태양광선을 추정하는 일사량 모델이 다양하게 개발되어 있으나, 완벽한 모델은 없고 적용하는 지역에 따라 정확도가 다르게 나타난다. 본 논문에서는 세계적으로 높은 정확도를 보이는 Perez 모델을 시뮬레이션 하여 여러 가지 태양광 시스템에 적용함으로써, 태양광 시스템이 사용 가능한 태양광 성분별 일사량을 예측하였다. 또한, 태양광 시스템별 최적의 설치 조건을 발견하였으며, 태양광 시스템의 효율을 가정하여 최적 설치 조건에서 최대 태양광 발전량을 알 수 있었다.

본 논문에서는 Perez 1990 Model을 시뮬레이션 하였으며, 시뮬레이션 결과는 Meteororm의 Perez Model 자료와 비교

하였다. 시뮬레이션 지점은 위도 36.33°, 경도 127.43°, 해발 고도 203m인 대전이고, 기상 자료는 Meteororm의 1991~2010년 20년간의 TMY를 사용하였다. 시뮬레이션에 사용한 프로그램은 Matlab 이다.

### 2. 일사량 분석을 위한 학문적 원리

#### 2.1. 천문학 이론

지구는 자전축이 23.45° 기울어진 상태로 하루에 1회 자전하고, 태양의 주위를 1회/년 공전한다. 지구의 자전축이 기울어진 상태로 공전하기 때문에, 지구의 적도 평면과 태양의 중심 방향이 이루는 각(=적위)이 매일 변하고, 따라서 태양의 고도도 매시간 달라진다. 어느 시점에서 태양의 위치를 알 수 있는 식은 다음과 같다[1].

$$\sin\beta = \cos L \times \cos\delta \times \cos H + \sin L \times \sin\delta \quad (1)$$

$$\sin\phi = \frac{\cos\delta \times \sin H}{\cos\beta} \quad (2)$$

$$\delta = 23.45 * \sin\left(\frac{360(284+n)}{365}\right) \quad (3)$$

이 관계식에 사용된 약자 및 본 논문에서 사용된 용어의 의미는 다음과 같다.

- ①  $\beta$  : 태양 고도각, 수평면과 태양이 이루는 각
- ②  $\phi$  : 태양 방위각, 정남을 기준으로 동쪽 -, 서쪽 +

\* 정 회 원 : 성균관대학교 정보통신공학부 석사

† 교신저자, 펠로우회원 : 성균관대학교 정보통신공학부 교수

E-mail : hmwkim@hanmail.net

접수일자 : 2011년 11월 15일

최종완료 : 2012년 3월 28일

- ③  $L$  : 지역 위도
- ④  $\delta$  : 적위, 적도 평면과 지구와 태양의 중심 방향의 각 북 +, 남 -
- ⑤  $H$  : 시간각, 정오 기준 15도/시간 오전 -, 오후 +
- ⑥  $I_B$  : 직사광선 일사량
- ⑦  $I_{BT}$  : 경사면의 직사광선 일사량
- ⑧  $I_{GH}$  : 수평면 전일사량
- ⑨  $I_{DH}$  : 수평면 산란광선 일사량
- ⑩  $I_{DT}$  : 경사면 산란광선 일사량
- ⑪  $I_R$  : 반사광선 일사량
- ⑫  $n$  : day no., 1월 1일부터 1~365
- ⑬  $B$  : 지구 공전각, 1월 1일부터 지구가 공전한 각
- ⑭  $G_{SC}$  : 태양광 상수, 대기권 밖에서 태양과 수직인 면에서 측정된 일사량
- ⑮  $G_{OH}$  : 대기권 밖에서의 수평면 일사량
- ⑯  $E$  : Equation of Time, 균시차
- ⑰  $\rho$  : albedo, 태양광이 지표에서 반사되는 비율
- ⑱  $\psi$  : 태양전지 방위각, 정남 기준 동쪽 -, 서쪽 +
- ⑲  $\Sigma$  : 태양전지 경사각, 태양전지와 수평면 사이의 각
- ⑳  $T_{SO}$  : 진태양시
- ㉑  $T_{ST}$  : 표준시
- ㉒  $L_{ST}$  : 표준 경도
- ㉓  $L_{LOC}$  : 지역 경도
- ㉔  $\theta$  : 태양과 전지가 이루는 각

일정한 지역에서는 그 지역의 표준 경도를 정하여, 그 경도에 태양이 남중하는 시각을 표준시로 사용하고 있으며, 표준경도와 경도가 차이가 나는 지역에서는 표준시와 진태양시가 차이가 난다. 우리나라는 동경 135를 표준시로 하고 있고, 이 경도보다 서쪽에 있기 때문에 진태양시는 표준시보다 약 30분 늦게 된다. 따라서 표준시를 기준으로 측정된 일사량은 식 (4)를 이용하여 진태양시에 맞추어 적용하여야 한다. 본 논문에서는 진태양시 기준 일사량 자료를 사용하였다.

식 (5)는 지구공전 궤도가 정원일 때 매일 공전하는 각을 나타내며, 식 (6)은 지구가 태양의 주위를 공전하는 궤도가 타원이기 때문에 각속도 차이에 의한 진태양시의 연중 변화 (Equation of Time=균시차)를 나타낸다[2]. 1년간 균시차의 변화는 그림 1과 같고, 1년간 -14분 ~ +17분까지 변하고 있다.

$$T_{SO} = T_{ST} - \frac{60}{15} * (L_{ST} - L_{LOC}) + E \quad (4)$$

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (5)$$

$$E = 229.2 * (0.000075 + 0.001868 * \cos(B) - 0.032077 * \sin(B) - 0.014615 * \cos(2B) - 0.04089 * \sin(2B)) \quad (6)$$

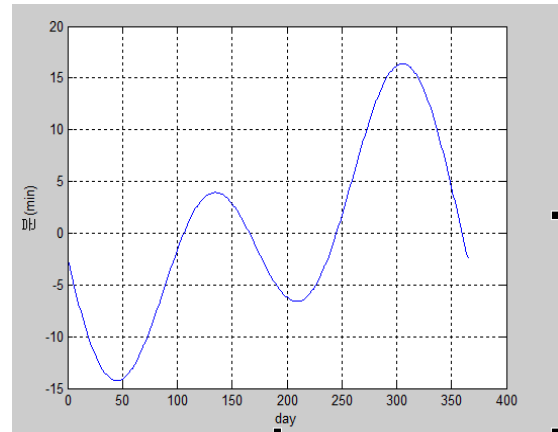


그림 1 1년간 균시차의 변화  
Fig. 1 Variation of equation of time for 1 year

## 2.2 기상학 이론

### 2.2.1 직사광선 및 반사광선

태양광이 태양으로부터 방향이 바뀌지 않고 지표에 직접 도착하는 광선을 직사광선 (beam radiation)이라 하고, 대기 중의 미세 입자에 의해서 산란되어 도달하는 광선을 산란광선 (diffuse radiation), 지표에 도달한 광선이 대기로 다시 반사되는 광선을 반사광선 (reflected radiation)이라고 한다. 이제 가지 광선이 임의의 경사면에 작용하는 정도에 대하여 연구된 바로는, 직사광선의 영향은 학자들 간에 이견이 없으며 식 (7)과 같다. 산란 일사량이 경사면에 작용하는 정도에 대하여는 여러 가지 일사량 모델이 개발되어 있으며, 적용하는 지역에 따라 정확도가 차이가 난다[3]. 일사량 모델은 크게 나누어 isotropic model과 anisotropic model이 있으며, 반사광선은 양이 미미하여 대부분 isotropic model을 사용하고 있다. 본 논문에 사용된 식 (8)도 isotropic 모델인 Liu and Jordan의 모델에서 사용된 반사광선 식을 적용하였다[4].

$$I_{BT} = I_B \times \cos\theta \quad (7)$$

$$I_R = \rho * I_{GH} * \left( \frac{1 - \cos\Sigma}{2} \right) \quad (8)$$

식 (8)에서  $\rho$ 는 지표에 도달하는 광선이 반사되는 비율인 albedo를 의미하며, 지표의 물질 및 온도에 따라 다르게 나타난다[5]. albedo는 영하 8도 이하에서는 0.8 정도로 유지되고, 온도가 상승하면 점점 낮아져서 온도가 5도 이상이 되면 0.2 수준에서 일정하게 유지되는 것으로 알려졌다[6].

### 2.2.2 Perez Model의 산란광선

Perez Model은 anisotropic model의 일종이며, 본 논문에 사용된 것은 Perez 1990년 모델이다[7]. Perez Model에서 경사면에 적용하는 산란광선 일사량 식은 다음과 같다.

$$I_{DT} = I_{DH} * (1 - F_1) * \frac{1 + \cos(\Sigma)}{2} + I_{DH} * F_1 * \frac{a}{b} + I_{DH} * F_2 * \sin(\Sigma) \quad (9)$$

①
②
③

여기서 ①은 균등하게 비추는 산란광선(isotropic irradiance), ②는 태양주위에서 비추는 산란광선(circumsolar irradiance), ③은 horizon ribbon 효과를 의미한다. ②에서 a는 수광면이 태양과 이루는 각, b는 태양 천정각이다.  $F_1$ 은 circumsolar brightening coefficient로서,  $F_1 = F_{11} + F_{12} * \Delta + F_{13} * Z$ 이고,  $F_2$ 는 horizon brightening coefficient로서,  $F_2 = F_{21} + F_{22} * \Delta + F_{23} * Z$ 이며, 식 (10)~(11) 및 표 1에서 계산할 수 있다.

$$\epsilon(\text{sky\clearness}) = (I_{DH} + I_B) / I_{DH} + k * Z^3 / (1 + k * Z^3) \quad (10)$$

$$\Delta(\text{sky\brightness}) = I_{DH} * m / G_{0H} \quad (11)$$

(k는 상수값을 가지며, m은 relative optical air mass 이고,  $G_{0H}$ 는 extraterrestrial irradiance임)

표 1 Perez Model 일사량 계수

Table 1 Coefficients for irradiance of Perez Model

$\epsilon$	$F_{11}$	$F_{12}$	$F_{13}$	$F_{21}$	$F_{22}$	$F_{23}$
1	-0.008	0.588	-0.062	-0.060	0.072	-0.022
2	0.130	0.683	-0.151	-0.019	0.066	-0.029
3	0.330	0.487	-0.221	0.055	-0.064	-0.026
4	0.568	0.187	-0.295	0.109	-0.154	-0.014
5	0.873	-0.392	-0.362	0.226	-0.462	0.001
6	1.132	-1.237	-0.412	0.288	-0.823	0.056
7	1.060	-1.600	-0.359	0.264	-1.127	0.131
8	0.678	-0.327	-0.250	0.156	-1.377	0.251

식 (11)의 relative optical air mass는 태양광선이 지표에 도달할 때까지 통과한 대기의 길이를 대기의 수직 길이와 비교한 상대 값이며, 식 (12)에서 구할 수 있다[8]. 또한, extraterrestrial irradiance는 대기권 밖에서 지평면과 평행한 평면에 비추는 일사량을 의미하며, 식 (13)에서 구할 수 있고, 본 논문에 사용된 평균 태양광 상수는  $1,367W/m^2$  이다.

$$m = \frac{\exp(-z(\text{해발고도})/8435.2)}{\sin(\beta) + 0.50572 * (57.29578 * \beta + 6.07995)^{-1.6364}} \quad (12)$$

$$G_{0H} = G_{SC} * [1 + 0.0334 * \cos(n * \frac{360}{365})] * \sin(\beta) \quad (13)$$

### 3. Perez Model의 적용 및 결과 검토

#### 3.1 태양광 시스템의 종류

태양광 시스템은 태양전지를 직렬로 연결하여 어레이를 구성하고, 어레이를 병렬로 연결하여 인버터를 통하여 교류로 전환하는 구조로 되어 있다. 태양광 시스템은 고정식과 추적식으로 분류할 수 있다. 고정식 시스템은 한 번 설치하면 경사각 및 방위각을 변경할 수 없다. 고정가변형은 경사각을 계절별 혹은 월별로 조정할 수 있도록 설치할 수 있다. 추적식 시스템은 태양전지가 태양의 방향을 추적하여 수광하는 일사량을 증가시키는 시스템이다. 현재 많이 사용되고 있는 태양광 시스템별 특징은 표 2와 같다.

표 2 태양광 시스템의 분류

Table 2 Classification of PV system

구분	시스템명	특징	비고
고정식 시스템	고정식	경남/경사각 고정	
	고정가변형	경사각 조정 가능	
추적식 시스템	양축	경사각/방위각 추적 가능	센서식
	경사단축	경사축 고정/방위각 추적	추적
	수평단축	경사축 0도/방위각 추적	가능함
	방위추적	경사각 고정/방위각 추적	

#### 3.2 태양과 태양전지 사이의 각

태양광 시스템에서 태양 전지와 태양 사이의 각을 알기 위하여, 3차원 공간에서 태양의 방향을 나타내는 단위 벡터 (svx, svy, svz)를 가정할 경우, 태양의 방향 벡터는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} svx &= \cos(\beta) * \sin(\Phi), \\ svy &= \cos(\beta) * \cos(\Phi), \\ svz &= \sin(\beta) \end{aligned} \quad (14)$$

또한 태양 전지의 방향을 나타내는 단위 벡터(pvx, pvy, pvz)를 가정할 경우, 태양전지의 방향 벡터는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} pvx &= \cos(\frac{\pi}{2} - \Sigma) * \sin(\Psi), \\ pvy &= \cos(\frac{\pi}{2} - \Sigma) * \cos(\Psi), \\ pvz &= \sin(\frac{\pi}{2} - \Sigma) \end{aligned} \quad (15)$$

상기 식 (13)~(14)로부터 알 수 있는 벡터 성분을 적용하여 태양과 태양전지 사이의 각을 구하면, 코사인 제2 법칙에 따라 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\cos(\theta) = \frac{svx * pvx + svy * pvy + svz * pvz}{\sqrt{svx^2 + svy^2 + svz^2} * \sqrt{pvx^2 + pvy^2 + pvz^2}} \quad (16)$$

식 (14)~(16)에서 시각별로 태양과 전지 사이의 코사인 각을 구하고, 직사 일사량을 곱하면 그때에 태양전지가 받을 수 있는 직사 일사량을 알 수 있다. 산란 일사량 및 반사 일사량도 일사량별 경사면에 미치는 factor를 곱하여 태양전지가 받을 수 있는 일사량을 알 수 있다. 또한, 태양광 시스템 별로 가능한 설치 조건을 변경하여 시뮬레이션하면, 시스템별 최적 조건과 이때의 일사량을 알 수 있다.

#### 3.3 추적 알고리즘

추적식은 2가지 추적하는 방식이 있다. 프로그램 추적식은 태양의 위치를 프로그래밍하여 프로그램에 따라 태양 전지가 태양의 방향과 가장 가깝게 추적하는 것이며, 직사광선에 의한 발전량이 최대가 될 수 있다. 프로그램 추적식 시스템의 추적 알고리즘은 식(17)과 같다.

$$\text{프로그램 추적식 알고리즘} = \max[\text{식}(16)] \quad (17)$$

센서식 추적방식은 태양전지 옆에 태양광 센서를 부착하여 태양광이 가장 많이 오는 방향을 추적하는 방식이다. 이 시스템은 산란광선은 경사각이 낮을 때 높고, 반사광선은 경사각이 높을 때 높은 특성을 이용하는 것이다. 수시로 방위각 및 경사각을 조정함으로써 태양 방향으로 향할 때 커지는 직사 광선량의 일부를 손실하더라도, 산란광선 및 반사광선에 의한 발전량이 더 커질 수 있는 경사각으로 조정하여 최대의 발전량을 얻게 하는 것이다. 센서 추적식 시스템의 추적 알고리즘은 식 (18)과 같다.

$$\text{센서 추적식 알고리즘} = \max[\text{식}(7) + \text{식}(8) + \text{식}(9)] \quad (18)$$

### 3.4. 결과 검증

본 논문에서 시뮬레이션한 결과가 어느 정도 정확한지를 알기 위하여, Meteonorm에서 얻을 수 있는 Perez Model의 자료와 비교하였다. Meteonorm에서 알 수 있는 자료는 전지의 방위각 및 경사각을 1년간 고정했을 때의 직사 일사량/산란 일사량/반사 일사량과 범선면 총 일사량뿐이다. 따라서 태양광 발전 시스템으로 시뮬레이션하여 얻은 결과는 고정식과 양축 추적식의 프로그램 추적식 시스템만 Meteonorm 자료와 비교를 할 수 있다. 본 논문에서는 대전 지역은 경사각을 달리한 고정식 시스템을 시뮬레이션해서 얻은 결과를 Meteonorm 자료와 비교하였고, 양축 추적 시스템은 전국의 7개 도시의 자료를 비교하였다. 그 결과는 표 3~4와 같다.

Meteonorm 자료는 직사광선은 mbe가 1.4, rmse는  $11.3W/m^2(7.2\%)$  이고, 산란광선은 mbe가 1.0, rmse는  $4.7(7\%)$  이다[9]. 또한, 수평면 일사량의 rmse는  $15W/m^2$ 이다[10]. Meteonorm 자료와 본 논문에서 시뮬레이션한 결과는  $\pm 3\%$  이내의 오차를 나타내고 있다. 표 4에서 Koro로 표시된 것은 isotropic model의 일종인 Koronakis 1986 model로서, isotropic model 중에는 비교적 정확한 것으로 판단되어 함께 비교하였다[11]. Koronakis model은 경사각 90일 때 오차가 대단히 큰 것이 단점이고, 여타의 자료에서는 Perez model보다 정확도가 높게 나타남을 알 수 있다. 반면에, Perez model은 오차의 폭이 크지 않아서 여러 가지 조건에서 비교적 정확한 값을 나타내기 때문에, 방위각 및 경사각이 수시로 변하는 태양광 시스템에 적용하기에 적합한 모델로 여겨진다.

표 3 고정식 시스템의 경사각별 검증 결과

Table 3 Verification of simulation on fixed system (단위:kWh)

경사각	광선 구분	방위각 0도		
		Meteo	Perez	Koro
0 도	직사		547	547
	산란		768	727
	반사		0	0
	계	1,274	1,315	1,274
	비율	100	103.2	100

30 도	직사		675	675
	산란		764	695
	반사		21	21
	계	1,425	1,460	1,391
	비율	100	102.5	97.6
60 도	직사		624	624
	산란		619	606
	반사		77	77
	계	1,308	1,320	1,307
	비율	100	100.9	99.9
90 도	직사		412	409
	산란		374	495
	반사		154	154
	계	963	940	1,048
	비율	100	97.6	108.8

표 4 양축 추적 시스템의 도시별 검증 결과

Table 4 Verification of simulation on different cities

(단위:kWh/%)

도시	양축 추적식 일사량				Meteo 자료	Meteo 대비	일 일사량
	직사	산란	반사	계			
서울	783	763	16	1,562	1,587	98.4	4.28
대전	960	790	43	1,793	1,784	100.5	4.91
대구	1012	816	42	1,870	1,855	100.8	5.12
부산	963	840	41	1,844	1,822	101.2	5.05
광주	1057	870	46	1,973	1,941	101.6	5.41
강릉	977	777	40	1,794	1,810	99.1	4.92
제주	978	875	44	1,897	1,841	103.0	5.20

### 4. 태양광 시스템별 발전량 예측 시뮬레이션 결과

현재 가장 많이 사용하고 있는 결정질 실리콘 태양전지는 전지의 온도가 상승하면 성능이 0.4~0.45%/도 떨어지는 특성이 있다. 이것을 전지의 온도계수라고 한다. 또한, 태양 전지가 수광하는 일사량 전체를 발전에 사용한다고 하더라도 태양광 시스템 내에는 인버터/변압기 등의 변환 효율이 있고, 시스템 내의 전압강하로 말미암아 태양 전지에서 발전되는 전기를 사용할 수 있는 교류 전기로 변환까지 완료하는 데에는 손실이 발생한다. 태양광 시스템에서 계량된 교류전기량을 태양 전지가 수광한 일사량 값과 비교한 값을 시스템 효율이라고 한다면, 태양광 시스템에서의 발전량은 식 (19)와 같이 표현할 수 있다.

$$\text{발전량} = \text{일사량} * (1 + (\text{전지온도} - STC) * \text{전지온도효율}) * \text{시스템효율} \quad (19)$$

본 논문에서는 태양 전지 온도가 대기 온도보다 평균 25°가 상승한다고 가정하고, 시스템 효율은 90%를 가정하여 시뮬레이션하였다. 그 결과 시스템별 최적 설치 조건 및

1kWp 태양전지로 발전할 수 있는 최대 발전량은 다음과 같다.

**4.1 고정식 시스템**

식 (15)에서 고정식의  $\Sigma$ (경사각)와  $\Psi$ (전지 방위각)을 변경하면서 고정식의 최적 설치 조건을 시뮬레이션하였다. 그 결과, 최적 설치 조건은 전지의 경사각이 30도, 방위각이 정남 쪽일 때이고, 이 경우 월별 발전량은 표 6과 같다.

**표 6** 고정식의 최대 발전량 예측

**Table 6** Estimation of maximum power generation on fixed system (단위:kWh)

구분	연간 발전량 예측	비율
직사광선	568	46.7%
산란광선	630	51.9%
반사광선	17	1.4%
연간 발전량	1,215	100%
일평균발전량	3.33	

**4.2 고정가변형**

고정 가변형은 경사각을 매월 조정하도록 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션 결과, 월별 최대 발전량을 낼 수 있는 경사각은 표 7과 같고, 최대 발전량은 표 8과 같다. 고정가변형은 발전량이 고정식 대비 약 4.9% 증가함을 알 수 있다.

**표 7** 고정가변형의 월별 최적 경사각

**Table 7** Optimal inclination angle of each month on semi-fixed system

월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
*	64	55	36	22	11	6	6	16	28	45	55	62

\* 경사각(도)

**표 8** 고정가변형의 최대 발전량 예측

**Table 8** Estimation of max. power generation on semi-fixed system (단위:kWh)

구분	연간 발전량 예측	비율
직사광선	610	46.7%
산란광선	634	51.9%
반사광선	30	1.4%
연간 발전량	1,274	100%
일평균 발전량	3.49	
고정식 대비		104.9%

**4.3 양축 추적식 시스템**

양축 추적식은 태양전지를 움직일 수 있는 회전축을 2개를 설치하는 방식이다. 한 축은 태양의 방향각을 추적하고, 다른 한 축은 태양의 고도 각을 추적할 수 있다. 따라서 각 축의 회전 한계가 태양의 고도 각 및 방위각 한계보다 크게 하면, 프로그램식 추적 방식은 태양전지가 항상 태양을 향하게 할 수 있다.

양축 추적식 시스템의 발전량 시뮬레이션 결과는 표 9와 같다. 양축 추적식은 프로그램 추적식으로 추적하면 발전량

이 고정식보다 25.6% 증가하며, 센서식으로 추적하면 28.3% 까지 발전량을 증가시킬 수 있음을 알 수 있다.

**표 9** 양축 추적식의 최대 발전량 예측

**Table 9** Estimation of max. power generation on dual-axes tracking system (단위:kWh/%)

구분	프로그램 추적식 시스템		센서 추적식 시스템	
	연간 발전량	비율	연간 발전량	비율
직사광선	823	53.6	816	52.3
산란광선	667	44.1	691	44.3
반사광선	36	2.4	52	3.3
연간 발전량	1,526	100	1,559	100
일평균발전량	4.18	100	4.27	102.2
고정식 대비		125.6		128.3

**4.4 경사단축 추적식 시스템**

경사단축 추적식 시스템은 남북 방향으로 축을 일정한 경사각으로 설치하고, 이 축을 중심으로 회전하여 태양의 방향을 추적하는 시스템이다. 경사각을 조절할 수 없으므로 태양의 방향에 근접하게 추적을 할 수 있을 뿐이다. 경사각을 달리하여 경사단축 추적식 시스템의 최적 설치 조건을 시뮬레이션한 결과, 프로그램 추적식 시스템에서는 경사각이 36도 일 때 최대의 발전량을 낼 수 있고, 고정식과 비교할 경우 발전량은 22.1% 증가함을 알 수 있다. 센서 추적식 시스템에서는 경사각이 34도 일 때 최대의 발전량을 낼 수 있으며, 고정식과 비교할 때 발전량이 23% 증가함을 알 수 있다. 경사 단축 추적식 시스템은 센서 방식으로 추적하더라도, 프로그램 추적식 시스템보다 발전량을 0.7%밖에 증가시킬 수 없으므로 센서식 효과는 미미함을 알 수 있다.

**표 10** 경사 단축 추적식의 최대 발전량 예측

**Table 10** Estimation of max. power generation on sloped 1-axis tracking system (단위kWh/%)

구분	프로그램 추적식 시스템		센서 추적식 시스템	
	연간 발전량	비율	연간 발전량	비율
직사광선	789	53.2	789	52.8
산란광선	661	44.5	672	44.9
반사광선	34	2.3	34	2.3
연간 발전량	1,484	100	1,495	100
일평균발전량	4.07	100	4.10	100.7
고정식 대비		122.1		123.0

**4.5 수평단축 추적식 시스템**

수평단축 추적식 시스템은 경사단축 추적식 시스템의 특수한 경우로, 남북 방향의 축이 수평이라는 것이다. 이 시스템에서는 남북 방향으로 그림자가 생기지 않기 때문에 추적식이라도 좁은 면적에 많은 양의 전지를 설치할 수 있는 장점이 있다. 그러나 축이 동서로 회전하여 태양을 추적하더라도 태양과의 각도가 크기 때문에 고정식에 비해 발전량이 많이 증가시킬 수 없는 단점이 있다. 시뮬레이션 결과, 표 11에 나타난 바와 같이, 프로그램 추적식 시스템은 고정식에

비해 11.8%의 발전량을 증가시킬 수 있고, 센서 추적식 시스템은 13.7%까지 발전량을 증가시킬 수 있음을 알 수 있다.

표 11 수평 단축 추적식의 최대 발전량 예측

Table 11 stimulation of max. power generation on horizontal tracking system (단위:kWh/%)

구분	프로그램 추적식 시스템		센서 추적식 시스템	
	연간 발전량	비율	연간 발전량	비율
직사광선	695	51.2	692	50.1
산란광선	603	44.4	638	46.2
반사광선	60	4.4	52	3.8
연간 발전량	1,358	100	1,382	100
일평균발전량	3.72	100	3.79	101.8
고정식 대비		111.8		113.7

4.6 방위 추적식 시스템

방위 추적식 시스템은 고정식 어레이와 같이 경사각이 고정되게 어레이를 제작하고, 어레이 자체가 동서로 회전할 수 있도록 하는 시스템이다. 방위 추적식은 경사각을 조절할 수 없으므로 센서 추적식 시스템을 적용할 수 없다. 컴퓨터 시뮬레이션은 경사각의 크기를 달리하여 발전량이 최대가 나오는 경사각을 찾는 것이다. 시뮬레이션 결과 경사각이 46도일 때 최대 발전량을 낼 수 있었다. 이때 최대 발전량은 표 12와 같다.

표 12 방위 추적식의 최대 발전량 예측

Table 12 Estimation of max. power generation on azimuth tracking system (단위:kWh/%)

구분	연간 발전량 예측	비율
직사광선	781	53.3
산란광선	644	44.0
반사광선	40	2.7
연간 발전량	1,465	100
일평균 발전량	4.01	
고정식 대비		120.6

4.7 시뮬레이션 결과 종합

시스템별 시뮬레이션 결과를 종합하면 표 13과 같다. 고정 가변형은 고정식보다 4.9% 발전량을 증가시킬 수 있으며, 프로그램 추적식 시스템은 고정식보다 11.8~25.6%의 발전량을 늘릴 수 있다. 센서 추적식 시스템은 프로그램식보다 0.7~2.2%의 발전량을 증가시킬 수 있다.

최대 발전량을 1년간 시간별로 합한 시간별 발전량을 그래프로 표시하면 그림 2와 같다. 고정식과 비교하면 추적식 시스템은 정오경의 최대 발전량은 차이가 별로 없으나, 아침/저녁에 발전량을 증가시켜 전체적으로 발전량을 증가시킬 수 있음을 알 수 있다. 수평 추적식은 정오경의 발전량이

고정식보다 오히려 낮음을 알 수 있는데, 이는 태양과 전지와와의 각이 크기 때문이다.

표 13 태양광 시스템별 최대 발전량 예측

Table 13 Estimation of max. power generation on all PV system (단위:kWh)

시스템	프로그램 방식		센서 방식	
	연간 발전량	고정식 대비	연간 발전량	프로그램식 대비
고정식	1,215	100.0%		
고정가변	1,274	104.9%		
양축추적	1,526	125.6%	1,559	102.2%
경사단축	1,484	122.1%	1,495	100.7%
수평단축	1,358	111.8%	1,382	101.8%
방위추적	1,465	120.6%		

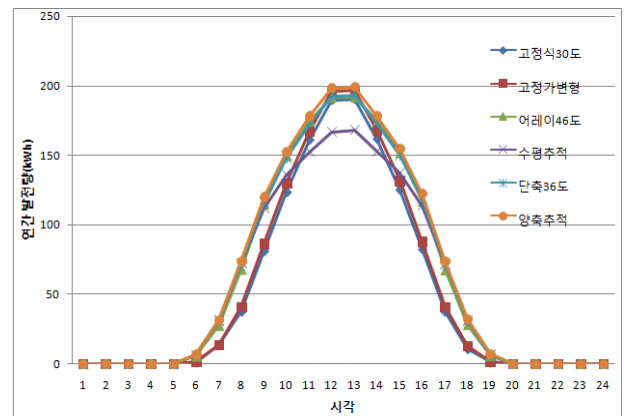


그림 2 태양광 시스템별 최대 발전량 예측

Fig. 2 Estimation of max. power generation on all PV system

본 논문에서 가정된 태양전지의 온도계수와 태양광 시스템의 효율을 적용한 태양광 시스템의 효율은 표 14와 같다. 일사량 대비 태양광 발전 효율은 83.2%~85.1%임을 알 수 있다.

표 14 태양광 시스템별 발전 효율

Table 14 Power generation efficiency of PV systems (단위:kWh)

시스템	일사량	발전량	시스템 효율
고정식	1,460	1,215	83.2%
양축추적식	1,793	1,526	85.1%

5. 결론

본 논문에서는 Perez model 1990을 적용하여, 태양광 시스템별 최적 설치 조건과 최대 발전량을 시뮬레이션 하였다. 그 결과, 각 태양광 시스템을 어떻게 설치하여야 최대의 성과를 낼 수 있는지를 알 수 있었으며, 최적 조건으로 설치하였을 때의 최대 발전량도 예측할 수 있었다.

시뮬레이션에 사용된 대전 지역에 고정식 태양광 시스템

을 설치할 경우, 경사각을 30도로 설치하는 것이 최적 조건이고, 이렇게 할 때 태양전지 1kWp로 가능한 일평균 발전량은 3.33kWh 임을 알 수 있었다. 그리고 프로그램 추적식 시스템을 설치할 경우, 수평 추적식 시스템은 추적 효과가 가장 작아서 고정식과 비교하면 11.8%의 발전량 증대를 기대할 수 있고, 양축 추적식의 발전량 증대 효과는 25.6%임을 알 수 있었다. 또한, 센서 추적식의 발전량 증대 효과는 0.7%~2.2%를 기대할 수 있음을 알 수 있었다. 또한, 태양전지의 온도 계수와 시스템의 효율을 적용한 태양광 시스템의 효율은 83.2%~85.1%가 됨을 알 수 있었다.

본 논문에서 시뮬레이션한 결과를 이용할 경우, 신규로 건설하는 태양광 발전소는 최적의 설치 조건으로 설치하여 최대의 성과를 낼 수 있고, 기존의 태양광 발전소는 효율 진단이 가능할 것으로 생각한다. 또한, 태양광 시스템을 건설하는 비용과 시스템별 예측성능을 비교하면, 비용 대비 최대 성과를 낼 수 있는 태양광 시스템을 설치할 수 있을 것으로 생각한다. 따라서 태양광 시스템의 효율 극대화 및 산업합리화로 태양광 산업의 발전에 이바지할 수 있을 것으로 생각한다.

**감사의 글**

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20103060130010)

**참 고 문 헌**

[1] Gilbert M. Masters, "Renewable Efficient Power Systems", Wiley-Interscience, Page 390~397, 2004  
 [2] John A. Duffie and William A. Beckman, "Solar Engineering of Thermal Processes", Wiley, New York, 3-rd edition, Page 3~23, 2005  
 [3] Ali Mohammad Noorian, Isaac Moradi, Gholam Ali Kamali, "Evaluation of 12 models to estimate hourly diffuse irradiance on inclined surfaces", Science Direct Renewable Energy 33, page 1406~1412, 2008  
 [4] Liu B., Jordan R., "Daily insolation on surfaces tilted towards the equator", Trans. ASHRAE, Page 526~541, 1962  
 [5] Grant W. Petty, "A First Course In Atmospheric Radiation", Sundog Publishing, Page 98~102, 2006  
 [6] "Meteonorm Handbook part II, Theory", <http://www.meteonorm.com>, Page 29~59

[7] Richard Perez, Pierre Ineichen, Robert Seals, Joseph Michalsky, and Ronald Stewart, "Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance", Solar Energy Vol.44, No.5, Page 271~289, 1990  
 [8] Kasten, F., and A. T. Young. "Revised optical air mass tables and approximation formula", Applied Optics 28, 4735~4738, 1989  
 [9] Voirel Badescu, "Modeling Solar Radiation at the Earth Surface", Springer, Page 404, 2008  
 [10] Tom Stoffel, Dave Renne, Daryl Myer, Steve Wilcox, Manajit Sengupta, Ray George, Craig Turchi, "Concentrating Solar Power", NREL, Page 75, 2010  
 [11] Koronakis PS., "On the choice of the angle of tilt for south facing solar collectors in the Athens basin area", Page 217~225, Sol Energy 36, 1986

**저 자 소 개**



**이 재 덕 (李 載 德)**

1959년 10월 11일생. 1985년 성균관대 무역학과 졸업. 2012년 동 대학원 태양광시스템공학협동과정 졸업(공학석사). 현재 한국태양광발전협동조합 이사장, (주)제이디 사장  
 Tel : 010-7118-5510  
 E-mail : jaydylee@naver.com



**김 철 환 (金 喆 換)**

1961년 1월 10일생. 1982년 성균관대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 성균관대 정보통신공학부 교수, 전력IT인력양성센터 센터장  
 Tel : 031-290-7124  
 Fax : 031-299-4137  
 E-mail : hmwkim@hanmail.net