

태양광 발전 시스템의 최적 설치 각도 예측에 관한 연구

김정환<sup>\*,\*\*</sup>, 유권중<sup>\*</sup>, 소정훈<sup>\*</sup>, 차한주<sup>\*\*</sup>, 유병규<sup>\*</sup>  
 한국에너지기술연구원<sup>\*</sup>, 충남대학교<sup>\*\*</sup>

The Study on Prediction about the Optimal Installation Angle of Photovoltaic System

Jung-Hwan Kim<sup>\*</sup>, Gwon-Jong Yu<sup>\*</sup>, Jung-Hun So<sup>\*</sup>, Han-Ju Cha<sup>\*\*</sup>, Byung-Gyu Yu<sup>\*</sup>  
 Korean Institute of Energy Research<sup>\*</sup>, Chung-nam National University<sup>\*\*</sup>

**Abstract** - The measured solar radiation on tilted surfaces by all directions has been widely used as important solar radiation data in installing photovoltaic system. The photovoltaic systems is much affected by angle and direction of incident rays. The results obtained in this research could be used in installing optimal photovoltaic systems.

기 호 설 명

φ : 해당지방 위도 δ : 일직위  
 β : 수평면에 대한 어레이 경사각 γ : 방위각  
 σ : 지표면 반사율 G<sub>sc</sub> : 태양상수 (1,367Wh/m<sup>2</sup>)

1. 서 론

최근 정부에서 신국가 발전전략으로 저탄소 녹색성장을 국가비전으로 제시하여 신재생에너지에 대한 관심 증가하였다. 특히 신재생에너지 중에서도 무한정하며 청정한 에너지원으로 태양광발전이 각광을 받고 있는 상황이다. 이러한 태양광 발전은 태양에서 방출되는 태양에너지의 입사각도에 따라 시스템의 효율이 크게 좌우되고 있다. 따라서 경사면에 입사되는 일사량 분포에 대한 최적 설치 각도 예측이 매우 중요하다. 이와 같은 중요성을 감안하여 기상청 연보를 바탕으로 경사면 일사량 산출 계산식을 적용한 경사면 일사량 예측 프로그램과 상용프로그램을 활용하여 경사각도에 따른 최대 일사량 분포를 산출하여 비교 분석하였다.

2. 본 론

2.1 경사면 일사량 예측 프로그램 구축

태양광 발전 시스템 설계 과정에서 태양광 어레이의 설치 각도와 위치에 따라 성능이 크게 좌우되기 때문에 수평면에 대한 경사면의 평균 일사량의 값이 고려되어야 한다. 이 값은 월별 평균 직달일사량, 산란일사량, 그리고 지표면 반사 일사량의 합으로부터 구할 수 있으며, 다음과 같이 식(1)로 표현할 수 있다.

$$\overline{H}_T = \overline{H} \left(1 - \frac{\overline{H}_d}{H}\right) \overline{R}_b + \overline{H}_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + \overline{H}_r \rho_s \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) \quad (1)$$

여기에서,  $\overline{H}_d/\overline{H}$ 는 수평면에서의 월별 1일 평균 총일사량에 산란일사량의 비율을 말하며,  $\overline{R}_b$ 는 해당 달의 월평균 하루의 값으로 수평면에서의 총일사량에 대한 경사면 직달일사량 비율인  $\overline{H}_{0T}/\overline{H}$ 를 의미하며 식(2)로 계산할 수 있다.

$$\frac{\overline{H}_d}{\overline{H}} = 0.775 + 0.00653(\omega_s - 90) - [0.505 + 0.00455(\omega_s - 90)] \cos \left(115 \frac{\overline{H}}{\overline{H}_0} - 103\right) \quad (2)$$

위의 식(3)에서  $\omega_s$ 는 수평면 일몰 시간각으로 다음의 식(3)과 같다.

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (3)$$

그리고 식(2)에서 해당지방의 월 평균 대기권 밖 일사량  $\overline{H}_0$ 는 다음과 같이 식(4)로 계산할 수 있다.

$$\overline{H}_0 = \frac{24 \times 3600}{\pi} G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365}\right] \times [\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{2\pi \omega_s}{360} \sin \phi \sin \delta] \quad (4)$$

북반구에서 적도를 향한 경사면, 즉 방위각이 정남( $\gamma = 0^\circ$ )을 향한 경우,  $\overline{R}_b$ 는 다음과 같이 식(5)로 계산할 수 있다.

$$\overline{R}_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \sin \omega'_s + \left(\frac{\pi}{180}\right) \omega'_s \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \left(\frac{\pi}{180}\right) \omega_s \sin \phi \sin \delta} \quad (5)$$

위의 식(5)에서 경사면 일몰 시간각인  $\omega'_s$ 는 해당월 평균일의 대표 일직위 값을 적용하여 다음과 같이 식(6)로 계산할 수 있다.

$$\delta = 23.45 \sin \left(360 + \frac{284 + n}{365}\right) \quad (6)$$

북반구의 경우, 일몰 시간각은 다음과 같이 식(7)로 계산할 수 있다.

$$\omega'_s = \min \left[ \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta), \cos^{-1}(-\tan(\phi - \beta) \tan \delta) \right] \quad (7)$$

방위각이 정남을 향한 경우가 아닐 경우 식(5)는 사용하지 못한다. 그러나 다음에 정의된 식을 사용하여  $\overline{R}_b$  값을 구할 수 있으며 식(8)에서 식(11)로 계산할 수 있다.

$$\overline{R}_b = \frac{\left\{ \begin{aligned} &(\cos \beta \sin \delta \sin \phi)(\omega_{ss} - \omega_{sr})(\pi/180) \\ &- (\sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma)(\omega_{ss} - \omega_{sr})(\pi/180) \\ &+ (\cos \phi \cos \delta \cos \beta)(\sin \omega_{ss} - \sin \omega_{sr}) \\ &+ (\cos \delta \cos \gamma \sin \phi \sin \beta)(\sin \omega_{ss} - \sin \omega_{sr}) \\ &- (\cos \delta \sin \beta \sin \gamma)(\cos \omega_{ss} - \cos \omega_{sr}) \end{aligned} \right\}}{2(\cos \phi \cos \delta \sin \omega_w + (\pi/180)\omega_s \sin \phi \sin \delta)} \quad (8)$$

여기에서,  $\omega_{sr}$ 과  $\omega_{ss}$ 는 각각 경사면에서의 일출, 일몰 시간각으로 다음의 식으로 계산할 수 있다.

서쪽방위를 향한 경우 ( $\gamma > 0^\circ$ ),

$$\omega_{sr} = -\min \left\{ \omega_s, \cos^{-1} \left[ \frac{AB + \sqrt{A^2 - B^2 + 1}}{A^2 + 1} \right] \right\}$$

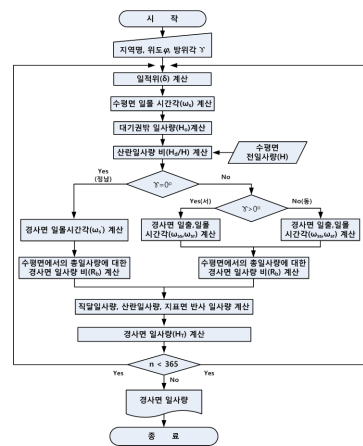
$$\omega_{ss} = \min \left\{ \omega_s, \cos^{-1} \left[ \frac{AB - \sqrt{A^2 - B^2 + 1}}{A^2 + 1} \right] \right\} \quad (9)$$

동쪽방위를 향한 경우 ( $\gamma < 0^\circ$ ),

$$\omega_{sr} = -\min \left\{ \omega_s, \cos^{-1} \left[ \frac{AB - \sqrt{A^2 - B^2 + 1}}{A^2 + 1} \right] \right\}$$

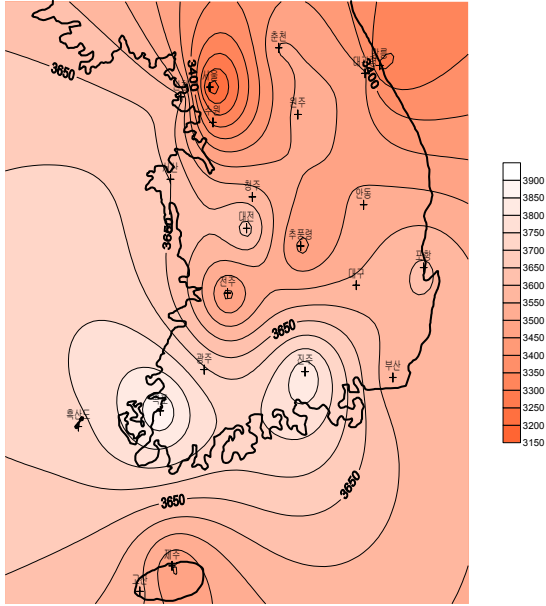
$$\omega_{ss} = \min \left\{ \omega_s, \cos^{-1} \left[ \frac{AB + \sqrt{A^2 - B^2 + 1}}{A^2 + 1} \right] \right\} \quad (10)$$

$$A = \frac{\cos \phi}{(\sin \gamma \tan \beta)} + \frac{\sin \phi}{\tan \gamma}, \quad B = \tan \delta \left\{ \frac{\cos \phi}{\tan \gamma} - \frac{\sin \phi}{[\sin \gamma \tan \beta]} \right\} \quad (11)$$



〈그림 1〉 경사면 일사량 프로그램 순서도

앞의 이론적 배경을 바탕으로 경사면 일사량 예측 프로그램을 구축하였다. 이 프로그램은 해당지역의 위도와 그 지역에서 가장 가까운 기상청 측정지점의 수평면 일사량 값과 해당지역의 대기권밖 일사량을 계산한 다음 앞에서의 수식을 활용하여 경사면 일사량과 최적설치각도를 예측할 수 있게 구축하였으며 프로그램 순서도는 그림1과 같다. 수평면 일사량 값은 기상청 측정지점은 일사량을 측정하고 있는 총 22개 기상청 측정지점을 대상으로 하였으며 전국 20년 평균 수평면 일사량 분포는 그림1과 같다. 시뮬레이션은 경사각을 0도부터 90도까지 계산하였으며 경사면 일사량 최대값 결과는 표1과 같다.



〈그림 2〉 20년(1988~2007) 평균 수평면 일사량(wh/m<sup>2</sup>/day)

〈표 1〉 경사면 일사량 예측 프로그램 시뮬레이션 결과

지점명	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
대관령	62	52	36	18	4	0	0	9	26	47	59	64
춘천	61	51	35	18	4	0	0	11	28	46	58	64
강릉	62	51	36	18	3	0	0	10	26	47	58	64
서울	60	51	36	18	3	0	0	9	27	45	57	63
인천	61	51	36	18	3	0	0	11	28	47	58	64
원주	60	51	35	18	3	0	0	10	28	46	58	64
수원	60	50	35	17	3	0	0	10	27	46	58	62
서산	59	50	35	18	4	0	0	10	28	46	58	62
청주	60	51	35	17	2	0	0	10	27	46	57	62
대전	59	50	35	17	4	0	0	10	27	45	58	62
추풍령	60	50	34	16	2	0	0	9	26	46	58	62
안동	60	50	34	17	4	0	0	10	26	45	58	63
포항	60	49	33	17	2	0	0	9	26	45	58	62
대구	59	49	34	17	2	0	0	10	25	45	57	62
진주	58	48	33	16	2	0	0	10	25	45	56	60
광주	58	49	34	16	2	0	0	10	25	30	56	61
부산	58	48	33	15	2	0	0	9	25	45	57	61
목포	58	48	34	16	2	0	0	10	26	45	56	60
흑산도	56	48	34	15	2	0	0	10	27	44	56	60
제주	51	43	30	15	0	0	0	8	23	43	53	56
고산	54	45	30	15	0	0	0	9	24	42	54	57
진주	60	49	34	16	2	0	0	10	25	45	57	62

## 2.2 결과분석

경사면 일사량 예측 프로그램을 실행한 결과 전국 봄철 최적 태양광 어레이 설치 경사각은 15°~35° 사이의 분포를 보이며, 대체적으로 고른 분포를 보이고 있으며 여름철에는 0°~4° 사이의 분포하고 있다. 여름철에는 최적 경사각이 0°(수평면)에 가까운 경향을 보이고 있다. 가을철에는 10°~45° 사이의 분포를 보이고 있으며, 겨울철에는 55°~64° 사이의 분포를 보이고 있다. 대체적으로 북쪽 지방으로 갈수록 경사각도가 높아지는 경향을 보이고 있다.

앞에서의 결과의 타당성을 확인하기 위해 상용프로그램을 사용하였다. 사용한 프로그램은 Solar Pro이며 해당지역의 위도, 경도, 연평균 수평면 일사량, 연평균 최고, 최저온도를 바탕으로 경사면 일사량과 발전량을 예측할 수 있다. 입력한 위도, 경도, 연평균 수평면 일사량은 경사면 일사량 예측 프로그램과 동일하게 하였다. 시뮬레이션 조건으로 모듈은 Sharp의 NE-H120A를 선택하였으며 120W의 용량을 가지고 있다. 태양광 어레이는 10직렬 1병렬로 구성되어 발전용량을 1.2kW로 구성되어 시뮬레이션 하였다. 여기서 경사각을 0도부터 5도 단위로 증가하여 90도 까지 시뮬레이션 하였으며 해당 월에 발전량이 가장 큰 경사각 결과를 표2에 정리하였다.

〈표 2〉 발전량 예측 시뮬레이션 결과

지점명	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
대관령	60	50	35	20	15	5	5	15	30	45	55	60
춘천	60	50	35	20	10	5	5	15	30	45	55	60
강릉	60	50	35	20	10	5	5	15	30	45	55	60
서울	60	50	35	20	10	5	5	15	30	45	55	60
인천	60	50	35	20	10	5	5	15	30	45	55	60
원주	60	50	35	20	10	5	5	15	30	45	55	60
수원	60	50	35	20	10	5	5	15	30	45	55	60
서산	60	50	35	20	10	0	5	15	30	45	55	60
청주	60	50	35	20	10	0	5	15	30	45	55	60
대전	60	50	35	20	10	0	5	15	30	45	55	60
추풍령	60	50	35	20	10	0	5	15	30	45	55	60
안동	60	50	35	20	10	0	5	15	30	45	55	60
포항	60	50	35	20	5	0	5	15	25	45	55	60
대구	60	50	35	20	5	0	5	15	25	45	55	60
진주	60	50	35	20	5	0	5	15	25	45	55	60
광주	55	50	35	20	5	0	5	10	25	40	55	60
부산	55	45	35	20	5	0	5	10	25	40	55	60
목포	60	45	35	20	5	0	5	10	25	40	55	60
흑산도	55	45	35	20	5	0	5	10	25	40	55	60
제주	55	45	35	15	5	0	0	10	25	40	50	55
고산	55	45	30	15	5	0	0	10	25	10	50	55
진주	55	45	35	20	5	0	5	10	25	40	55	60

발전량 예측 프로그램을 실행한 결과 전국 봄철 최적 태양광 어레이 설치 경사각은 20°~35° 사이의 분포를 보이며, 대체적으로 고른 분포를 보이고 있으며 여름철에는 0°~15° 사이의 분포하고 있다. 여름철에는 최적 경사각이 5°에 가까운 경향을 보이고 있다. 가을철에는 15°~45° 사이의 분포를 보이고 있으며, 겨울철에는 50°~60° 사이의 분포를 보이고 있다. 이 결과 또한 대체적으로 북쪽 지방으로 갈수록 경사각도가 높아지는 경향을 보이고 있다.

## 3. 결 론

두 예측 프로그램 결과를 비교해 보면 최적 경사각에 조금의 오차는 발생하지만 경사면 일사량의 분포 경향은 거의 차이를 나타내고 있지 않다는 것을 알 수 있었다. 분포상 특징을 살펴보면 전국 평균적으로 봄에는 35°, 여름에는 5°, 가을에는 45°, 겨울에는 60°가 최적 태양광 어레이 설치 각도로 나타나는 것을 알 수 있었다.

앞에서의 결과만으로 전반적인 우리나라 전 지역에 대한 정확한 경사면 일사량으로 받아들이기는 어려운 실정이다. 따라서 향후에는 매 시간마다 측정된 실측 자료를 토대로 신뢰성을 가지고 우리나라 실정에 맞게 경사면 일사량 예측 프로그램을 보완할 계획이다.

## [참 고 문 헌]

- [1] John A. Duffie and William A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Process, Wiley New York, 1991, pp.3-145.
- [2] 기상청, 태양에너지 최적 활용을 위한 기상자원 분석 보고서, 2008
- [3] 조덕기, 강용혁, PV시스템 설치를 위한 경사면 태양광에너지 분석에 관한 연구, 태양에너지학회논문집, Vol 27, No. 1, 2007
- [4] 유권중외, 전문가시스템을 이용한 태양광 어레이의 최적설치 각도에 관한 연구, 태양에너지학회논문집, Vol 27, No. 3, 2007
- [5] Solar Pro for windows User Manual, 2004