

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 27, No. 1, 2007

# PV시스템 설치를 위한 경사면 태양광에너지 분석에 관한 연구

조덕기\*, 강용혁\*

\*한국에너지기술연구원 (dokkijo@kier.re.kr / yhkang@kier.re.kr)

## A Study on the Analysis of Solar Radiation on Inclined Surfaces for the Installation of PV Systems

Jo, Dok-Ki\*, Kang, Young-Heack\*

\*Korea Institute of Energy Research (dokkijo@kier.re.kr / yhkang@kier.re.kr)

### Abstract

The amount of incident rays over inclination according to direction has been widely utilized as important data in installing photovoltaic systems. This is because the performance of the photovoltaic systems is much affected by angle and direction of incident rays. Recognizing that factors mentioned above are of importance, actual experiment on the moving route of the sun have been performed in this research to obtain the angle of inclination with which the maximum incident rays can be absorbed. After all, the standard for designing highly optimized photovoltaic systems will be provided for designers and employees working in the photovoltaic module related industries.

**Keywords** : 태양광시스템 (Photovoltaic System), 경사면 (Inclined Surface), 태양복사 (Solar Radiation)

### 기 호 설 명

$\bar{R}$ : 수평면에 대한 경사면에서의 월별 1일 평균일사량의 비	$\rho$ : 지면반사율
$K_T$ : 월별 1일 평균 일사율( $H/H_0$ )	$\phi$ : 해당지방의 위도
$\bar{H}_T$ : 월별 1일 평균 경사면일사량	$\delta$ : 일적위 = $23.45 \sin(360 \cdot 284n/365)$
$\bar{H}$ : 수평면에서의 월별 1일 평균 총일사량	$\beta$ : 수평면에 대한 집열면의 경사각도
$H_0$ : 해당지방의 월평균 대기권밖 일사량	$G_{sc}$ : 태양상수
$H_{bT}$ : 경사면 직달일사량	$\gamma$ : 표면방위각
$\bar{H}_d$ : 월별 1일 평균 산란일사량	$\omega_s$ : 수평면일몰시간각
$\bar{R}_b$ : $H_{bT}/\bar{H}$	

접수일자:2007년 1월 19일, 심사완료일자:2007년 3월 15일

## 1. 서론

최근 대체에너지 자원 중 인류의 마지막 보루인 태양에너지의 사업 수행지역이 확대됨에 따라 태양광 시스템의 설계기준 및 이에 따른 설계자료로서 해당 지역에 대한 최적 일사자료가 매우 절실히 요구되고 있다. 태양광시스템은 주로 태양에너지의 입사각도에 따라 시스템 효율 및 성능이 크게 좌우되고 있다. 따라서 방위별에 따라 경사면에 입사되는 태양광은 태양광에너지 수집장치인 태양전지판 설치시에 매우 중요한 자료로 널리 이용되고 있다. 즉, 직접적으로 태양광시스템의 성능에 미치는 효과는 태양전지판 등의 설치각도나 향에 따라 좌우되는 태양광에너지 양에 크게 영향을 받기 때문에 태양광에너지 데이터는 매우 중요하다는 뜻이다.

본 연구에서는 이와 같은 중요성을 감안하여 방위별 경사각도에 따른 태양광에너지 강도 측정실험을 통하여 태양광시스템 최적이용에 적합한 최대 태양광을 받을 수 있는 경사각도를 산출하여 태양광시스템 설계자 및 관련 산업체 종사자들에게 최적시스템 설계기준을 제시하고자 한다.

## 2. 이론적 배경

태양광발전시스템 설계 시는 필연적으로 수평면에 대한 경사면에서의 월별 1일 평균일사량의 비율인  $\bar{R}$ 값<sup>1)2)</sup>이 산출되어야 한다. 이  $\bar{R}$ 값은 직달, 산란, 지면반사성분의 합으로부터 구할 수 있다. 만일 산란일사량과 지면에서 반사되는 일사량이 각각 등방위성을 갖는다면, 월별 평균비율  $\bar{R}$ 값<sup>3)4)</sup>을

다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{R} = \frac{H_T}{H} = (1 - \frac{H_d}{H}) \bar{R}_b + \frac{H_d}{H} \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (1)$$

그리고 월별 1일 평균 경사면일사량  $H_T$ 는 식 (2)와 같이 된다.

$$H_T = H \left( 1 - \frac{H_d}{H} \right) \bar{R}_b + H_d \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + H \rho \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (2)$$

여기서,  $H_d/H$ 는 월별 1일 평균 일사율인  $KT$  ( $H/H_0$ )의 함수로서 수평면에서의 월별 1일 평균 총일사량에 대한 산란일사량의 비율을,  $\bar{R}_b$ 는 해당 달의 월평균 1일 값으로 수평면에서의 총일사량에 대한 경사면 직달일사량 비율인  $H_{bT}/H$ 를 의미한다.

$$\frac{H}{H_d} = 0.775 + 0.00653 (\omega_s - 90) - [0.505 + 0.00455 (\omega_s - 90)] \cos (115KT - 103) \quad (3)$$

여기서,  $\omega_s$ 는 수평면일몰시간각으로  $\omega_s = \cos^{-1} (-\tan \phi \tan \sigma)$ 이다.

해당지방의 월평균 대기권밖 일사량  $H_0$ 는 식 (4)에서 구할 수 있다.

$$H_0 = 24 \times 3600 G_{sc} / \pi \{ 1 + 0.033 \cos (360n/365) \times [\cos \phi \cos \sigma \sin \omega_s + (2\pi \omega_s / 360) \sin \phi \sin \sigma] \} \quad (4)$$

1) Duffie John A. and Beckman William A., Solar Engineering of Thermal Process, John Wiley & Sons, Inc., 1991.

2) D. Feuermann, and A. Zemel, Validation of Models For Global Irradiance, on Inclined Planes, Solar Energy, Vol. 48, No. 1, 1992.

3) T.M. Klucher, Evaluation of Models to Predict Insolation on Tilted Surface, Solar Energy,

Vol. 23, 1992.

4) J.L. Wise, Analysis of Solar Radiation Measurements on An Inclined Surface in Anchorage Alaska, AEIDC Publication, 1980.

북반구에서 적도를 향한 경사면, 즉 방위각이 정남( $\gamma=0^\circ$ )을 향한 경우,  $\bar{R}_b$ 는 다음 식으로 정의된다.

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\phi-\beta) \cos\delta \sin\omega_s' + (\pi/180)\omega_s' \sin(\phi-\beta) \sin\delta}{\cos\phi \cos\delta \sin\omega_s + (\pi/180)\omega_s \sin\phi \sin\delta} \quad (5)$$

여기서, 경사면 일몰시간각인  $\omega_s'$ 는 해당월 평균일의 대표값인 일적위 등을 적용하여 다음 식에 의해 산출할 수 있다.

북반구일 경우,

$$\omega_s' = \min \left| \begin{array}{l} \cos^{-1}(-\tan\phi \tan\delta) \\ \cos^{-1}[-\tan(\phi-\delta) \tan\delta] \end{array} \right| \quad (6)$$

식 (5)에서 분자항은 경사면에서의 대기권밖 일사량을, 분모항은 수평면에서의 대기권밖 일사량을 의미하며, 이들 각각의 값은 수평면, 또는 경사면에서 태양시를 기준으로 일출에서 일몰시간까지의 적분치로서 구할 수 있다. 위에 소개한 식 (5)를 임의의 방향을 갖는 어떠한 평면에서도 적용할 수 있도록 다음과 같은 식으로 재 변형되었다.

$$\bar{R}_b = \frac{(\cos\beta \sin\delta \sin\phi)(\omega_{ss} - \omega_{sr})(\pi/180) - (\sin\delta \cos\phi \sin\beta \cos\gamma)(\omega_{ss} - \omega_{sr})(\pi/180) + (\cos\phi \cos\delta \cos\beta)(\sin\omega_{ss} - \sin\omega_{sr}) + (\cos\delta \cos\gamma \sin\phi \sin\beta)(\sin\omega_{ss} - \sin\omega_{sr}) - (\cos\delta \sin\beta \sin\gamma)(\sin\omega_{ss} - \sin\omega_{sr})}{2[\cos\phi \cos\delta \sin\omega_s + (\pi/180)\omega_s + \sin\phi \sin\delta]} \quad (7)$$

여기서,  $\omega_{sr}$ 과  $\omega_{ss}$ 는 각각 경사면에서의 일출, 일몰시간각으로 다음 식에 의해 산출할 수 있다.

$\gamma > 0^\circ$ 인 경우,

$$\omega_{sr} = -\min \{ \omega_s, \arccos [ (AB + \sqrt{A^2 - B^2 + 1}) / A^2 + 1 ] \}$$

$$\omega_{ss} = \min \{ \omega_s, \arccos [ (AB - \sqrt{A^2 - B^2 + 1}) / A^2 + 1 ] \} \quad (8)$$

$\gamma < 0^\circ$ 인 경우,

$$\omega_{sr} = -\min \{ \omega_s, \arccos [ (AB - \sqrt{A^2 - B^2 + 1}) / A^2 + 1 ] \}$$

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

$$A = [\cos\phi / (\sin\gamma \tan\beta) + (\sin\phi / \tan\gamma)]$$

$$B = \tan\delta / \{ (\cos\phi / \tan\gamma) - [\sin\phi / (\sin\gamma \tan\beta)] \} \quad (10)$$

### 3. 실험

측정지에서 일사센서를 설치할 입지를 선정할 시에는 일사센서의 감지부 면이 태양광선이 잘 받아들일 수 있도록 주위의 장애물로부터 충분히 떨어진 장소를 물색하여야 한다. 만약 이와 같은 장소를 구하기 곤란한 경우에는 최소한 동북동(ENE)쪽에서 남(S)쪽을 경유하여 서북서(WNS)쪽에 이르는 수평방향에 장애물이 없는 곳을 선정하여야 하며, 혹 장애물이 없더라도 그 높이가 수평방향에서 5도 이상 높이 있지 않은 장소를 선정하여야 한다. 따라서 이와 같은 점을 고려하여 측정기기의 설치위치는 비교적 높아 주변의 장애물의 영향이 적은 한국에너지기술연구원내 건물의 옥상(36° 22'N, 127° 22'E)으로 정하였다.

또한, 경사면 태양광에너지 측정을 위하여 측정지에 일사센서를 남향 수평면에 대한 경사각도 0도에서 90도 사이에 15도씩 변환하여 7개를 설치하였으며, 또한 동향 및 서향, 그리고 북향면의 경사각도 90도에 각각 1개씩 설치하여 총 10개를 설치하였다. 이와 같이 설치된 시스템에 의하여 측정되

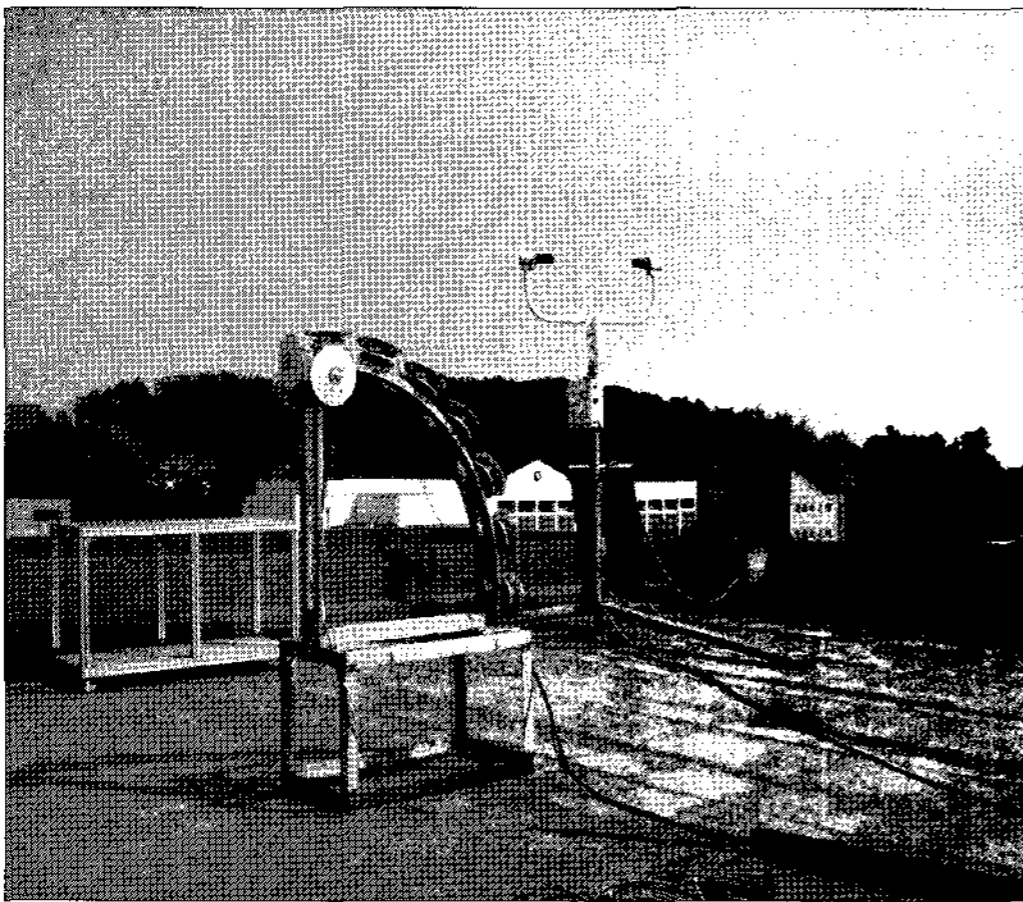


그림 1. 방위별 경사면일사량 측정시스템 설치전경

는 데이터는 통제소에 설치된 데이터 프로세서의 원격제어에 의해 기존 랜통신 인터페이스를 통하여 원격거리 전송되며, 전송된 데이터는 다시 데이터 화일로 구분하여 하드디스크에 저장시켜 각종 데이터의 분석 및 전산처리를 행할 수 있다. 이와 같이 통제소에서 전산 처리되고 있는 전산프로그램은 데이터 회수 및 처리용 프로그램(data retrieval and process program)으로 이를 통하여 시간별 일사량 자료를 전송 받아 데이터베이스로 재처리해서 저장하고, 이를 지속적으로 보완할 수 있도록 하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 양적비교 분석

한국에너지기술 연구원이 위치한 대전지방에서 1996년 8월부터 2005년 12월까지 9년 5개월간 매 시간마다 측정된 실측자료를 토대로 태양광시스템 설계를 위한 각 방위별 수직면 태양광에너지를 분석하여 보면, 표 1에서 나타난 바와 같이 전기간에 걸쳐 남향 수직면에서 받는 태양광은 동, 서향 수직면에 비해 1.5배 정도로 나타났으나, 북향 수직면에 비해서는 무려 4배나 높게 나타났다.

또한, 표 2와 그림 2에서 보는 바와 같이 남향에서 지표면에 대한 경사각도가 0°~90° 사이의 집광면에서는 경사각도가 30°에서 최대의 태양광을 받는 것으로 나타났다.

계절별로는 표 3과 그림 3에서 보는 바와 같이 난방기간인 겨울철의 경우 정남향 수직면에서 받는 태양광은 동, 서향 수직면에 비해 약 2.6배 정도 크고, 수평면 전일사량보다도 1.5배 많은 태양광에너지를 받는 것으로 나타났으며, 북향 수직면에서 받는 태양광보다는 무려 9배나 큰 것으로 나타났다.

여름철의 경우는 북향을 제외한 동, 서향 수직면에서 받는 태양광에 비해 다소 적게 나타난 반면

표 1. 방위별에 따른 경사면일사량 비교

(단위 : kWh/m<sup>2</sup>/day)

수평면 전일사량	집열면 방위	경사면 일사량	정남향 경사면과의 비교						수평면 전일사량 과의 비교
			15°	30°	45°	60°	75°	90°	
3.36	S(β=15°)	3.88	1.00	0.94	0.97	1.10	1.28	1.52	1.15
	S(β=30°)	4.10	1.05	1.00	1.03	1.16	1.36	1.60	1.21
	S(β=45°)	3.98	1.02	0.97	1.00	1.13	1.32	1.56	1.18
	S(β=60°)	3.52	0.90	0.85	0.88	1.00	1.16	1.38	1.04
	S(β=75°)	3.01	0.77	0.73	0.75	0.85	1.00	1.18	0.88
	S(β=90°)	2.55	0.65	0.62	0.64	0.72	0.84	1.00	0.73
	E(β=90°)	1.68	0.43	0.40	0.42	0.47	0.55	0.65	0.48
	W(β=90°)	1.65	0.42	0.40	0.41	0.46	0.54	0.64	0.48
	N(β=90°)	0.68	0.17	0.16	0.17	0.19	0.22	0.26	0.18

표 2. 남향면에서의 월별 경사면 태양광에너지 비교  
(단위 : kWh/m<sup>2</sup>/day)

각도 \ 월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	평균
0°	1.99	2.74	3.60	4.47	4.60	4.88	3.90	3.68	3.53	2.99	2.06	1.85	3.36
15°	2.80	3.56	4.28	4.98	4.84	4.92	3.99	3.89	4.03	3.76	2.82	2.70	3.38
30°	3.41	4.02	4.60	5.03	4.69	4.71	3.83	3.85	4.22	4.23	3.34	3.28	4.10
45°	3.65	4.28	4.52	4.62	4.15	4.13	3.35	3.48	4.02	4.33	3.59	3.62	3.98
60°	3.59	4.03	4.03	3.84	3.28	3.31	2.63	2.85	3.51	4.02	3.48	3.60	3.52
75°	3.43	3.70	3.49	3.08	2.46	2.55	1.97	2.22	2.94	3.59	3.27	3.45	3.01
90°	3.26	3.39	3.00	2.36	1.75	1.92	1.39	1.64	2.38	3.19	3.04	3.30	2.55

표 3. 계절별에 따른 경사면 태양광에너지  
(단위 : kWh/m<sup>2</sup>/day)

구분 \ 계절	봄	여름	가을	겨울	연평균
HOR (β=0°)	4.22	4.15	2.86	2.19	3.36
S (β=15°)	4.70	4.27	3.54	3.02	3.88
S (β=30°)	4.77	4.13	3.93	3.57	4.10
S (β=45°)	4.43	3.66	3.98	3.85	3.98
S (β=60°)	3.72	2.93	3.67	3.74	3.52
S (β=75°)	3.01	2.25	3.27	3.53	3.01
S (β=90°)	2.37	1.65	2.87	3.32	2.55
E (β=90°)	2.05	1.90	1.47	1.27	1.68
W (β=90°)	2.00	1.92	1.46	1.21	1.65
N (β=90°)	0.81	1.12	0.45	0.35	0.68

에, 봄과 가을철에 정남향 수직면에서 받는 일사량은 북향을 포함하여 동, 서향 수직면에 비해 높게 나타나는 경향을 보였다.

이와 같은 결과를 미루어 보아 남쪽을 향한 수직면은 겨울철에 최대의 수광을 받는 반면에, 여름철에는 매우 수광이 적다는 점에서 시스템 설계 시에 시스템 배치를 가급적 남-북향보다는 동-서향으로 길게 하는 것이 에너지 흡수라는 측면에서 볼 때, 보다 효과적임을 증명하고 있다.

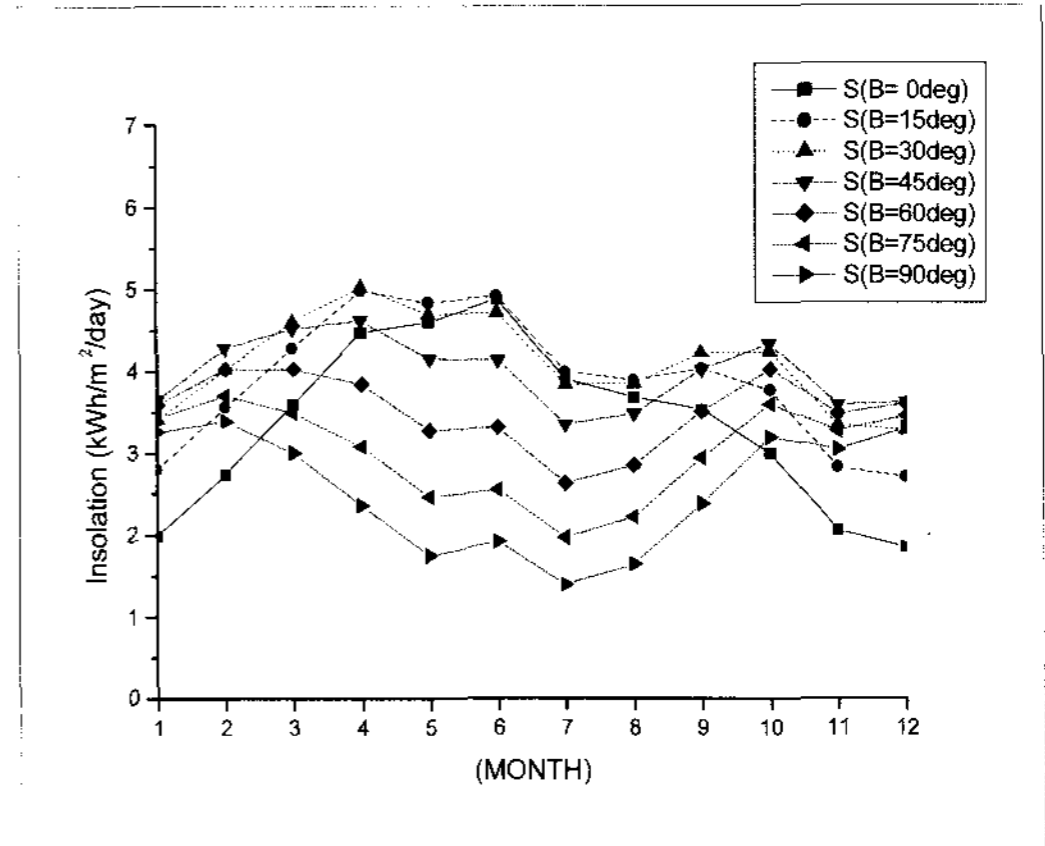


그림 2. 월별에 따른 경사면별 태양광에너지

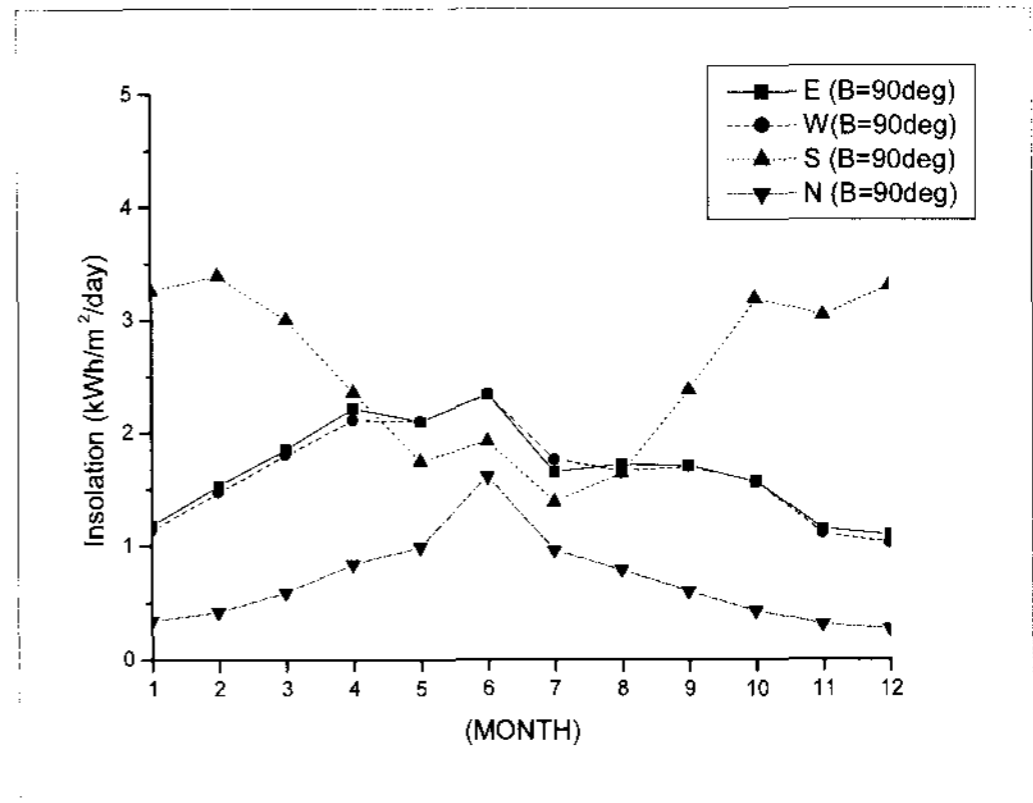


그림 3. 월별에 따른 방위별 수직면 경사면 태양광에너지

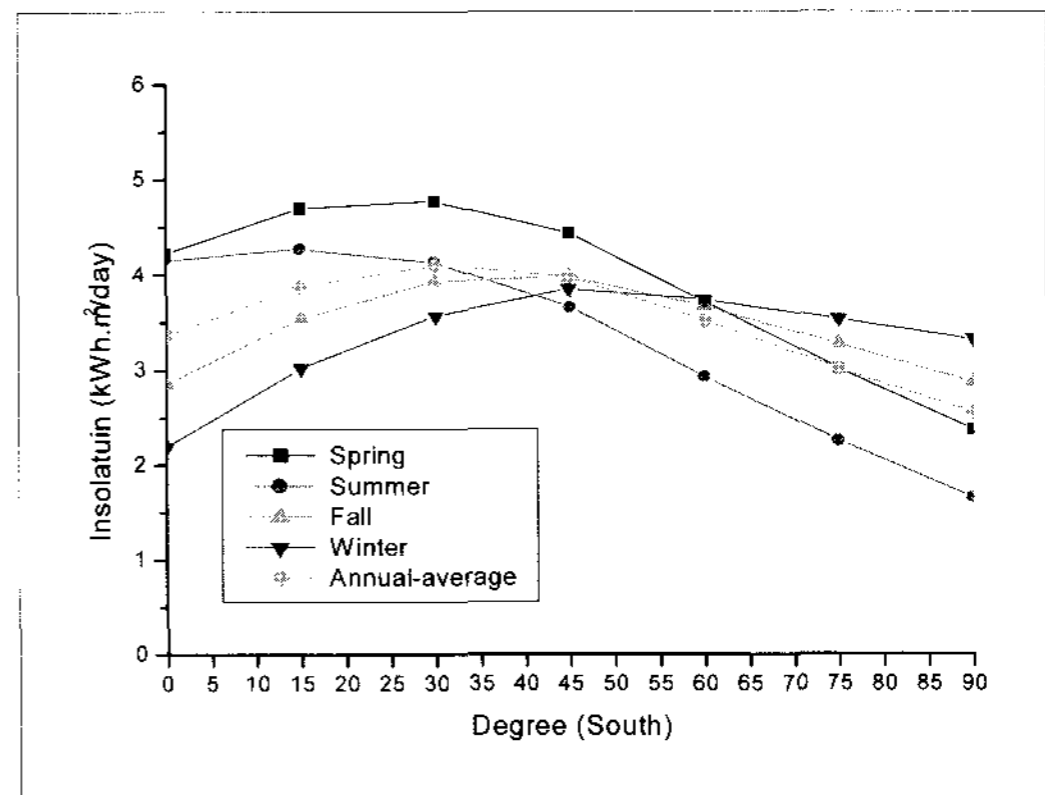


그림 4. 남향면에서의 계절별 경사면 태양광에너지

또한, 남향면에서 경사각도별로 계절별 특성을 분석하여 보면, 그림 4에서 보는바와 같이 봄철에 지표면에 대한 경사각도가 30°인 집광면에서, 여름철은 경사각도 15°에서, 가을철과 겨울철은 경사각도 45°에서 최대의 태양광에너지를 받는 것으로 나타났다.

### 4.2 시뮬레이션 분석

여기서는 각 지역에서 지표면상에 입사되는 총 일사량, 즉 수평면 전일사량 실측데이터를 근거로 하여 수평면상에 입사되는 일사량에 대한 경사면상에 입사되는 총일사량의 비를 산출하기 위하여 우선, 수평면에서의 총일사량에 대한 산란일사량 비율과 수평면에 대한 경사면에서의 직달일사량의 비율을 산출하여 구한 후, 수평면에 대한 경사면일사량 비율을 지표면상에 입사되는 총일사량에 곱하여 경사면상에 입사하는 총일사량을 구하였다.

이 시스템을 이용하여 예측된 정남향에서의 월별 일평균 경사면 태양광에너지 값을 실측치와 비교하여 보면, 표 4와 그림 5에서 보는바와 같이 각 경사각별 예측치는 전 기간에 걸쳐 실측치와 거의 유사한 값을 나타내었다.

표 4. 남향 경사면에서의 실측치와 예측치의 비교  
(단위 : kWh/m<sup>2</sup>/day)

구분	월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	평균
15°	실측	2.80	3.56	4.28	4.98	4.84	4.92	3.99	3.89	4.03	3.76	2.82	2.70	3.88
	예측	2.58	3.36	4.00	4.45	4.62	4.53	4.07	3.88	3.81	3.46	2.68	2.53	3.66
30°	실측	3.41	4.02	4.60	5.03	4.69	4.71	3.83	3.85	4.22	4.23	3.34	3.28	4.10
	예측	3.02	3.72	4.17	4.38	4.39	4.24	3.84	3.75	3.86	3.74	3.08	3.02	3.77
45°	실측	3.65	4.28	4.52	4.62	4.15	4.13	3.35	3.48	4.02	4.33	3.59	3.62	3.98
	예측	3.30	3.90	4.13	4.11	3.99	3.81	3.48	3.47	3.73	3.84	3.32	3.34	3.70
60°	실측	3.59	4.03	4.03	3.84	3.28	3.31	2.63	2.85	3.51	4.02	3.48	3.60	3.52
	예측	3.39	3.86	3.89	3.67	3.44	3.26	3.00	3.06	3.43	3.74	3.37	3.48	3.47
75°	실측	3.43	3.70	3.49	3.08	2.46	2.55	1.97	2.22	2.94	3.59	3.27	3.45	3.01
	예측	3.29	3.62	3.46	3.08	2.80	2.62	2.45	2.55	2.99	3.45	3.25	3.42	3.08
90°	실측	3.26	3.39	3.00	2.36	1.75	1.92	1.39	1.64	2.38	3.19	3.04	3.30	2.55
	예측	3.02	3.20	2.88	2.39	2.09	1.95	1.88	1.97	2.42	3.00	2.95	3.17	2.58

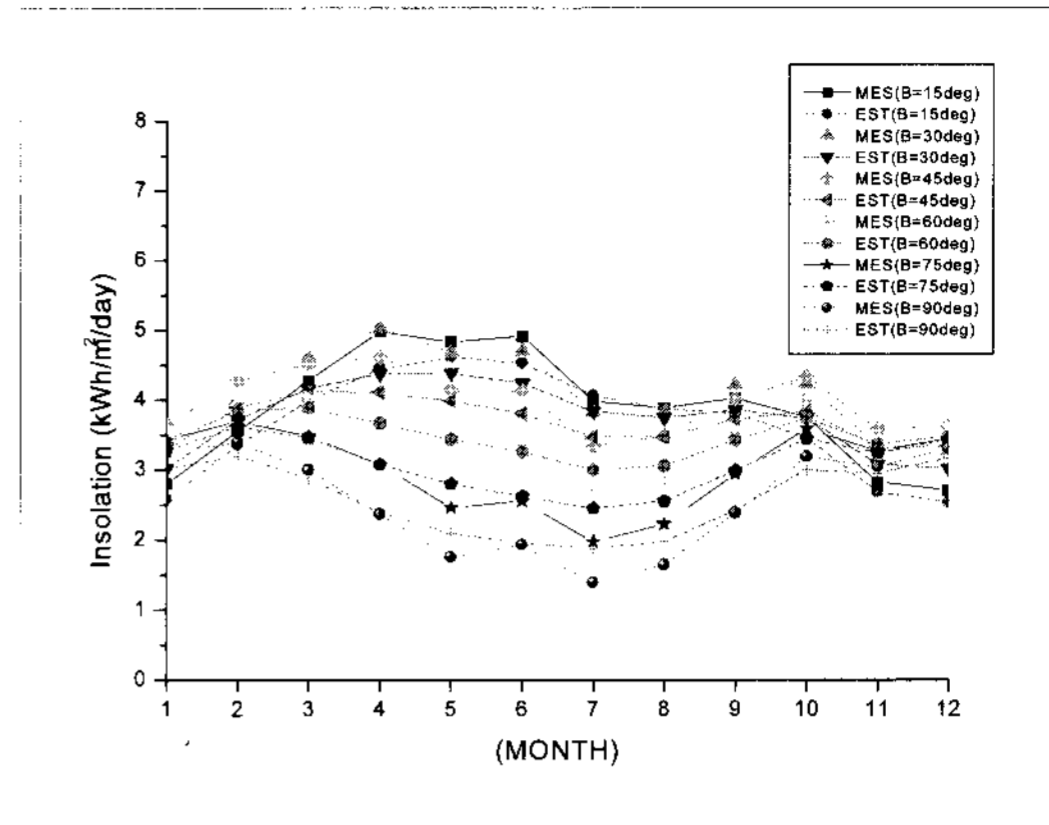


그림 5. 남향 경사면에서의 실측치와 예측치와의 비교

### 5. 결론

한국에너지구원이 위치한 대전지방에서 1996년 8월부터 2005년 12월까지 9년 5개월간 매 시간마다 측정된 방위별 경사면일사량 분석결과를 살펴보면,

- 1) 전 기간에 걸쳐 남향 수직면에서 받는 태양광은 동, 서향 수직면에 비해 1.5배 정도로 나타났으나, 수직면에 비해서는 무려 4배나 높게 나타났으며, 남향에서 지표면에 대한 경사각도가 0° ~ 90° 사이의 집열면에서는 경사각도가 30°에서 최대의 일사량을 받는 것으로 나타났다.
- 2) 계절별로는 난방기간인 겨울철의 경우 정남향 수직면에서 받는 일사량은 동, 서향 수직면에 비해 약 2.6배정도 크고, 수평면 전 일사량보다도 1.5배 많은 일사량을 받는 것으로 나타났으며, 북향 수직면에서 받는 일사량보다는 무려 9배나 큰 것으로 나타났다. 여름철의 경우는 북향을 제외한 동, 서향 수직면에서 받는 일사량에 비해 다소 적게 나타난 반면에, 봄과 가을철에 정남향 수직면에서 받는 일사량은 북향을 포함하여 동, 서향 수직면에 비해 높게 나타나는 경향을 보였다.
- 3) 남향면에서 경사각도별로 계절별 특성을 분석하여 봄철에서는 지표면에 대한 경사각도가 30°



인 집열면에서, 여름철은 경사각도 15°에서, 가을철과 겨울철은 경사각도 45°에서 최대의 일사량을 받는 것으로 나타났다. 이는 계절별에 따른 서로 다른 태양고도가 경사면에 입사하는 일사조건에 상당한 영향을 미치고 있기 때문으로 믿어진다.

그러나, 현재까지의 결과만을 가지고 전반적인 우리나라 전 지역에 대한 정확한 방위별 경사면일사량 산출은 아직 어려운 실정이다. 이에 따라 여러 지역에 대한 장기적인 방위별을 포함한 경사각도별 태양에너지 강도 측정뿐만 아니라 운량이나 대기오염도에 따른 일사량의 변동형태 등 각종 기후조건과의 연관성을 규명하여 우리나라 전지역에 적합한 방위별 경사면일사량 산출을 위한 모형을 유추해 나아갈 계획이다.

### 후 기

본 연구는 산업자원부의 연구비지원으로 수행되

었음 (과제번호 : 2004-N-NC02-P-01).

### 참 고 문 헌

1. J.A. Duffie and W.A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Process, Wiley New York, pp. 3- 145, 1991.
2. D. Feuermann, and A. Zemel, Validation of Models For Global Irradiance, on Inclined Planes, Solar Energy, Vol. 48, No. 1, pp. 59-66, 1992.
3. T.M. Klucher, Evaluation of Models to Predict Insolation on Tilted Surface, Solar Energy, Vol. 23, pp. 111-114, 1992.
4. J.L. Wise, Analysis of Solar Radiation Measurements on An Inclined Surface in Anchorage Alaska, AEIDC Publication, 1980.
5. 기상청, "기상년·월보", 1982 ~ 2005