

국내 태양열시스템 설치를 위한 시스템 최적 설치각 산출을 통한 최대 경사면일사량 분석

조덕기*, 강용혁*

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

Analysis of Maximum Solar Radiation on Inclined Surfaces for the Installation of Solar Thermal Systems in Korea Using the Optimum Installation Angle

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 solar thermal systems. To optimize the incident solar radiation, the slope, that is the angle between the plane surface in question and the horizontal, and the solar azimuth angles are needed for these solar thermal systems. This is because the performance of the solar thermal 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 solar thermal systems will be provided for designers and employees working in the solar collector related industries.

Keywords : 태양열시스템 (Solar Thermal System), 경사면 (Inclined Surface), 태양복사 (Solar Radiation)

기 호 설 명

\bar{R} : 수평면에 대한 경사면에서의 월별 1일
평균 일사량의 비

K_T : 월별 1일 평균 일사율(\bar{H}/\bar{H}_0)
 \bar{H}_T : 월별 1일 평균 경사면일사량

투고일자 : 2009년 03월 04일, 심사일자 : 2009년 03월 09일, 게재확정일자 : 2009년 04월 02일
교신저자 : 조덕기(dokkijo@kier.re.kr)

- H : 수평면에서의 월별 1일 평균 총일사량
- H_o : 해당지방의 월평균 대기권밖 일사량
- H_{bT} : 경사면 직달일사량
- H_d : 월별 1일 평균 산란일사량
- R_b : H_{bT}/H
- ρ : 지면반사율
- φ : 해당지방의 위도
- δ : 일적위 = 23.45 sin (360 · 284n/365)
- β : 수평면에 대한 집열면의 경사각도
- G_{sc} : 태양상수
- γ : 표면방위각
- ω_S : 수평면일몰시간각

1. 서 론

최근 태양에너지의 사업 수행지역이 확대됨에 따라 태양열시스템의 설계기준 및 이에 따른 설계 자료로서 해당 지역에 대한 최적 일사자료가 매우 절실히 요구되고 있다. 태양열시스템은 주로 태양에너지의 입사각도에 따라 시스템 효율 및 성능이 크게 좌우되고 있어 방위별에 따라 경사면에 입사되는 일사량은 태양에너지 수집장치인 태양열 집열판이나 온수기 설치 시에 매우 중요한 자료로 널리 이용되고 있다. 즉, 직접적으로 태양열시스템의 성능에 미치는 효과는 설치각도나 향에 따라 좌우되는 태양에너지 양에 크게 영향을 받기 때문에 경사면상에 입사되는 일사량 데이터는 매우 중요하다.

본 연구에서는 이와 같은 중요성을 감안하여 방위별 경사각도에 따른 태양에너지 강도 측정실험을 통하여 태양열시스템 최적이용에 적합한 최대 일사량을 받을 수 있는 경사각도를 산출하여 태양열시스템 설계자 및 관련 산업체 종사자들에게 최적시스템 설계 기준을 제시하고자 한다.

2. 이론적 배경

태양열시스템을 설계할 때에는 필연적으

로 수평면에 대한 경사면에서의 월별 1일 평균 일사량 값이 고려되어야 한다. 태양열 집열기 등의 설치 위치와 각도에 따라 성능이 크게 좌우되기 때문에 추가 비용 없이 가장 쉽게 성능향상을 기대할 수 있기 때문이다. 이 값은 월별 1일 평균 직달일사량과 산란일사량, 그리고 지표면 반사 일사량의 합으로부터 구할 수 있으며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \overline{H}_T = \overline{H} \left(1 - \frac{\overline{H}_d}{\overline{H}}\right) \overline{R}_b + \overline{H}_d \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) \\ + \overline{H} \rho \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서, $\overline{H}_d/\overline{H}$ 는¹⁾²⁾ 수평면에서의 월별 1일 평균 총일사량에 대한 산란일사량의 비율을 말하며, \overline{R}_b 는 해당 달의 월평균 1일 값으로 수평면에서의 총일사량에 대한 경사면 직달 일사 비율인 $\overline{H}_{bT}/\overline{H}$ 를 의미한다. 이에 대한 공식은 다음의 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\overline{H}_d}{\overline{H}} = 0.775 + 0.00653(\omega_s - 90) \\ - [0.505 + 0.00455(\omega_s - 90)] \cos(115K_T - 103) \end{aligned} \quad (2)$$

위의 식 (2)에서 해당지방의 월평균 대기권 밖 일사량 \overline{H}_o 는 다음의 식 (3)으로 정의되어 있다.

$$\begin{aligned} \overline{H}_o = \frac{24 \times 3600}{\pi} G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365}\right] \\ \times \left[\cos\phi \cos\delta \sin\omega_s + \frac{2\pi\omega_s}{360} \sin\phi \sin\delta\right] \end{aligned} \quad (3)$$

식 (1)의 \overline{R}_b 값³⁾⁴⁾은 해당 달의 1일 월평균

- 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.

일사량 값에 대하여 수평면에서의 월별 1일 평균 총일사량에 대한 경사면 직달일사량의 비율을 말한다.

식 (4)는 북반구에서 적도를 향한 경사면, 즉 방위각이 정남을 향한 경우를 나타내며, \bar{R}_b 값은 다음 식으로 정의된다.

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\phi - \beta)\cos\delta\sin\omega'_s + (\frac{\pi}{180})\omega'_s\sin(\phi - \beta)\sin\delta}{\cos\phi\cos\delta\sin\omega_s + (\frac{\pi}{180})\omega_s\sin\phi\sin\delta} \quad (4)$$

위의 식 (4)에서 경사면 일몰시간각인 ω'_s 는 해당월 평균일의 대표적인 일적위 값을 적용하여 다음의 식 (5)에 의해 산출된다.

북반구의 경우,

$$\omega'_s = \min\left\{\cos^{-1}(-\tan\phi\tan\delta), \cos^{-1}[(-\tan(\phi - \delta)\tan\delta)]\right\} \quad (5)$$

방위각이 정남을 향한 경우가 아닐 경우 식(4)는 사용하지 못한다. 그러나 이 경우 Klein(1997)에 의해 정의된 식을 사용하여 \bar{R}_b 값을 구할 수가 있다. 그 식은 다음의 식 (6)에서 식 (10)으로 정의되어 있다.

$$\bar{R}_b = \frac{\left\{\begin{array}{l} (\cos\beta\sin\delta\sin\phi)(\omega_{ss} - \omega_{sr})(\pi/180) \\ - (\sin\delta\cos\phi\sin\beta\cos\gamma)(\omega_{ss} - \omega_{sr})(\pi/180) \\ + (\cos\phi\cos\delta\cos\beta)(\sin\omega_{ss} - \sin\omega_{sr}) \\ + (\cos\delta\cos\gamma\sin\phi\sin\beta)(\sin\omega_{ss} - \sin\omega_{sr}) \\ - (\cos\delta\sin\beta\sin\gamma)(\cos\omega_{ss} - \cos\omega_{sr}) \end{array}\right\}}{2(\cos\phi\cos\delta\sin\omega_w + (\pi/180)\omega_s\sin\phi\sin\delta)} \quad (6)$$

여기에서, ω_{sr} 과 ω_{ss} 는 각각 경사면에서의 일출, 일몰 시간각으로 다음의 식으로 나타낸다.

서쪽방위를 향한 경우 ($r > 0$),

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

$$\omega_{ss} = \min\left\{\omega_s, \arccos\left[\frac{AB - \sqrt{A^2 - B^2 + 1}}{A^2 + 1}\right]\right\} \quad (7)$$

동쪽방위를 향한 경우 ($r < 0$),

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

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

$$A = \frac{\cos\phi}{(\sin\gamma\tan\beta)} + \frac{\sin\phi}{\tan\gamma}$$

$$B = \tan\delta\left\{\frac{\cos\phi}{\tan\gamma} - \frac{\sin\phi}{[\sin\gamma\tan\beta]}\right\} \quad (9)$$

3. 실험결과 및 고찰

앞 절의 이론적 배경을 바탕으로 지표면상에 입사되는 총일사량, 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 예측하였다.

우선 한국에너지기술연구원이 위치한 대전지방에서 1996년 8월부터 2005년 12월까지 9년 5개월간 매 시간마다 측정된 실측자료와 경사면상에 입사하는 총일사량을 예측한 결과와 비교하여 보면, 표 1에서 보는바와 같이 각 경사각별 예측치는 전 기간에 걸쳐 실측치와 거의 유사한 값을 나타내었다.

또한, 앞 절의 이론적 배경을 바탕으로 산출된 우리나라 주요지역별 시스템 최적 경사각과 이에 따른 최적 경사각으로 설치된 면에서 표 2와 표 3에서 보는바와 같이 하루에

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.

표 1. 남향 경사면에서의 실측치와 예측치의 비교

(단위 : kWh/m²/day)

구분	월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	평균
15°	실측	2173	3.56	4.28	4.89	4.80	4.97	3.99	3.89	4.03	3.76	2.82	2.69	3.87
	예측	2.51	3.25	3.94	4.60	4.55	4.76	3.83	3.70	3.75	3.45	2.56	2.42	3.61
45°	실측	3.33	4.01	4.60	4.93	4.65	4.76	3.83	3.85	4.21	4.23	3.34	3.29	4.09
	예측	2.92	3.59	4.10	4.52	4.33	4.46	3.62	3.58	3.80	3.74	2.93	2.87	3.70
75°	실측	3.54	4.28	4.52	4.54	4.11	4.18	3.35	3.48	4.02	4.33	3.59	3.63	3.97
	예측	3.18	3.75	4.06	4.25	3.94	4.01	3.29	3.31	3.67	3.83	3.15	3.17	3.63
60°	실측	3.48	4.03	4.03	3.78	3.26	3.36	2.63	2.85	3.51	4.02	3.48	3.61	3.50
	예측	3.26	3.71	3.82	3.79	3.41	3.43	2.85	2.93	3.38	3.73	3.19	3.28	3.40
75°	실측	3.32	3.70	3.49	3.03	2.44	2.60	1.97	2.22	2.94	3.59	3.27	3.45	3.00
	예측	3.16	3.48	3.40	3.19	2.79	2.77	2.35	2.45	2.94	3.44	3.07	3.21	3.02
90°	실측	3.14	3.39	3.00	2.33	1.73	1.99	1.39	1.64	2.38	3.19	3.04	3.29	2.54
	예측	2.88	3.06	2.83	2.48	2.12	2.10	1.83	1.91	2.38	2.98	2.78	2.96	2.53

최대로 받을 수 있는 연평균 경사면일사량은 30.9°에서 3,629 kcal/m²인 것으로 나타났으며, 봄철은 18.4°에서 3,993 kcal/m², 여름철은 2.8°에서 3,720 kcal/m², 가을철은 44.4°에서 3,433 kcal/m², 겨울철은 57.8°에서 3,369 kcal/m², 그리고 난방기간(HP) 동안은 51.9°에서 3,430 kcal/m²으로 각각 나타났다.

계절별로는 연중 최대 경사면일사량 조건은 봄철과 여름철이 가장 좋으며, 가을철과 겨울철, 그리고 난방기간 동안은 연 평균치에 다소 못 미치는 낮은 수준인 것으로 나타났다. 연 평균치에 대한 계절별 최대 경사면일사량 조건은 봄과 여름철은 각각 10%, 2% 높았으며, 반면에 가을철과 겨울철은 6%, 8%, 그리고 난방기간 동안은 6% 상대적으로 다소 낮았다.

우리나라 전 지역에 대한 시스템 최적경사각 산출을 위한 시뮬레이션 결과, 그림 1에서 나타난바와 같이 대부분 지역의 연평균 최적 시스템 설치경사각은 남향 30° ~ 36° 부근에서 최대 경사면일사량을 받아들이는 것으로 나타났다. 분포상 특징을 살펴보면, 최적 경사각은 차령산맥 및 노령산맥을 경계로 하여 호남지방과 남해중서부지방 일원이 30°, 제주도지방이 24°, 태백산맥 대관령 일대가 36°로 나타났으며, 그 외의 대부분 지역에서는 33°인 것으로 나타났다.

표 2. 수평면 전일사량과 최대 경사면일사량과의 비교

(단위 : kWh/m²/day)

구분	계절	봄	여름	가을	겨울	HP	연평균(A)
최대 경사면 일사량(B)		3,993	3,720	3,433	3,369	3,430	3,629
수평면 전일사량(C)		3,843	3,719	2,704	2,076	2,387	3,086
B/A		1.10	1.02	0.94	0.92	0.94	1.00
B/C		1.03	1.00	1.26	1.62	1.43	1.17

* HP: 난방기간(10월~3월)

표 3. 계절별 시스템 최적 경사각의 변동추이(남향 기준)

(단위 : Degree)

구분	계절	봄	여름	가을	겨울	HP	연평균
춘천		18	3	45	60	54	33
강릉		21	3	45	60	54	36
서울		18	3	45	57	54	33
원주		21	3	45	60	54	33
서산		21	3	45	60	54	33
청주		18	3	45	60	51	33
대전		18	3	45	57	51	33
포항		18	3	45	57	54	33
대구		18	3	45	57	51	33
진주		18	3	42	57	51	33
광주		18	3	45	57	51	33
부산		18	3	45	57	51	33
목포		18	3	45	57	51	33
제주		15	0	39	51	45	24
전주		18	3	45	57	51	33
영주		18	3	45	60	54	33
평균		18.4	2.8	44.4	57.8	51.9	30.9

반면에, 같은 기간 난방기간(10월~3월) 동안에 산출된 최적경사각은 그림 2에서 나타낸바와 같이 제주도를 제외한 대부분 지역의 연평균 최적 시스템 설치경사각은 남향 51° ~ 54° 부근에서 최대의 일사를 수월 받는 것으로 나타났다. 또한 계절별 전국의 시스템 최적 경사각 분포는 그림 3~그림 6과 같다.

한편, 그림 7은 최적 시스템 설치경사각에서 얻을 수 있는 전국의 연평균 최대 경사면일사량을 표시한 것이며, 하루에 3,128 kcal/m²에서 3,757 kcal/m²의 분포로 전국적으로 고른 분포형태를 나타내었다. 지역적으로는

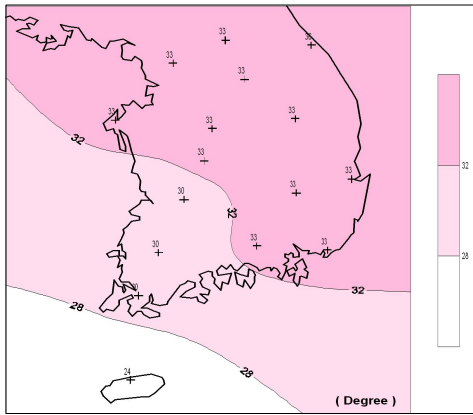


그림 1. 전국 정남기준 연평균 최적 시스템 설치경사각 산출도

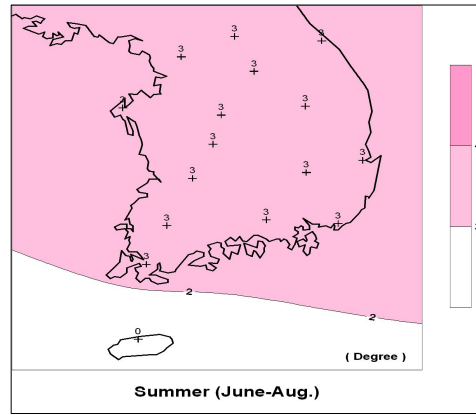


그림 4. 전국 정남기준 여름철 최적시스템 설치경사각 산출도

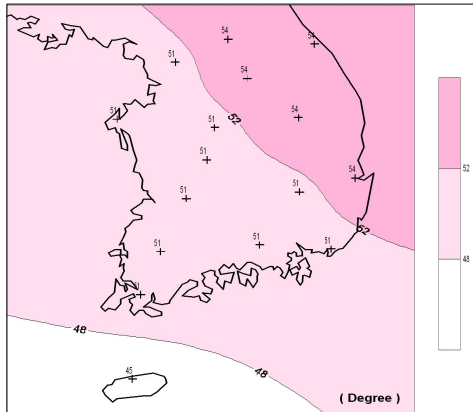


그림 2. 전국 정남기준 평균 난방기간 최적 시스템 설치경사각 산출도

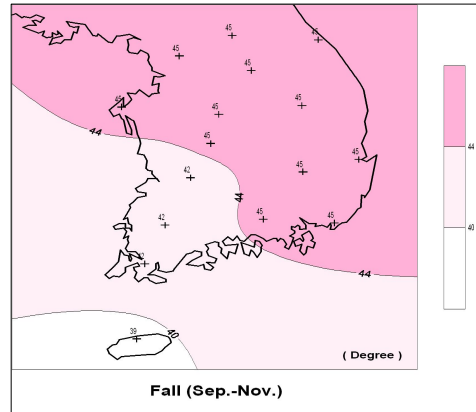


그림 5. 전국 정남기준 가을철 최적시스템 설치 경사각 산출도

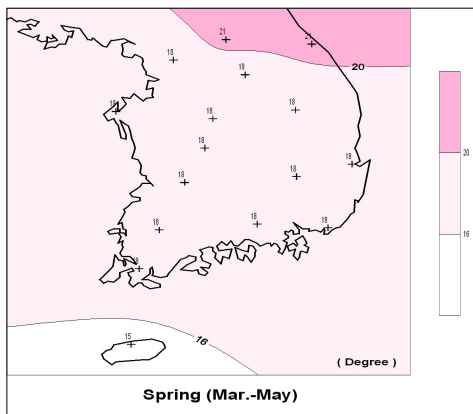


그림 3. 전국 정남기준 봄철 최적시스템 설치경사각 산출도

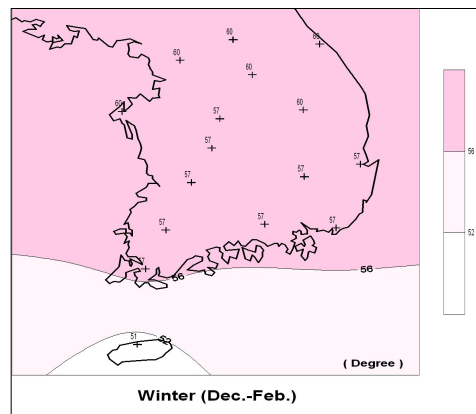


그림 6. 전국 정남기준 겨울철 최적시스템 설치 경사각 산출도

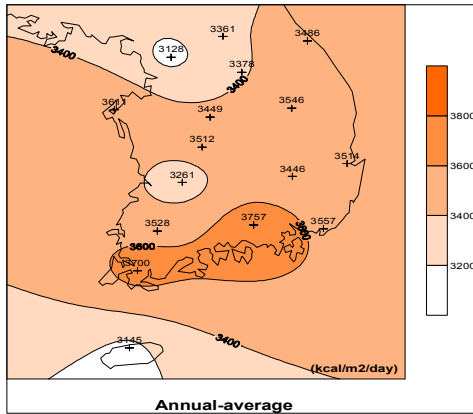


그림 7. 전국 정남기준 연평균 최대 경사면일사량

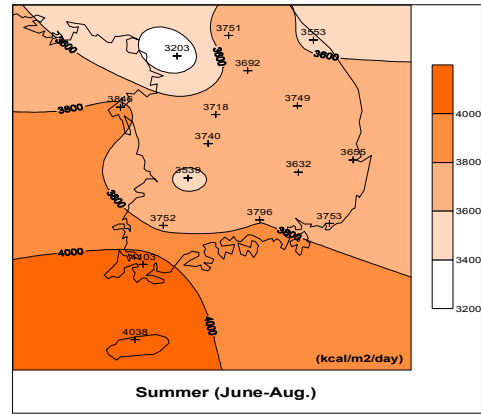


그림 10. 전국 정남기준 여름철 최대 경사면일사량

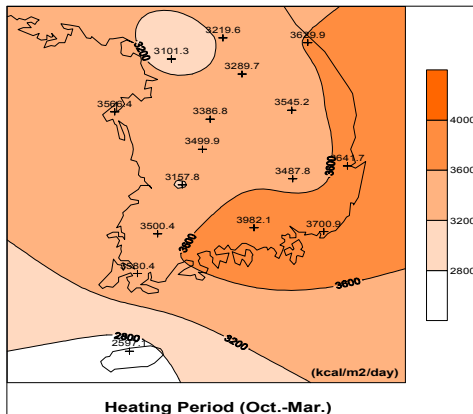


그림 8. 전국 정남기준 난방기간 최대 경사면일사량

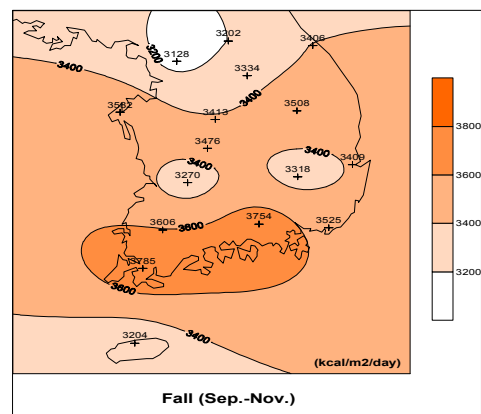


그림 11. 전국 정남기준 가을철 최대 경사면일사량

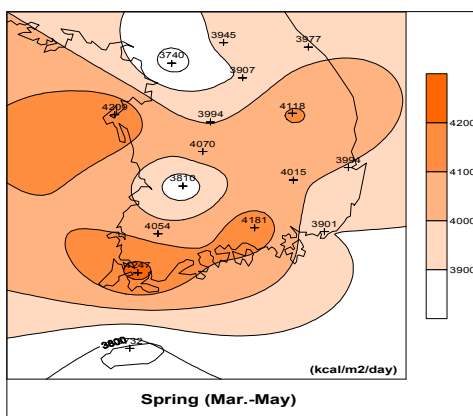


그림 9. 전국 정남기준 봄철 최대 경사면일사량

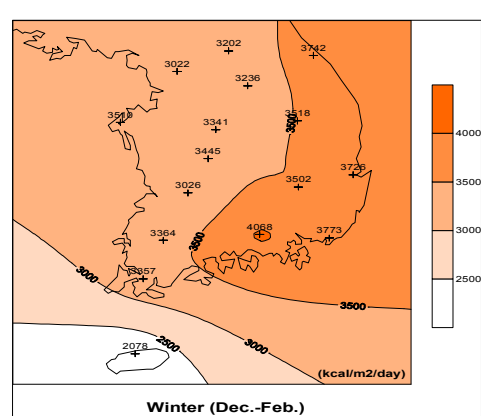


그림 12. 전국 정남기준 겨울철 최대 경사면일사량

표 4. 계절별 최대 경사면일사량의 변동추이(남향 기준)
(단위: kcal/m²/day)

구분 \ 계절	봄	여름	가을	겨울	HP	연평균
춘천	3945	3751	3202	3202	3220	3361
강릉	3977	3553	3406	3742	3630	3486
서울	3740	3203	3128	3022	3101	3128
원주	3907	3692	3334	3236	3290	3378
서산	4209	3846	3582	3510	3566	3611
청주	3994	3718	3413	3341	3387	3449
대전	4070	3740	3476	3445	3500	3512
포항	3994	3655	3409	3726	3642	3514
대구	4015	3632	3318	3502	3488	3446
전주	3810	3539	3270	3026	3158	3261
광주	4054	3752	3606	3364	3500	3528
부산	3901	3753	3525	3773	3701	3557
목포	4247	4103	3785	3357	3580	3700
제주	3732	4038	3204	2078	2597	3145
진주	4181	3796	3754	4068	3982	3757
영주	4118	3749	3508	3518	3545	3546
평균	3993	3720	3433	3369	3430	3629

남해 중서부 해안지방과 태안반도 일대의 일사량이 크게 나타났으며, 반면 전주지방과 서울지방의 경우는 낮게 나타났다.

계절별로 전국의 시스템 최적 경사각 설치시의 최대 경사면일사량은 그림 8에서 그림 12로 나타내었다.

봄철의 최대 경사면일사량은 하루에 3,740 kcal/m²에서 4,247 kcal/m² 사이로 전국적으로 고른 분포를 나타내었으며 연평균 최대 경사면일사량 분포와 비슷한 형태로 나타났다. 또한 여름철의 최대 경사면일사량은 3,203 kcal/m²에서 4,403 kcal/m² 사이로 남해 서부 해안지방과 제주도 지방의 일원이 높게 나타났다. 반면에 서울지방과 전주지방이 타 지역에 비해 낮게 나타나는 경향을 보였다.

또한, 가을철 최대 경사면일사량은 3,128 kcal/m²에서 3,785 kcal/m² 사이로 중북부지방에서 남해 중서부지방으로 갈수록 일사량 분포가 높게 나타나는 경향을 보였으며, 겨울철 최대 경사면일사량은 2,078 kcal/m²에서 4,068 kcal/m² 사이로 동해 해안지방과 남해 동부 해안지방으로 갈수록 일사량분포가 높

게 나타나는 현상을 보였으며, 제주지방 일원은 전국에서 제일 낮게 나타나는 현상을 보였다.

난방기간 동안의 최대 경사면일사량은 하루에 2,597 kcal/m²에서 3,982 kcal/m²의 분포로 전국적으로 겨울철 분포와 유사하게 나타나는 형태를 보였다.

4. 결 론

한국에너지기술연구원이 1982년부터 2005년까지 매 시간마다 측정된 실측 자료를 토대로 전국의 최적 태양열시스템 설치각 산출과 이 시스템 최적 경사각으로 얻을 수 있는 최대 경사면일사량을 예측하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 우리나라 주요 지역별 시스템 최적 경사각과 이에 따른 최적 경사각으로 설치된 면에서 하루에 최대를 받을 수 연평균 경사면일사량은 30.9°에서 3,629 kcal/m²인 것으로 나타났으며, 봄철은 18.4°에서 3,993 kcal/m², 여름철은 2.8°에서 3,720 kcal/m², 가을철은 44.4°에서 3,433 kcal/m², 겨울철은 57.8°에서 3,369 kcal/m², 그리고 난방기간(HP) 동안은 51.9°에서 3,430 kcal/m²으로 각각 나타났다.
- (2) 계절별로는 연중 최대 경사면일사량 조건은 봄철과 여름철이 가장 좋으며, 가을철과 겨울철, 그리고 난방기간 동안은 연평균치에 다소 못 미치는 낮은 수준인 것으로 나타났다. 연평균치에 대한 계절별 최대 경사면일사량 조건은 봄과 여름철은 각각 10%, 2% 높았으며, 반면에 가을철과 겨울철은 6%, 8%, 그리고 난방기간 동안은 6% 상대적으로 다소 낮았다.
- (3) 우리나라 전 지역에 대한 시스템 최적경사각 산출을 위한 시뮬레이션 결과, 대부분 지역의 연평균 최적 시스템 설치경사각은 남향 30°~36° 부근에서 최대 경사면일사

량을 받아들이는 것으로 나타났다.

- (4) 최적 시스템 설치경사각에서 얻을 수 있는 전국의 연평균 최대 경사면일사량을 표시한 것이며, 하루에 $3,128 \text{ kcal/m}^2$ 에서 $3,757 \text{ kcal/m}^2$ 의 분포로 전국적으로 고른 분포형태를 나타내었다. 지역적으로는 남해 중서부 해안지방과 태안반도 일대의 일사량이 크게 나타났으며, 반면 전주 지방과 서울지방의 경우는 낮게 나타났다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 연구비지원으로 수행되었음 (과제번호 : 2007-N-NC04-P-02).

참 고 문 헌

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. 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.
5. 기상청, “기상년·월보”, 1982 ~ 2006.