

법선면 직달일사량 예측기법을 이용한 한반도에서의 태양열발전단지 건설을 위한 최적지 선정에 관한 연구

조덕기*, 윤창열*, 김광득*, 강용혁*

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

A Study on the Estimating Direct Normal Insolation Using Horizontal Global Insolation for Solar Thermal Generation System Installation in Korea

Jo, Dok-Ki* Yun, Chang-Yeol* Kim, Kwang-Deuk* Kang, Young-Heack*

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

Abstract

Images taken by geostationary satellite may be used to estimate solar irradiance fluxes at earth's surface. It is based on the empirical correlation between a satellite derived cloud index and the irradiance at the ground. For the validation, estimated direct normal Insolation is compared with observed direct normal Insolation at 16 sites over the Korean peninsula from January 1982 to December 2010. Estimated direct normal Insolation shows reliable results with average deviation of -5.4 to +5.9% from the measured values and the yearly averaged direct normal Insolation of Korean peninsula was turned out to be 2.93 kW/m²/day.

Keywords : 태양열발전 (Solar Thermal Generation), 수평면 전일사량 (Horizontal Global Insolation), 법선면 직달일사량 (Direct Normal Insolation),

1. 서 론

대기권내에 입사하는 태양 빛은 대기를 구성하는 분자에 따라 흡수 및 산란되어 감쇠해서 지구 표면 위에 도달되며, 이 중 지표면상에 떨어질 때까지 입사방향이 직각인 면으로

입사하여 그 방향이 변하지 않고 직접 도달되는 성분을 법선면 직달일사량이라고 한다. 법선면 직달일사량은 태양에너지라는 측면에서 살펴보면, 태양광선을 한곳으로 모아 고온에너지를 얻도록 설계되는 고온집열시스템, 즉 태양로와 같은 기기의 개발과 보급을 위한 기초

Submit date : 2012. 2. 24, Judgement date : 2012. 3. 2, Publication decide date : 2012. 6. 12
Communication author : Yun, Chang-Yeol(yuncy@kier.re.kr)

자료로서 절실히 요구된다.

또한 청명한 날에만 측정이 가능하기 때문에 이로부터 대기의 혼탁상태를 측정할 수 있어 장기간 측정된 일사의 직달성분을 통하여 대기 혼탁상태의 경년변화와 대기 중에 포함되는 부유분진 등의 입자량에 대한 지역적, 계절적인 변화의 경향 등을 파악할 수 있다.

그러나 측정지역이 일부지역에만 국한됨에 따라 우리나라 전 지역에 대한 법선면 직달일사량 산출은 현실적으로 불가능한 실정이다. 따라서 본 연구는 날로 중요성을 더해가고 있는 태양열 발전기술이 국내에서도 빨리 정착, 실용화할 수 있도록 국내 법선면 직달일사량 자원을 보다 과학적인 방법으로 정확하게 예측, 평가하는데 그 목표를 두었다.

2. 일사에측 이론적 배경

3.1. 수평면 전일사량 예측

N이 인공위성에서 스캔(scan)하는 표적(target) 내에서 하늘(sky)에 대한 구름이 덮인 부분의 분율일 때¹⁾, 지구 지표면에 도달하는 태양복사 G_s 는 식 (1)에서와 같이 청명한 부분과 구름에 덮인 부분을 통해 두 부분에서 혼합하여 입사하는 태양복사이다.

$$G_s = (1 - N)G_{cs} + N G_{cl}, \text{ 또는}$$

$$G_s = G_{cs} + N (G_{cl} - G_{cs}) \quad (1)$$

여기서, G_{cs} 는 청명한(clear) 하늘 부분에서 지표면에 입사하는 태양복사, G_{cl} 은 흐린 하늘 부분에서 지표면에 입사하는 태양복사이다.

흐림도(cloudiness) 측정은 지표면에서 태양에너지를 예측하기 위한 목적이기 때문에 흐림도는 식 (2)에서 제시한 바와 같이 하늘

에 현존하는 구름으로 인하여 지표면에 도달하지 못하는 태양복사인 일사량으로 정의한다.

$$\text{Cloudiness} = G_{cs} - G_s, \text{ 또는}$$

$$\text{Cloudiness} = N (G_{cs} - G_{cl}) \quad (2)$$

태양복사, G_a 는 대기에 의해 흡수된 태양복사, 그리고 G_r 은 행성, 즉 지구로부터 반사된 양을 의미하며, G_r 의 양은 우주에서 인공위성의 단파장대 센서에 의해 각각 감지된다. 이에 따른 에너지보존 방정식은 식 (3)과 같다.

$$G_o = G_a + G_r + G_s (1 - A_s), \text{ 또는}$$

$$G_s = (G_o - G_a - G_r) / (1 - A_s) \quad (3)$$

여기서, A_s 은 평균 반구상의 지표면 알베도(hemispherical ground albedo)로서 지표면 위에 입사한 태양복사에 대하여 지표면으로부터 반사된 태양복사의 비율로 정의된다. 식 (3)에서 $G_s (1 - A_s)$ 의 조건은 지표면에 의해 흡수된 태양복사를 나타낸다. 이에 따라 청명한 하늘과 담천한 하늘에서의 에너지보존 방정식은 각각 식 (4)와 (5)와 같이 재 정의할 수 있다. 이들 식에서 c_s 와 c_l 은 각각 청명한 하늘과 흐린 하늘의 매개변수를 나타내며, 짧은 시간대에서의 A_s 의 변화는 무시한다.

$$G_{cs} = (G_o - G_{acs} - G_{rcs}) / (1 - A_s) \quad (4)$$

$$G_{cl} = (G_o - G_{acl} - G_{rc1}) / (1 - A_s) \quad (5)$$

한편, 태양복사를 위한 넓은 대역의 대기투과율 T 는 식 (6)에서와 같이 대기열(atmospheric column) 상단에 입사하는 대기권밖 태양복사에 대한 대기열을 통하여 지표면에 도달하는 태양복사의 비율로서 정의된다.

$$T = G_s / G_o \quad (6)$$

식 (4)와 식 (5)로부터 식 (1)의 G_{cl} 과 G_c 을

1) MD. Rafiqul Islam and R.H.B. Exell, Solar Radiation Mapping from Satellite Image Using a Low Cost System, Solar Energy, Vol. 56, No. 3, pp. 225-237, 1996.

대신하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$G_s = (G_o - G_a - G_{rcs}) / (1 - A_s) + N (G_{rcs} - G_{rc1}) / (1 - A_s) \quad (7)$$

다시 위의 식을 양변을 G_o 에 의해 나누고 식 (6)의 T 를 삽입하면, 식 (8)를 얻을 수 있다.

$$T = a + b C \quad (8)$$

계수 a 와 b 는 회귀에 의한 현장 데이터로부터 결정된다. 그에 따라 인공위성 영상으로부터의 흐림도 계수는 식 (8)에서 대기투과율을 얻기 위해 사용되어지며, 그리고 원하는 표적에서 연속적으로 지표면에 도달하는 태양복사는 식 (9)로부터 예측된다.

$$G_s = G_o T \quad (9)$$

2.2. 법선면 직달일사량 예측

DNI(Direct Normal Insolation) 예측기법에 적용된 IEA(International Energy Agency)²⁾의 방법을 살펴보면, 우선 대기외의 일사량 $I_o(kcal/m^2h)$ 를 구한다.

$$I_o = 1164 + 38 \sin [360 (89 + D) / 365] \quad (10)$$

여기서, 1164: 태양정수, D : 일 년 중의 그날의 통산일수이다.

다음은 태양의 천정각 Θ_z 을 계산한다.

$$\cos \Theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (11)$$

여기서, ϕ : 위도, δ : 일적위, ω : 시각(남중시를 0° 로 하고, 1시간을 15° 로 하여 시각을 각도로 나타냄)이다.

마지막으로 대기외의 수평면 전일사량 I_{oH}

를 구하고 관측된 지상에서의 수평면 전일사량 I_H 와의 비 pp 로부터 지상에서의 법선면 직달일사량 I_{ND} 를 추정한다.

$$I_{oH} = I_o \cos \Theta_z \quad (12)$$

$$pp = I_H / I_{oH} \quad (13)$$

$$I_{ND} = 1540 pp - 470 \quad (14)$$

단, 식 (14)의 결과에서 $I_{ND} > 860$ 이 되었을 때는 $I_{ND} = 860$ 으로, 그리고 $I_{ND} < 0$ 이 되었을 때는 $I_{ND} = 0$ 으로 한다.

여기서 산출된 I_{ND} 의 단위는 $kcal/m^2h$ 로 이 값에 0.86으로 나누어 전력단위인 kWh/m^2h 로 변환할 수 있다.

또한 하루의 시간별 수평면 전일사량 r_t 는 Collares-Pereira와 Rabl(1979)³⁾에 의해 제시된 식 (15)에서 얻어진다.

$$r_t = \pi/24 (a + b \cos \omega) \cos \omega - \cos \omega_s / \sin \omega_s - (2\pi\omega_s/360) \cos \omega \quad (15)$$

여기서 ω_s 는 일몰시각으로 $\cos \omega_s = -\tan \phi \tan \delta$ 이며,

$$a = 0.409 + 0.516 \sin (\omega_s - 60) \quad (16)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \sin (\omega_s - 60) \quad (17)$$

이다.

3. 예측치와 실측치와의 비교분석

3.1. 수평면 전일사량

임의의 지역의 수평면 전일사량을 예측하기 위하여 일부 특정지역에 대하여 미국 나사(NASA)의 지상관측시스템, GEOS-4 인공위성 등을 이용한 일사량 예측기법을 적용한 예측치와 '92.1 ~ 2010.12 기간 사이에 실제로 측정된 평균 일사량과 비교하였으며, 그 비교 결과는 표 1에 제시하였다.

3) J.A. Duffie and W.A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Process, John Wiley & Sons, Inc., 1991.

2) JSES, Basic and Application of Solar Energy, 1979.

Table. 1 Comparison between the monthly average estimated global insolation and observed global insolation in major areas
(단위 : kWh/m²/day)

지역명		월 별												연평균
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
춘 천	예측치	2.33	3.11	3.82	4.77	5.14	4.67	3.74	3.97	3.79	3.23	2.37	2.08	3.59
	실측치	2.12	2.88	3.70	4.61	5.06	5.01	4.07	4.23	3.81	3.04	2.10	1.82	3.54
	오차(%)	9.9	8.0	3.2	3.5	1.6	-6.8	-8.1	-6.1	-0.5	6.3	12.9	14.3	1.4
강 룡	예측치	2.17	2.94	3.68	4.68	5.10	4.69	3.76	3.79	3.66	3.19	2.28	1.96	3.49
	실측치	2.37	2.98	3.65	4.63	5.02	4.64	3.99	3.84	3.59	3.18	2.40	2.17	3.54
	오차(%)	-8.4	-1.3	0.8	1.1	1.6	1.1	-5.8	-1.3	1.9	0.3	-5.0	-9.7	-1.4
서 울	예측치	2.29	3.06	3.89	4.73	5.08	4.77	4.02	4.34	3.93	3.32	2.34	2.01	3.65
	실측치	2.00	2.77	3.50	4.38	4.72	4.41	3.30	3.61	3.55	3.07	2.08	1.74	3.26
	오차(%)	14.5	10.5	11.1	8.0	7.6	8.2	21.8	20.2	10.7	8.1	12.5	15.5	12.0
원 주	예측치	2.33	3.11	3.82	4.77	5.14	4.67	3.74	3.97	3.79	3.23	2.37	2.08	3.59
	실측치	2.13	2.87	3.62	4.58	5.02	4.88	3.98	4.14	3.78	3.20	2.21	1.90	3.53
	오차(%)	9.4	8.4	5.5	4.1	2.4	-4.3	-6.0	-4.1	0.3	0.9	7.2	9.5	1.7
서 산	예측치	2.10	2.99	3.92	4.82	5.16	4.93	4.50	4.76	4.12	3.42	2.32	1.86	3.74
	실측치	2.29	3.15	3.97	4.87	5.31	4.99	4.07	4.36	4.03	3.46	2.32	1.98	3.73
	오차(%)	-8.3	-5.1	-1.3	-1.0	-2.8	-1.2	10.6	9.2	2.2	-1.2	0	-6.1	0.3
청 주	예측치	2.32	3.10	3.85	4.75	5.11	4.69	3.97	4.01	3.71	3.29	2.40	2.10	3.61
	실측치	2.24	3.03	3.72	4.68	5.17	4.83	4.06	4.15	3.80	3.30	2.27	1.92	3.60
	오차(%)	3.6	2.3	3.5	1.5	-1.2	-2.9	-2.2	-3.4	-2.4	-0.3	5.7	9.4	0.3
대 전	예측치	2.32	3.10	3.85	4.75	5.11	4.69	3.97	4.01	3.71	3.29	2.40	2.10	3.61
	실측치	2.28	3.11	3.88	4.85	5.15	4.79	4.18	4.33	3.86	3.42	2.42	2.05	3.69
	오차(%)	1.8	-0.3	-0.8	-2.1	-0.8	-2.1	-5.0	-7.4	-3.9	-3.8	-0.8	2.4	-2.2
포 향	예측치	2.29	2.94	3.66	4.73	5.15	4.87	4.11	3.99	3.55	3.26	2.39	2.05	3.58
	실측치	2.47	3.14	3.78	4.76	5.14	4.75	4.13	4.17	3.52	3.30	2.61	2.33	3.68
	오차(%)	-7.3	-6.4	-3.2	-0.6	0.2	2.5	-0.5	-4.3	0.9	-1.2	-8.4	-12	-2.7
대 구	예측치	2.46	3.09	3.78	4.69	5.09	4.56	3.98	3.94	3.56	3.41	2.49	2.23	3.61
	실측치	2.33	3.04	3.83	4.71	5.08	4.70	4.07	3.99	3.56	3.28	2.45	2.18	3.60
	오차(%)	5.6	1.6	-1.3	-0.4	0.2	-3.0	-2.2	-1.3	0	4.0	1.6	2.3	0.3
전 주	예측치	2.30	3.04	3.89	4.67	5.03	4.61	4.03	4.04	3.65	3.47	2.44	2.11	3.61
	실측치	2.12	2.80	3.60	4.59	4.94	4.59	3.95	4.02	3.70	3.31	2.29	1.90	3.48
	오차(%)	8.5	8.6	8.1	1.7	1.8	0.4	2.0	0.5	-1.4	4.8	6.6	11.1	3.7
광 주	예측치	2.02	2.89	3.81	4.73	5.05	4.82	4.53	4.71	4.03	3.44	2.32	1.83	3.68
	실측치	2.32	3.10	3.90	4.83	5.16	4.65	4.10	4.27	3.89	3.56	2.55	2.10	3.70
	오차(%)	-12.9	-6.8	-2.3	-2.1	-2.1	3.7	10.5	10.3	3.6	-3.4	-9.0	-12.9	-0.5
부 산	예측치	2.39	2.99	3.62	4.63	5.11	4.75	4.18	4.13	3.49	3.30	2.46	2.18	3.60
	실측치	2.59	3.25	3.83	4.66	5.05	4.68	4.23	4.45	3.67	3.48	2.71	2.40	3.75
	오차(%)	-7.7	-8.0	-5.5	-0.6	1.2	1.5	-1.2	-7.2	-4.9	-5.2	-9.2	-9.2	-4.0
목 포	예측치	2.00	2.78	3.63	4.57	4.94	4.62	4.48	4.78	3.96	3.43	2.38	1.85	3.62
	실측치	2.31	3.14	4.03	5.01	5.36	4.92	4.51	4.89	4.17	3.75	2.62	2.08	3.90
	오차(%)	-13.4	-11.5	-9.9	-8.8	-7.8	-6.1	-0.7	-2.2	-5.0	-8.5	-9.2	-11.1	-7.2
제 주	예측치	1.88	2.72	3.64	4.70	5.20	5.40	5.03	5.23	4.34	3.77	2.55	1.83	3.86
	실측치	1.46	2.37	3.40	4.56	5.09	4.72	4.89	4.62	3.81	3.35	2.23	1.50	3.50
	오차(%)	28.8	14.8	7.1	3.1	2.2	14.4	2.9	13.2	13.9	12.5	14.3	22	10.3
진 주	예측치	2.46	3.09	3.78	4.69	5.09	4.56	3.98	3.94	3.56	3.41	2.49	2.23	3.61
	실측치	2.70	3.39	4.10	4.90	5.19	4.65	4.28	4.33	3.87	3.71	2.80	2.52	3.87
	오차(%)	-8.9	-8.8	-7.8	-4.3	-1.9	-1.9	-7.0	-9.0	-8.0	-8.1	-11.1	-11.5	-6.7
영 주	예측치	2.33	3.04	3.72	4.72	5.14	4.69	3.90	3.93	3.64	3.30	2.39	2.11	3.58
	실측치	2.25	2.98	3.8	4.72	5.16	4.80	4.06	4.10	3.78	3.28	2.36	2.06	3.61
	오차(%)	3.6	2.0	-2.1	0	-0.4	-2.3	-3.9	-4.1	-3.7	0.6	1.3	2.4	-0.8
평 균	예측치	2.25	3.00	3.77	4.71	5.10	4.75	4.12	4.22	3.78	3.36	2.40	2.04	3.63
	실측치	2.25	3.00	3.77	4.71	5.10	4.75	4.12	4.22	3.78	3.36	2.40	2.04	3.63
	오차(%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Table 2. Monthly average and annual average daily global insolation in Korea peninsular

(단위 : kWh/m²/day)

지역명	월 별												연평균
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
춘천	2.12	2.88	3.70	4.61	5.06	5.01	4.07	4.23	3.81	3.04	2.10	1.82	3.54
강릉	2.37	2.98	3.65	4.63	5.02	4.64	3.99	3.84	3.59	3.18	2.40	2.17	3.54
서울	2.00	2.77	3.50	4.38	4.72	4.41	3.30	3.61	3.55	3.07	2.08	1.74	3.26
원주	2.13	2.87	3.62	4.58	5.02	4.88	3.98	4.14	3.78	3.20	2.21	1.90	3.53
서산	2.30	3.13	3.95	4.87	5.32	5.01	4.09	4.38	4.05	3.47	2.32	1.98	3.74
청주	2.24	3.03	3.72	4.68	5.17	4.83	4.06	4.15	3.80	3.30	2.27	1.92	3.60
대전	2.28	3.11	3.88	4.85	5.15	4.79	4.18	4.33	3.86	3.42	2.42	2.05	3.69
포항	2.47	3.14	3.78	4.76	5.14	4.75	4.13	4.17	3.52	3.30	2.61	2.33	3.68
대구	2.33	3.04	3.83	4.71	5.08	4.70	4.07	3.99	3.56	3.28	2.45	2.18	3.60
전주	2.12	2.80	3.60	4.59	4.94	4.59	3.95	4.02	3.70	3.31	2.29	1.90	3.48
광주	2.32	3.10	3.90	4.83	5.16	4.65	4.10	4.27	3.89	3.56	2.55	2.10	3.70
부산	2.59	3.25	3.83	4.66	5.05	4.68	4.23	4.45	3.67	3.48	2.71	2.40	3.75
목포	2.31	3.14	4.03	5.01	5.36	4.92	4.51	4.89	4.17	3.75	2.62	2.08	3.90
제주	1.46	2.37	3.40	4.56	5.09	4.72	4.89	4.62	3.81	3.35	2.23	1.50	3.50
진주	2.70	3.39	4.10	4.90	5.19	4.65	4.28	4.33	3.87	3.71	2.80	2.52	3.87
영주	2.25	2.98	3.8	4.72	5.16	4.80	4.06	4.10	3.78	3.28	2.36	2.06	3.61
나진	1.97	2.86	3.85	4.44	4.74	4.66	4.04	3.97	3.92	3.13	2.09	1.66	3.44
청진	1.98	2.81	3.75	4.44	4.84	4.77	4.26	4.16	3.83	3.18	2.08	1.69	3.48
강진	2.05	2.96	4.00	4.71	5.23	4.96	4.37	4.32	4.01	3.37	2.21	1.76	3.66
신포	2.20	3.06	3.91	4.58	5.18	4.70	4.30	4.30	4.05	3.30	2.19	1.86	3.64
함흥	2.17	3.04	3.96	4.61	5.18	4.78	4.29	4.22	3.96	3.37	2.28	1.86	3.64
혜산	2.15	3.03	3.83	4.68	5.19	4.47	3.74	3.74	3.77	3.28	2.19	1.85	3.49
성진	2.09	2.99	3.90	4.47	5.05	4.96	4.54	4.46	4.00	3.19	2.12	1.79	3.63
풍산	2.17	3.04	3.96	4.61	5.18	4.78	4.29	4.22	3.96	3.37	2.28	1.86	3.64
강계	2.22	3.11	3.95	4.62	5.20	4.75	4.22	4.18	4.05	3.27	2.19	1.85	3.63
희천	2.22	3.11	3.95	4.62	5.20	4.75	4.22	4.18	4.05	3.27	2.21	1.85	3.63
신의주	2.18	3.03	3.91	4.71	5.19	4.76	3.81	4.08	4.06	3.20	2.20	1.80	3.58
구성	2.19	3.08	3.98	4.76	5.15	4.94	3.99	4.19	4.12	3.33	2.26	1.88	3.66
양덕	2.22	3.12	3.96	4.73	5.16	4.84	3.93	4.05	4.04	3.37	2.25	1.88	3.63
평양	2.19	3.08	3.98	4.76	5.15	4.94	3.99	4.19	4.12	3.33	2.26	1.88	3.66
남포	2.13	3.01	4.01	4.84	5.15	5.08	4.28	4.43	4.10	3.37	2.27	1.85	3.71
사리원	2.24	3.12	3.99	4.83	5.15	4.85	3.93	4.10	3.97	3.41	2.35	1.96	3.66
해주	2.13	3.01	4.01	4.84	5.15	5.08	4.28	4.43	4.10	3.37	2.27	1.85	3.71
개성	2.29	3.06	3.89	4.73	5.08	4.77	4.02	4.34	3.93	3.32	2.34	2.01	3.65
원산	2.15	3.03	3.83	4.68	5.19	4.47	3.74	3.74	3.77	3.28	2.19	1.85	3.49
평양	2.18	3.03	3.81	4.70	5.11	4.50	3.64	3.77	3.77	3.26	2.25	1.93	3.50
장전	2.12	2.94	3.84	4.80	5.30	4.79	4.12	3.97	3.83	3.27	2.27	1.90	3.59
평균	2.19	3.28	3.82	4.71	5.13	4.82	4.17	4.25	3.89	3.35	2.34	1.95	3.66

* 북한지방: 예측치, 남한지방: 실측치 ('92.1 ~ 2010.12 평균)

표에서 보는바와 같이 인공위성에 의한 시물레이션 예측치와 실측치를 비교하여 보면, 연평균 오차가 서울을 포함한 해안지역 일부 지역을 제외하고는 대부분 지역에서 예측치에 대한 실측치의 오차범위가 -4.0 ~ +3.7% 내에서 나타나 예측치는 실측치와 상당히 근

접한 값을 나타내었다. 대기오염이 심각한 서울지역을 비롯한 해안지역인 목포, 제주와 그 인접지역인 진주, 그리고 공단이 위치한 전주 지역은 타 지역에 비해 예측치는 실측치와의 오차가 다소 높게 나타나는 경향을 보였다.

표 2는 1982년 1월부터 2010년 12월까지 기간

Table. 3 Comparison between the monthly average estimated direct normal insolation and observed direct normal insolation in major areas

(단위 : kWh/m²/day)

지역명		월 별												연평균
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
춘천	예측치	2.77	2.93	2.87	2.82	3.09	2.96	1.81	2.33	2.94	2.52	2.10	2.28	2.62
	실측치	2.78	3.27	2.93	2.86	3.12	2.78	2.14	2.35	2.88	2.81	2.54	2.62	2.76
	오차(%)	-0.4	-10.4	-2.0	-1.4	-1.0	6.5	-15.4	-0.9	2.1	-10.3	-17.3	-13.0	-5.1
강릉	예측치	3.48	3.21	2.77	2.73	2.41	1.89	1.30	1.42	2.10	2.76	3.01	3.61	2.56
	실측치	2.93	3.00	2.60	2.61	2.47	2.03	1.69	1.67	2.27	2.65	2.69	2.91	2.46
	오차(%)	18.8	7.0	6.5	4.6	-2.4	-6.9	-23.1	-15.0	-7.5	4.2	11.9	24.1	4.1
원주	예측치	2.47	2.77	2.73	2.80	2.70	2.45	1.50	1.97	2.74	2.85	2.47	2.76	2.52
	실측치	2.39	2.88	2.60	2.79	2.76	2.24	2.00	2.18	2.92	3.13	2.66	2.53	2.59
	오차(%)	3.3	-3.8	5.0	0.4	-2.2	9.4	-25.0	-9.6	-6.2	-8.9	-7.1	9.1	-2.7
청주	예측치	3.08	3.35	2.77	2.92	3.02	2.05	1.54	1.85	2.72	2.91	2.64	2.60	2.62
	실측치	2.67	3.30	2.99	3.22	3.22	2.32	1.90	2.26	2.79	3.22	2.70	2.61	2.77
	오차(%)	15.4	1.5	-7.4	-9.3	-6.2	-11.6	-18.9	-18.1	-2.5	-9.6	-2.2	-0.4	-5.4
대전	예측치	2.91	3.58	3.11	3.42	3.48	2.61	2.44	2.28	3.04	3.92	2.89	2.86	3.05
	실측치	2.83	3.52	3.17	3.36	3.41	2.40	2.02	2.51	3.02	3.58	2.98	2.84	2.97
	오차(%)	2.8	1.7	-1.9	1.8	2.1	8.7	20.8	-9.2	0.7	9.5	-3.0	0.7	2.7
포항	예측치	3.38	3.38	3.38	3.38	3.38	3.38	3.38	3.38	3.38	3.38	3.38	3.38	3.38
	실측치	3.3	3.52	2.95	3.47	3.45	2.58	2.32	2.84	2.81	3.37	3.38	3.51	3.13
	오차(%)	2.4	-4.0	14.6	-2.6	-2.0	31.0	45.7	19.0	20.3	0.3	0.0	-3.7	8.0
광주	예측치	2.62	3.33	3.04	3.25	3.16	2.00	1.89	2.28	2.97	3.26	3.20	2.74	2.81
	실측치	2.37	3.17	2.98	3.32	3.33	2.12	2.06	2.38	2.96	3.35	2.72	2.37	2.76
	오차(%)	10.5	5.0	2.0	-2.1	-5.1	-5.7	-8.3	-4.2	0.3	-2.7	17.6	15.6	1.8
부산	예측치	3.33	3.49	2.71	2.86	2.84	1.87	2.09	2.78	2.17	2.93	3.43	3.53	2.84
	실측치	3.57	3.70	2.87	3.10	2.91	2.39	2.16	2.78	2.51	3.17	3.29	3.48	2.99
	오차(%)	-6.7	-5.7	-5.6	-7.7	-2.4	-21.8	-3.2	0	-13.5	-7.6	4.3	1.4	-5.0
진주	예측치	3.57	3.88	3.16	3.13	2.93	1.71	2.28	2.23	2.67	3.49	3.64	3.93	3.05
	실측치	3.26	3.45	3.02	3.05	2.95	1.98	2.01	2.27	2.66	3.19	3.30	3.36	2.88
	오차(%)	9.5	12.5	4.6	2.6	-0.7	-13.6	13.4	-1.8	0.4	9.4	10.3	17.0	5.9
평균	예측치	2.85	3.28	2.88	3.07	3.06	2.26	2.00	2.32	2.72	3.13	2.87	2.85	2.77
	실측치	2.85	3.28	2.88	3.07	3.06	2.27	2.00	2.33	2.73	3.13	2.87	2.85	2.78
	오차(%)	0	0	0	0	0	-0.4	0	-0.4	-0.4	0	0	0	-0.4

동안 한반도 남한지방 16개소에서 한국에너지기술연구원이 실시해 온 측정자료와 북한지방 21개소에서 인공위성 모델링을 통하여 산출된 예측치를 한반도 주요 지역별로 서로 비교한 것이다.

3.2. 법선면 직달일사량

임의의 지역의 법선면 직달일사량을 예측하기 위하여 일부 특정지역에 대하여 IEA의 DNI 예측기법을 적용한 예측치와 '82.1 ~ 2010.12 기간 사이에 실제로 측정된 평균 일사량과 비교하였으며, 그 비교결과는 표 3에 제시하였다.

표에서 보는바와 같이, 연평균 오차가 해안지역 일부지역을 제외하고는 연평균 예측치에 대한 실측치의 오차범위가 -5.4 ~ +5.9% 내에서 나타나 예측치는 실측치와 상당히 근접한 값을 나타내었으나 기상변화가 심한 해안지역인 포항은 타 지역에 비해 예측치는 실측치와의 오차가 다소 높게 나타나는 경향을 보였다.

4. 한반도 법선면 직달일사량 자원분석

4.1 관측지 선정

본 연구에서는 한반도 내에서의 법선면 직달일사량자원의 광역분포 상태를 분석하기 위하여

Table 4. Monthly average and annual average daily direct normal insolation in Korea peninsular

(단위 : kWh/m²/day)

지역명	월 별												연평균
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
춘천	2.88	3.28	2.96	2.93	3.23	2.95	2.33	2.42	3.00	2.91	2.58	2.59	2.84
강릉	3.02	2.98	2.59	2.72	2.51	2.14	1.73	1.68	2.30	2.69	2.76	2.92	2.50
서울	2.61	2.99	2.66	2.82	2.94	2.25	1.33	1.61	2.27	2.93	2.46	2.23	2.43
원주	2.45	2.86	2.58	2.75	2.85	2.47	1.90	2.25	2.91	3.15	2.7	2.56	2.62
서산	2.45	2.92	2.75	2.86	2.99	1.97	1.56	1.97	2.46	2.91	2.35	2.06	2.44
청주	2.67	3.26	3.02	3.24	3.36	2.48	1.82	2.22	2.77	3.21	2.64	2.56	2.77
대전	2.92	3.47	3.18	3.40	3.55	2.65	2.04	2.58	3.07	3.65	3.02	2.9	3.04
포항	3.43	3.48	2.89	3.42	3.6	2.77	2.32	2.93	2.91	3.48	3.39	3.44	3.17
대구	2.91	3.06	2.59	2.45	2.38	1.71	1.43	1.49	1.95	2.26	2.43	3.03	2.31
전주	2.49	2.91	2.77	2.87	3.12	2.05	1.74	2.20	2.55	2.84	2.55	2.36	2.54
광주	2.44	3.10	3.00	3.44	3.48	2.27	2.03	2.39	3.05	3.51	2.8	2.41	2.83
부산	3.64	3.68	2.83	3.21	3.02	2.55	2.24	2.88	2.66	3.27	3.33	3.75	3.09
목포	1.75	2.16	2.18	2.29	2.12	1.52	1.45	1.78	2.28	2.83	2.29	1.95	2.05
제주	0.87	1.81	2.26	2.77	3.12	2.36	3.19	2.73	2.75	2.78	1.86	1.07	2.30
진주	3.36	3.38	2.96	3.12	3.04	2.08	2.02	2.32	2.82	3.32	3.38	3.47	2.94
영주	2.93	3.23	2.84	3.08	2.99	2.11	1.68	1.88	2.46	3.28	3.06	3.08	2.72
나진	3.25	3.68	3.57	3.03	2.58	2.34	1.85	2.45	4.05	3.69	3.15	2.56	3.02
청진	3.30	3.35	3.26	2.97	2.80	2.57	2.59	2.87	3.74	3.71	2.80	3.40	3.11
성진	3.04	3.64	3.61	3.77	3.66	2.99	2.99	3.29	4.05	3.98	3.11	2.81	3.41
장진	3.76	3.90	3.39	3.63	3.56	2.34	2.68	3.05	4.21	3.77	2.90	2.95	3.35
신포	3.43	3.72	3.44	4.03	3.61	2.57	2.64	2.82	3.84	3.88	3.09	2.66	3.31
함흥	3.34	3.68	3.11	4.27	3.56	1.75	0.88	1.58	3.24	3.58	2.75	2.58	2.86
혜산	3.54	3.94	3.53	2.99	3.35	3.10	3.65	3.74	4.18	3.67	3.09	3.29	3.51
풍산	3.58	3.92	3.60	3.49	3.56	2.51	2.64	3.00	3.94	4.00	3.46	2.83	3.38
강계	3.89	4.20	3.55	3.43	3.73	2.48	2.37	2.90	4.26	3.77	3.19	2.83	3.38
희천	3.71	4.02	3.42	3.89	3.66	2.45	2.37	2.69	4.15	3.60	2.90	2.70	3.30
신의주	3.54	3.70	3.34	4.15	3.59	2.51	1.05	2.47	4.21	3.39	2.86	2.49	3.11
구성	3.49	3.82	3.49	4.43	3.54	2.96	1.58	2.71	4.36	3.77	2.99	2.74	3.32
양덕	3.25	3.72	3.50	3.27	3.51	2.79	1.41	2.37	3.97	3.65	2.88	2.45	3.06
평양	3.06	3.59	3.52	3.33	3.51	3.05	1.63	2.76	4.21	3.54	2.86	2.77	3.15
남포	2.69	3.29	3.55	3.47	3.44	3.36	2.55	3.42	4.08	3.54	2.76	2.45	3.22
사리원	3.28	3.64	3.47	3.43	3.47	2.71	1.36	2.50	3.68	3.63	2.98	2.77	3.08
해주	2.66	3.19	3.44	3.41	3.47	3.33	2.59	3.37	3.97	3.41	2.57	2.16	3.13
개성	3.21	3.31	3.16	3.19	3.28	2.54	1.67	3.13	3.45	3.27	2.75	2.74	2.98
원산	2.99	3.47	3.19	3.17	3.59	1.78	0.84	1.55	3.13	3.39	2.69	2.33	2.68
평강	2.99	3.33	3.05	3.17	3.35	1.86	0.62	1.68	3.00	3.18	2.63	2.56	2.62
장진	2.66	3.11	3.16	3.39	3.78	2.59	2.02	2.19	3.24	3.29	2.76	2.66	2.90
평균(북한)	3.27	3.63	3.40	3.52	3.46	2.60	2.00	2.69	3.86	3.61	2.91	2.70	3.14
평균(남한)	2.67	3.04	2.75	2.96	3.02	2.27	1.93	2.21	2.64	3.06	2.73	2.65	2.66
평균(남북한)	3.01	3.37	3.12	3.28	3.27	2.46	1.97	2.48	3.33	3.37	2.83	2.68	2.93

관측지간의 평균거리를 약 100 km로 설정하고 전반적인 데이터의 정확도 평가를 위해 한반도 내에서 37개 지역, 즉, 위성예측은 북한은 21개소를 평양을 비롯한 나진, 청진, 성진, 장진, 신포, 함흥, 혜산, 강계, 희천, 신의주, 구성, 양덕, 남포, 사리원, 해주, 개성, 원산, 평강,

장진, 영원으로 하였으며, 실측은 한국에너지기술연구원 관측지 16개소인 춘천, 강릉, 서울, 원주, 서산, 청주, 포항, 대구, 전주, 광주, 부산, 목포, 제주, 진주, 영주를 대상으로 한반도 일사량 관측지로 선정하였다.

한반도 법선면 직달일사량 자원분석을 위한

관측지 선정작업에 고려된 사항은 우선, 관측지 상호간의 거리는 가능한 균등하게 유지하고, 내륙, 해안 등 지역적 특수성에 따른 일사량 변동 형태를 연구할 수 있도록 관측지 선정에 반영한 것이다.

Table. 5 Seasonal average daily direct normal insolation in Korea peninsular

(단위 : kWh/m²/day)

구 분	봄	여름	가을	겨울	연평균(A)
법선면 직달일사량(G)	3.22	2.30	3.18	3.02	2.93
G/A	1.10	0.78	1.09	1.03	1.00

4.2 양적비교

표 4는 1992년 1월부터 2010년 12월까지 기간동안 한반도 남한지방 16개소에서 한국에너지기술연구원이 실시해 온 측정자료와 북한지방 21개소에서 인공위성 모델링을 통하여 산출된 예측치를 한반도 주요 지역별로 서로 비교한 것이다. 분석결과에서 나타난바와 같이 우리나라(남북한) 주요 37개 전 지역에서의 법선면 직달일사량은 연 평균치로 계산하였을 때, 한반도 전국이 하루에 2.93 kWh/m² 정도의 태양광에너지를 받는 것으로 나타났으며, 북한지방은 3.14 kWh/m², 남한지방은 하루에 2.66 kWh/m² 정도로 나타나 북한지방이 남한

지방에 비하여 다소 높게 나타나는 현상을 보였다. 특히 북한지방이 남한지역이 높게 나타난 것은 법선면 태양광에너지의 강도가 지구상의 위도와 보다는 해당 지역 해발높이에 가장 밀접한 관계를 갖고 있음을 알 수가 있다.

한편, 우리나라(남북한)의 월별 법선면 직달일사량의 태양광조건을 일년을 기준으로 볼 때, 표 4에서 보는바와 같이 태양광조건이 가장 좋은 달은 2월과 10월로 하루에 3.37 kWh/m²인 것으로 나타났으며, 가장 낮은 달은 7월로 하루에 1.97 kWh/m²로 나타났다.

계절별로는 표 5에서와 같이 연중 봄철의 태양광조건이 가장 좋으며, 여름철은 연 평균

치에도 훨씬 못 미치는 낮은 수준인 것으로 나타났다. 연 평균치에 대한 계절별 태양광조건은 봄, 가을, 겨울철은 각각 10%, 9%, 3% 높았으며, 여름철은 22%나 상대적으로 낮았다.

4.3 분포형태

한국에너지기술연구원에서 운영하는 태양광 측정네트워크(남한지방 16개소)에서 18여 년간에 걸쳐 측정된 법선면 직달일사량 자료의 평균치와 북한지방 21개소에서 인공위성 모델링을 통하여 산출된 법선면 직달일사량 예측치를 가지고 전산시물레이션 기법으로 그린 전국적인 한반도 연평균 1일 법선면 직달일사량자원 분포 현황도를 그림 1에 나타내었다. 분포상의 특징을 법선면 직달일사 조건이 좋은 순으로 지역 대를 나누면, 그림에서 보는바와 같이 개마고원을 중심으로 함경북도-함경남도-평안북도를 잇는 고산지대 일대가 한반도에서 가장 좋은 곳으로 나타났으며, 그 다음은 평안남도와 황해도 일대, 포항-부산을 잇는 일원, 중부이남지역의 서해안

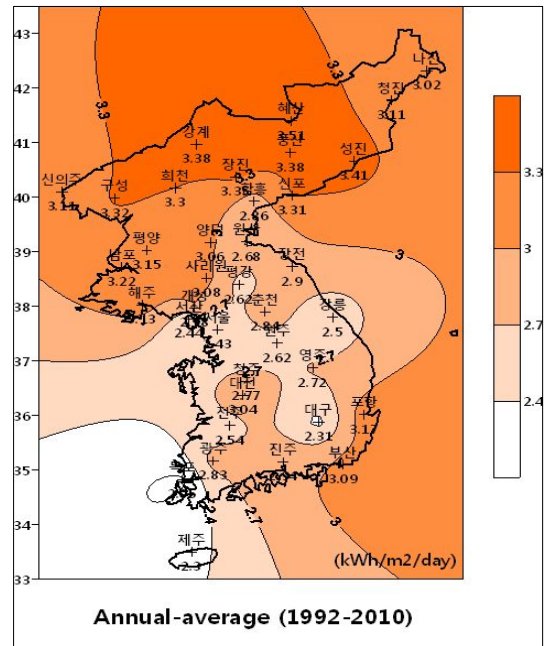


Fig. 1 Contour map of annual average daily direct normal insolation in Korea peninsular

일대와 중부내륙지방 순으로 나타났으며, 남해 서부지역인 목포-제주를 잇는 일원은 한반도 내에서 가장 낮게 나타났다.

또한 우리나라 한반도의 법선면 직달일사량자원에 대한 계절별 분포특성은 그림 2 ~ 그림 5에서 나타난바와 같이 봄철과 가을철의 법선면 직달일사량은 대체로 한반도 이남 지역보다는 이북지역이 좋으며, 여름철은 백두산 및 해주지역 일대를 제외한 한반도 전 지역이 고른 분포를 나타낸 반면에, 겨울철은 연평균 분포와 유사한 형태를 나타내었다.

참고로 우리나라 한반도 전 지역에 대해 지역별로 '92.1 ~ 2010.12 기간동안의 법선면 직달일사량자원에 대한 월별 연평균 1일 값⁴⁾을 표 4에 제시하였다. 이 자료는 우리나라 한반도에서 추진되고 있는 태양열발전시스템 이용 기술과 관련하여 각종 연구와 보급사업이 보다 활성화하기 위한 기준설계 자료의 대표 값으로 이용할 수 있으리라 생각된다.

5. 결 론

우리나라 한반도 내에서 인공위성을 이용한 태양열발전단지 건설을 위한 최적지 선정을 위하여 1982년 1월부터 2010년 12월까지 기간동안 한국에너지기술연구원에서 운영하는 태양광 측정네트워크(남한지방 16개소)에서 18여 년간에 걸쳐 측정된 법선면 직달일사량 자료의 평균치와 북한지방 12개소에서 인공위성 모델링을 통하여 산출된 법선면 직달일사량 예측치를 한반도 주요 지역별로 분석한 결과를 종합해 보면, 다음과 같은 결론을 얻게 된다.

- (1) 인공위성에 의한 시뮬레이션 예측치에 대한 실측치의 연평균 오차가 해안지역 일부 지역을 제외하고는 -5.4 ~ +5.9% 내에서 나타났다.
- (2) 우리나라(남북한) 주요 37개 전 지역에서

의 법선면 직달일사량은 연 평균치로 계산하였을 때, 한반도 전국이 하루에 2.93 kWh/m² 정도의 태양광에너지를 받는 것으로 나타났으며 북한지방은 3.14 kWh/m², 남한지방은 하루에 2.66 kWh/m² 정도로 나타났다.

- (3) 우리나라(남북한)의 월별 법선면 직달일사량의 태양광조건을 일년을 기준으로 볼 때, 태양광조건이 가장 좋은 달은 2월과 10월로 하루에 3.37 kWh/m²인 것으로 나타났으며, 가장 낮은 달은 7월로 하루에 1.97 kWh/m²로 나타났다.
- (4) 계절별로는 연중 봄철의 태양광조건이 가장 좋으며, 여름철은 연 평균치에도 훨씬 못 미치는 낮은 수준인 것으로 나타났다. 연 평균치에 대한 계절별 태양광조건은 봄, 가을, 겨울철은 각각 10%, 9%, 3% 높았으며, 여름철은 22%나 상대적으로 낮았다.
- (5) 우리나라 한반도 분포상의 특징을 태양광조건이 좋은 순으로 지역 대를 나누면, 남해중서부지방과 태안반도 일대, 그리고 영주분지 일원의 일사조건이 한반도에서 가장 좋은 곳으로 나타났으며, 그 다음은 호남 및 김해평야 일대, 중부이남, 그리고 북부 동해안 및 서해안 지방, 중부이북지방, 북부내륙지방, 제주도 순으로 나타났고, 대기오염이 심각한 서울지방은 한반도 내에서 가장 낮은 태양광을 기록하였다.
- (6) 우리나라 한반도의 수평면 전일사량 자원에 대한 계절별 태양광자원 분포특성은 봄철과 가을철의 태양광조건은 대체로 내륙지방의 지역보다는 해안지방의 지역이 좋으며, 여름철은 한반도 전국이 고른 분포를 나타낸 반면에, 겨울철은 남해지방 일원 지역의 태양광이 다른 지역들보다 상대적으로 높은 형태를 나타내었다.

그러나, 이 논문에서 제외된 법선면 직달일사량자원을 측정하지 못하는 일부 특정지역에 대하여 앞으로도 계속적으로 인공위성 영

4) KMA, Annual and Monthly Weather Report, 1982~2010.

상 등을 이용한 태양에너지자원 예측기법을 적용하여 한반도에서의 전반적인 태양광에너지 이용가능성에 대한 평가를 보다 정밀히 시도할 계획이다.

후 기

본 연구는 국가 출연사업인 주요사업의 지원을 받아 수행되었음 (과제번호 : GP 2009-0051).

References

1. MD. Rafiquel Islam and R.H.B. Exell, Solar Radiation Mapping from Satellite Image Using a Low Cost System, Solar Energy, Vol. 56, No. 3, pp. 225-237, 1996.
2. J.A. Duffie and W.A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Process, John Wiley & Sons, Inc., 1991.
3. JSES, Basic and Application of Solar Energy, 1979.
4. KMA, Annual and Monthly Weather Report, 1982 ~2010.