

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 23, No. 3, 2003

고지대 일사량 특성분석에 관한 연구

조덕기*, 강용혁*, 오정무*

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

A Study on the Analysis of Solar Radiation Characteristics on a High Elevated Area

Jo, Dok-Ki*, Kang, Young-Heack*, Auh, Chung-Moo*

* Korea Institute of Energy Research

Abstract

The purpose of this study is to procure basic data to be used for solar power plant and concentrating collector designs. Site elevation is one of the major factors which influences the incoming insolation to the earth surface. Because the nonpermanent gases such as ozone, water vapor are unmixed components of the atmosphere and their concentrations are the function of height, the site elevation effects the relative proportion of the atmospheric constituents. We have measured solar radiation on Jiri Mt.(1,400m) and in Gurye area(115m) at the near same latitude. These values were then compared to obtain their characteristics and to investigate the potential for the solar utilization for both high and low elevated areas. From the experimental results, we concluded that

- 1) Daily mean horizontal global radiation and normal beam radiation on Mt. Jiri are 9.5 %, and 35.3 % higher than Gurye area respectively for a clear day.
- 2) A significant difference in atmospheric clearness index is observed between Mt. Jiri and Gurye areas.

Keywords : 전일사량(Total solar radiation), 직달일사량(Beam radiation), 산란일사량(Diffuse radiation), 대기권밖 일사량(Extraterrestrial radiation), 청명일사량(Clear sky radiation)

기 호 설 명

K_t : 대기청명도

H_o : 대기권밖 일사량

H : 수평면 전일사량

G_{sc} : 태양상수 ($1,353 \text{ W/m}^2$)

- n : 통산일 (julian date)
- ϕ : 해당지방의 위도
- δ : 일적위 = $23.45 \sin (360 \cdot 284n/365)$
- $\omega_{1,2}$: 시간각 ($\omega_2 > \omega_1$, $15^\circ = 1hr : A.M-, P.M +$)
- τ_b, τ_b : 직달 및 산란일사량의 대기투과율
- G_{on} : 법선면상에서의 일별 대기권밖 일사량
= $G_{sc} [1 + 0.033 \cos (360n/365)]$
- I_{on} : 법선면상에서의 시간별 대기권밖 일사량
= $G_{sc} [1 + 0.033 \cos (360n/365)] \cos \theta_z$
- θ_z : 천정각 = $\cos \delta \cos \phi \cos \omega + \sin \delta \sin \phi$
- G_c, I_c : 일별 및 시간별 청명일 수평면 전일사량
- G_{cb}, I_{cb} : 일별 및 시간별 청명일 직달일사량 (수평면)
- G_{cnb}, I_{cnb} : 일별 및 시간별 청명일 직달일사량 (법선면)
- G_{cd}, I_{cd} : 일별 및 시간별 청명일 산란일사량 (수평면)

1. 서론

저지대는 고지대에 비해 대기 중에 하부 먼지 층이나 수증기에 의해 산란 및 흡수가 일어나 일사가 많이 감쇄되고 있다. 이와 같은 원인은 대기중의 하부 먼지 층과 수증기는 대부분 지표면상에서 0~3 km 높이 사이에서 존재하고 있기 때문이다. 이들 층에서의 먼지와 수증기의 양은 일반적으로 계절적 및 지리적 변화에 따라 달라지며, 이로 인하여 고지대일 수록 저지대보다도 대기중의 대기오염물, 부유분진, 수증기 등에 의한 일사량 감소를 덜 받고 있다.

따라서 본 연구사업은 고온에너지의 이용을 위하여 태양열발전을 비롯한 태양집광시스템의 설치가 절실히 요구되는 지역으로 일사의 대기투과율이 높고 감쇠현상¹⁾이 보다 적은 고지대에 입사하는 일사에너지가 저지대에 비하여 얼마나 덜 차단하는지를 이론적인 고찰과 실험을 통하여 평가함으로써 향후 이들 시스템의 최적지 선정에 기초자료를 제공하는데 그 목적을 두었다.

1) 조광명, 대기오염, 청문각, 1980.

2. 이론적 배경

2.1 일사측정에 의한 대기의 청명도 분석

일사량은 앞전에서 언급한 바와 같이 대기권 내의 여러 가지 작용을 거쳐 지표면에 도달하게 되므로 대기권밖 일사량의 값은 지표면에 입사하는 수평면 전일사량에 비해 현저한 차이를 보이게 된다. 그러므로 청명한 날이나 대기상태가 오염되지 않은 조건 하에서의 일사량은 보다 증가할 것이며, 흐린 날이나 오염된 대기에서는 대기권내에서 흡수되는 일사량이 증가하여 상대적으로 지표면에 도달하는 일사량은 감소하므로 일사량은 태양에너지 이용시스템의 설계자료로서의 이용뿐만 아니라 대기상태의 분석에도 필연적인 것으로서 이에 대한 정확한 정보를 얻기 위해서는 대기권밖 일사량의 산출 역시 필수 불가결한 것이다.

청명도 (clearness index), K_t 는 청명한 날에 측정된 수평면 전일사량, H 을 대기권밖 일사량, H_0 로 나누어 그 값을 구하며, 다음 식에 의하여 산출할 수 있다.

$$K_t = H / H_0 \quad (1)$$

청명도 값이 1에 가까울수록 천공(天空)상태가 맑다고 할 수 있으며, 구름의 영향을 전혀 받지 않는 청명한 날에 측정지역들간의 청명도를 서로 비교하여 봄으로써 이들 지역의 매연, 부유분진, 배기가스 등에 의한 대기오염 상태를 예측할 수 있다.

여기서, 청명한 상태의 정의는 하늘에 구름이 완전히 덮은 상태를 운량 1로 보고, 운량(雲量)²⁾이 0 ~ 0.1 사이인 경우로서 기상청이 발표한 지역별 기상자료³⁾에 의한다.

한편, 대기권밖 일사량의 해석에 있어 Liu와

2) 한영호외, 현대기상학, 진명출판사, 1978.

3) 기상청, 기상년·월보, 1982-2001.

Jordan⁴⁾의 해석방법은 Klein, Duffie와 Beckman에 의해 발전되어 일별에 따른 대기권 밖 일사량을 식 (2)와 같이 제시하였다.

$$I_0 = 12 \times 3600/\pi \cdot G_{sc} [1 + 0.033 \cos(360n/365)] \\ \times [\cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) \\ + 2\pi (\omega_2 - \omega_1)/360 \cdot \sin \phi \sin \delta] \quad (2)$$

2.2 청명일사량 예측방법

1976년 Hottel은 4가지 유형의 기후형태에 대하여 표준 대기상태의 고도나 천정각 등을 고려한 대기 중을 통과하는 직달일사량을 평가하는 편리한 방법을 제시하였다.

직달일사량의 대기투과율 τ_b 는

$$\tau_b = a_0 + a_1 \cdot e^{-k/\cos \theta_z} \quad (3)$$

와 같은 형태로 주어지며, 시도(visibility)⁵⁾ 23 km의 표준 대기상태의 상수 a_0 , a_1 , k 는 다음에 제시된 고도 2.5 km 미만에서의 상수 a_0^* , a_1^* , k^* 로부터 산출할 수 있으며, A 는 관측치의 고도(km)이다.

$$a_0^* = 0.4237 - 0.00821 (6 - A)^2 \\ a_1^* = 0.5055 - 0.00595 (6.5 - A)^2 \\ k^* = 0.2711 - 0.01858(2.5 - A)^2 \quad (4)$$

청명한 상태에서 수직으로 입사되는 법선면 직달일사량(normal beam radiation)은

$$G_{cnb} = G_{on} \tau_b \quad (5)$$

이며, 같은 조건하에서 수평면에 입사되는 직달일사량(horizontal beam radiation)은

$$G_{cb} = G_{on} \tau_b \cos \theta_z \quad (6)$$

이다. 다시 이 수평면상의 직달일사량을 시간당으로 계산하면,

$$I_{cb} = I_{on} \tau_b \cos \theta_z \quad (7)$$

와 같다.

앞에서와 같이 청명한 조건 하에서 수평면이 실제로 받는 전체 일사량을 알기 위해서는 같은 조건 하에서 산란일사량을 평가해야 할 필요성이 따른다. 이미 1960년에 Liu와 Jordan은 이미 청명한 날에 대하여 직달일사의 투과계수와 산란일사간의 관계를 다음과 같은 경험식으로 나타내었다.

$$\tau_d = 0.2710 - 0.2939 \tau_b \quad (8)$$

여기서, G_d/G_0 혹은 I_d/I_0 , 즉 대기권밖 수평면일사량에 대한 산란일사율의 비이며, 식 (9)는 3개 지역의 자료를 토대로 한 것이다.

한편, 청명한 날 산란일사량은 다음과 같은 일반식으로 계산한다.

$$G_{cd} = G_{on} \tau_d \cos \theta_z \quad (9)$$

또한, 입사되는 시간별 산란일사량 I_{cd} 는

$$I_{cd} = I_{on} \tau_d \cos \theta_z \quad (10)$$

이다. 따라서 청명한 날의 수평면 전일사량 G_c 의 산출은

$$G_c = G_{cb} + G_{cd} \quad (11)$$

가 되며, 같은 조건 하에서 청명일 시간별 수평면 전일사량 I_c 는

4) John A. Duffie & Willian A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Process, John Wiley & Sons, Inc. 1991.

5) 소선섭/이천우, 기상관측법, 교문사, 1986.

$$I_c = I_{cb} + I_{cd} \quad (12)$$

로 표현된다.

3. 측정장소의 이론적 배경

고온에너지의 이용을 위하여 태양열발전 및 태양집광시스템의 설치가 절실히 요구되는 고지대 지역의 법선면 직달일사량과 수평면 전일사량 자원특성을 조사하기 위하여 2002년 11월에 전라남도 구례군에 위치한 지리산과 그 초입에 있는 화엄사에 각각 일사량 측정장비를 설치하고, 고지대와 저지대와의 직접적인 측정자료의 상호비교가 가능하도록 하였다.

측정지 선정에 고려된 사항은 우선, 장비의 운영을 위하여 한전 계통선이 연계된 지역과 측정장비의 관리가 용이한 지역으로 선정하여 측정지로 하였으며, 일사량 측정에 있어 지형에 의한 영향을 적게 받기 위하여 주위가 장애물로부터 충분히 떨어진 장소를 물색하였다. 이와 같은 점을 고려하여 선정된 일사량 측정지의 위치명세와 설치장소는 표 1과 같다.

또한 본 실험의 기본이 되는 실측목표는 각 지역의 법선면 직달일사량과 수평면 전일사량 데이터를 확보하는 것으로 이와 같은 목표를 달성하기 위하여 각 측정지에 미국 Eppley사가 제작한 PSP 수평면일사계 및 NIP 직달일사계와 SMT-3 태양추적장치, 그리고 미국 Vaisala사의 데이터수집장치를 설치하여 측정시스템을 구성하여 현장에서 측정기능 수행이 가능하도록 하였으며, 그 외에 측정된 자료를 처리하기 위하여

자료회수장치(data collection set)와 자료처리용 컴퓨터(data processor)로 이루어졌다.

4. 분석결과

4.1 양적비교 분석

표 2와 그림 1은 2002년 11월에 매 시간마다 측정된 데이터 중 운량 값이 0.1 이하인 청명한 날에 측정된 데이터만을 선정하여 1일 평균치를 시간별로 나타낸 것이다. 즉, 이 기간동안의 일 평균치로 계산하였을 때, 지리산은 하루에 받는 수평면 전일사량은 5,867 Wh/m²시 법선면 직달일사량은 8,660 Wh/m²로 나타났으며, 인접지역인 구례는 수평면 전일사량이 5,359 Wh/m²시 법선면 직달일사량은 6,548 Wh/m²로 나타났다. 따라서 일평균 수평면 전일사량에 대한 법선면 직달일사량의 비, G_{cnb}/G_c 는 지리산이 148%, 구례가 122%를 기록함으로써 고지대와 저지대 사이에 상당한 차이를 보였다.

시간별에 따른 일사량의 변화특성을 살펴보면, 시간별 수평면 전일사량과 법선면 직달일사량의 최대치는 각 지역에서 공히 표준시 기준으로 12시경으로 나타났다. 이때 법선면 직달일사량은 지리산이 934 W/m², 구례가 774 W/m²으로 나타나 고지대인 지리산이 저지대인 구례보다 무려 21%나 높게 나타났다.

시간별에 따른 수평면 전일사량에 대한 법선면 직달일사량의 성분비율, I_{cnb}/I_c 를 살펴보면,

표 2. 지역에 따른 시간별 일사량 비교 (W/m²)

지역 구분	시간	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	합계
	지리산	I_c	75	301	513	670	804	848	781	714	569	91	179	
지리산	I_{cnb}	328	682	808	896	922	934	922	896	833	745	530	164	8,660
	I_{cnb}/I_c (%)	437	227	158	134	115	110	118	125	146	191	296	745	148
	구례	I_c	32	260	464	622	735	781	758	667	520	351	158	11
구례	I_{cnb}	0	523	654	722	760	774	760	732	662	584	377	0	6,548
	I_{cnb}/I_c (%)	-	201	141	116	103	99	100	110	127	166	239	-	122

표 1. 일사량 측정 선정위치 명세

측정지	설치장소	위도	경도	해발높이	비 고
지리	지리산남부사무소 (노고단분소)	35° 15'	127° 32'	1,400 m	전남 구례군 산동면 준사리 산110
구례	화엄사	35° 14'	127° 32'	115 m	전남 구례군 마산면 황전리 산 20-1

표 2에서 보는바와 같이 각 지역 공히 대부분 전 시간대에서 I_{cnb} 이 I_c 보다 높게 나타났으며, 특히 지리산은 구례보다 일출직후와 일몰직전에 상당히 높게 나타나는 경향을 보였다. 따라서 가을철에 고지대 지역에서의 법선면 직달일사량의 강도는 수평면 전일사량보다도 전시간대에 걸쳐 높게 나타남을 알 수 있다.

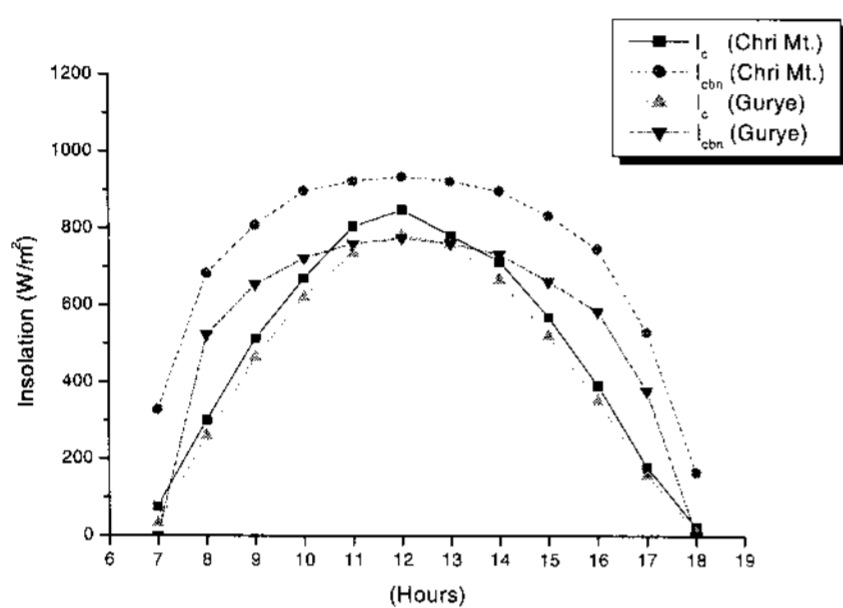


그림 1. 시간별 청명일 수평면 전일사량과 법선면 직달일사량

한편, 청명일을 기준으로 한 법선면 직달일사의 대기투과율 τ_b 는 그림 2와 표 3에서와 같이 지리산은 하루중 전 시간대에 걸쳐 구례보다 높게 나타났으며, 각 지역 공히 τ_b 값은 정오 시에 가장 높게, 일출직후와 일몰직전에 가장 낮게 나타났다. 또한 표 4에서 그림 3에서 보는바와 같이 역시 지리산은 구례보다 법선면 직달일사 대기투과율 τ_b 값뿐만 아니라 청명도 k_t 값도 높게 나타나는 경향을 보이고 있다.

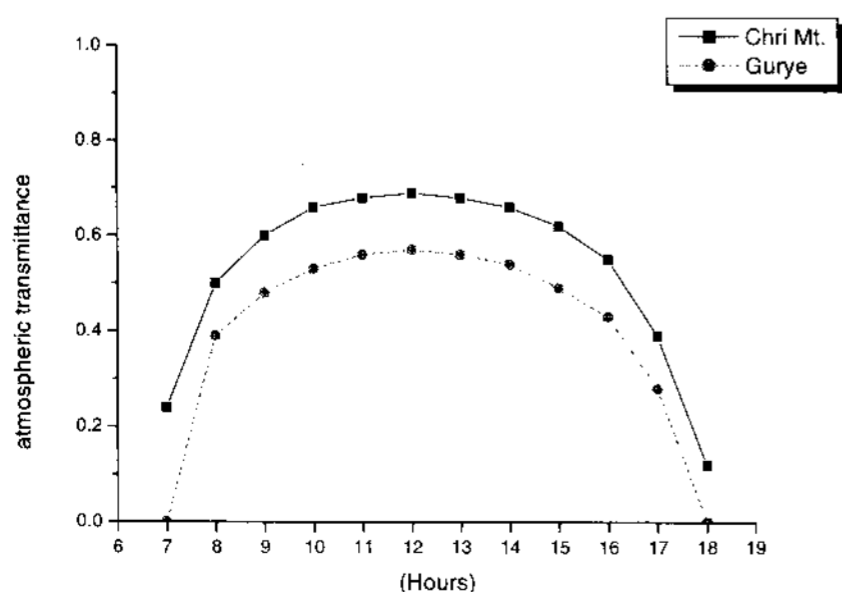


그림 2. 시간별 법선면 직달일사량의 대기투과율

표 3. 지역에 따른 시간별 법선면 직달일사 강도의 대기투과율 비교

지역 \ 시간	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	합계
지리산	0.24	0.50	0.60	0.66	0.68	0.69	0.68	0.66	0.62	0.55	0.39	0.12	0.53
구례	0.00	0.39	0.48	0.53	0.56	0.57	0.56	0.54	0.49	0.43	0.28	0.00	0.40

표 4. 지역에 따른 시간별 청명도 비교

지역 \ 시간	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	평균
지리산	0.26	0.61	0.71	0.75	0.80	0.81	0.78	0.80	0.79	0.79	0.63	-	0.70
구례	0.11	0.53	0.64	0.69	0.73	0.75	0.76	0.74	0.72	0.71	0.55	-	0.63

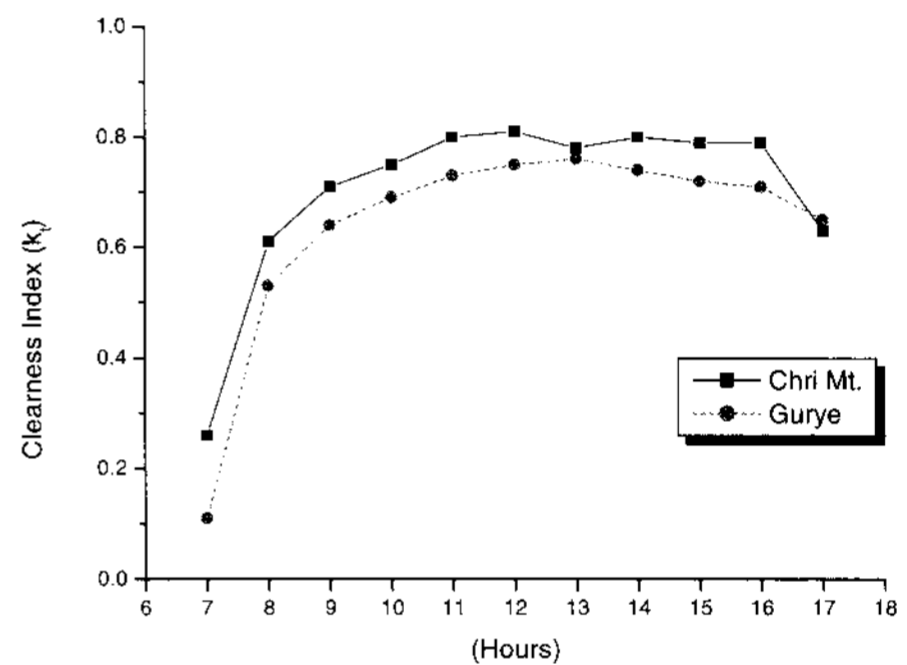


그림 3. 시간별 청명도

4.2 시뮬레이션 분석

표 5와 그림 4는 앞에서 설명된 Hottel의 경험식을 적용하여 산출된 지역별 법선면 직달일사량의 예측치와 실측치를 비교한 것이다.

표 5. 지역에 따른 법선면 직달일사량의 실측치와 이론치의 비교 (W/m^2)

지역	구분 \ 시간	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	합계
		지리산	실측치	328	682	808	896	922	934	922	896	833	745	
	예측치	341	727	842	890	928	938	928	890	842	727	551	0	25,924
	오차(%)	-3.8	-6.2	-4.0	+0.6	-0.6	-0.4	-0.6	+0.7	-1.1	-3.8	-3.8	-	+0.7
구례	실측치	0	523	654	722	760	774	760	732	662	584	377	0	6,548
	예측치	352	540	678	751	788	799	788	751	678	540	352	0	7,017
	오차(%)	-	-3.1	-3.5	-3.9	-3.6	-3.1	-3.6	-2.5	-2.4	+8.1	+7.1	-	-6.6

표와 그림에서 보는바와 같이 각 지역 공히 실측치는 예측치와 거의 유사하게 나타나고 있으며,

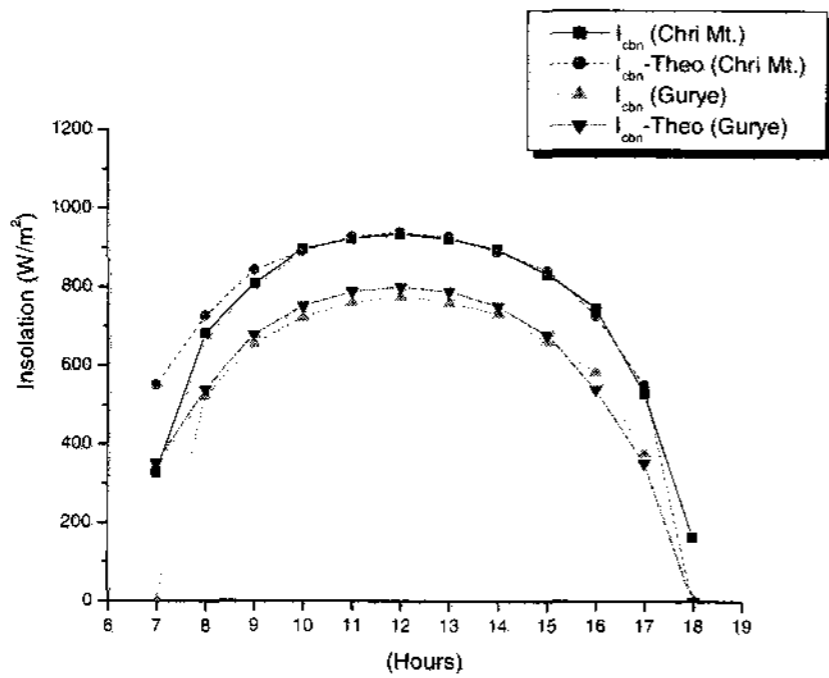


그림 4. 시간별 법선면 직달일사량 실측치와 예측치

특히 이 경험식이 고지대일수록 더욱 실측치와 근접한 값을 나타내고 있다. 실측치는 전 시간대에 걸쳐 지리산의 경우는 대략 -6% ~ +1% 범위 내에서, 그리고 구례는 -3% ~ +8% 범위 내에서 예측치와의 오차를 나타내었다.

5. 결 론

2002년 11월에 운량 값이 0.1 이하인 청명한 날을 기준으로 한 고지대에 대한 일사량자원 평가를 종합하여 분석해 볼 때, 다음과 같은 결론을 얻게 된다.

- (1) 지리산은 하루에 받는 수평면 전일사량이 5,867 Wh/m²시 법선면 직달일사량은 8,860 Wh/m²로 나타났으며, 인접지역인 구례는 수평면 전일사량이 5,359 Wh/m²시 법선면 직달일사량은 6,548 Wh/m²로 나타났다.
- (2) 일평균 수평면 전일사량에 대한 법선면 직달일사량의 비, G_{cnb}/G_c 는 지리산이 148%, 구례가 122%를 기록으로써 기록함으로써 고지대와 저지대 사이에 상당한 차이를 보였다.
- (3) 법선면 직달일사의 대기투과율 τ_b 는 지리산이 하루중 전 시간대에 걸쳐 구례보다 높게 나타났으며, 각 지역 공히 τ_b 값은 정오 시에 가장 높게, 일출직후와 일몰직전에 가장 낮게 나타났다. 또한 지리산은 구례보다 청명도 k_t 값도

높게 나타나는 경향을 보였다.

- (4) Hottel의 경험식을 적용하여 산출된 지역별 법선면 직달일사량의 예측치와 실측치를 비교한 결과 지리산과 구례지역 공히 실측치는 예측치와 거의 유사하게 나타나고 있으며, 특히 이 경험식이 고지대일수록 더욱 실측치와 근접한 값을 나타내었다. 실측치는 전 시간대에 걸쳐 지리산의 경우는 대략 -6% ~ +1% 범위 내에서, 그리고 구례는 -3% ~ +8% 범위 내에서 예측치와의 오차를 나타내었다.
- (5) 그러나 현시점에서 볼 때, 측정기간이 충분하지 않기 때문에 현재까지의 결과만을 가지고 우리나라 고지대 전지역에 대한 일사량자원 평가는 아직 어려운 실정이다. 이에 따라 여러 고지대지역에 대한 장기적인 일사량 측정 뿐만 아니라 앞으로는 본 연구를 바탕으로 고도나 대기혼탁도 등에 따른 일사량의 변동형태 등 각종 기후조건과의 연관성을 규명하여 우리나라 고지대지역에 일사 예측을 위한 적합한 이론식을 유추해 나아갈 계획이다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 연구비지원으로 수행되었음(과제번호: M60105000006-03A0100-03700).

참 고 문 헌

1. 기상청, "기상년·월보", 1982 ~ 2002.
2. 소선섭 / 이천우, 기상관측법, 교문사, 1986.
3. Duffie John A. and Beckman William A., Solar Engineering of Thermal Process, John Wiley & Sons, Inc., 1991, pp. 3-145.
4. Garg H.P., Treatise on Solar Energy, John Wiley & Sons, 1982, pp. 26-131.
5. Dickinson, William C., and Chermisinoff Paul N., Solar Energy Technology Handbook, Dekker, Inc., 1982.