

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 27, No. 2, 2007

집광식 태양광발전시스템 설치를 위한 태양광자원 성분분석에 관한 연구

조덕기*, 강용혁*

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

A Study on the Analysis of Solar Radiation Components for the Installation of Concentrating Photovoltaic System

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

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

Abstract

Knowledge of the solar radiation components are essential for modeling many solar photovoltaic systems. This is particularly the case for applications that concentrate the incident energy to attain high photo-dynamic efficiency achievable only at the higher intensities. In order to estimate the performance of concentrating PV systems, it is necessary to know the intensity of the beam radiation, as only this component can be concentrated.

The Korea Institute of Energy Research(KIER) has began collecting solar radiation component data since August, 1996. KIER's component data will be extensively used by concentrating PV system users or designers as well as by research institutes.

Keywords : 집광식 태양광발전시스템 (Concentrating Photovoltaic System), 태양복사성분 (Solar Radiation Components)

기 호 설 명

I' : 지표면상의 일사강도
 I_0 : 대기권밖 일사강도
 h : 태양고도각
 δ : 일적위 = $23.45 \sin(360 \cdot 284n/365)$ n = 통산일

ϕ : 해당지방의 위도
 ω : 시간각 ($\omega_2 > \omega_1$, $15^\circ = 1hr$: A.M-, P.M +)
 I_{DN} : 법선면 직달일사량
 I_{DH} : 수평면 직달일사량
 I_{DIF} : 산란일사량
 I_S : 천공일사
 I_R : 반사일사
 I_C : 구름에서의 일사량

접수일자 : 2007년 4월 9일, 심사완료일자:2007년 6월 7일
교신저자 : 조덕기(dokkijo@kier.re.kr)

1. 서 론

태양으로부터 방출된 복사는 지구 대기를 지나는 동안 산란과 흡수의 효과를 받으면서 지표면에 도달되며, 이와 같은 과정을 통하여 지표면의 수평면 상에서 입사되는 전일사량을 구분하면, 크게 직달일사량과 산란일사량으로 나눌 수 있다. 직달일사량은 태양복사에너지가 대기권을 통과하면서 대기 중의 분자 또는 부유입자 등과 같은 각종 입자에 의하여 전혀 방해받지 않고 직접 그 방향이 변함 없이 지표면에 도달하는 성분을 말하며, 산란일사량은 대기 내의 이들 부유물에 의해 산란되어 그 방향이 변화하여 지표면에 도달하는 성분을 말한다.

이와 같이 일사량의 성분을 구분하는 이유 중에 하나는 태양광자원이라는 측면에서 볼 때, 그 이용 방법상의 특징에서 찾아볼 수 있다. 우선 현재 흔히 쓰이고 있는 태양전지판 등과 같은 태양광시스템을 설치할 때는 전일사량에 대한 상세한 자료가 요구되어지고 있는 반면에, 넓은 면적에 입사되는 직달일사량을 한곳에 모아 사용하도록 설계된 집광형 태양광발전시스템 등과 같은 기기의 설계나 효율을 예측하기 위해서는 직달일사량에 대한 자료를 요구하고 있다.

미국의 경우를 예로 들면, 성분별 일사량의 측정을 위하여 국립 재생에너지연구소(NREL)를 중심으로 꾸준히 수행해 오고 있다. 그러나 우리나라의 경우는 이들 자료들을 수집하기 위한 측정설비와 기기가 거의 갖추어져 있지 않은 실정이다.

따라서, 한국에너지기술연구원은 효과적으로 태양광에너지의 이용을 돕기 위해 수평면일사계, 일사차광대, 그리고 직달일사계 및 태양추적장치 등 종합적인 성분별 태양광 측정을 위한 관련 장비를 확보하고, 전일사 및 직달과 산란일사 성분에 관한 실측분석과 자료를 수집하여 태양광시스템 설계를 위한 기초자료 등 다각적인 연구사업에 활용하고자 하였다. 우리나라에서 태양광자원 실측 연구사업은 날로 중요성을 더해가고 있는 태양광에너지 이용기

술이 국내에서도 하루 빨리 정착, 실용화 할 수 있도록 국내 태양광자원을 보다 과학적인 방법으로 정확하게 분석, 평가하기 위한 측정기술 및 분석기법의 개발에 주안점을 두고 추진하였다.

2. 이론적 해석기준

대기권내에 입사되는 태양 빛 중 직접 지표면에 도달한 일사를 직달일사라 하며, 이러한 대기권내에 들어온 직달일사 역시 대기중에 흡수와 산란으로 감퇴된다. 일사가 대기를 dm 만큼 통과할 때 dI 정도 감퇴된다고 하면 일사량 감퇴는¹⁾,

$$dI/dm = -kI \quad (1)$$

로 나타낸다. 이것을 다시 풀면,

$$I = I_0 e^{-km} \quad (2)$$

이 얻어지며, 이 때 k 를 소산계수라고 한다. 다시 k 를 없애기 위해 태양이 천장에 있다고 가정했을 때의 일사량을 I' 로 하고 그 때의 통과거리를 m' 로 하면,

$$I' = I_0 e^{-km'} \quad (3)$$

로 되며, 식 (1)과 식 (2)에서 다음 식을 구할 수 있다.

$$I = I_0 (I'/I_0)^{m/m'} \quad (4)$$

이때, I'/I_0 는 태양이 천정에 있을시, 지표면상의 일사강도와 대기권밖 일사강도의 비로서 대기의 투명도의 기준이 되는 값으로 대기투과율이라 하며, P 로서 나타낸다. 또한 m/m' 는 태양고도각이

1) Japan Solar Energy Society, Solar Energy Utilization Handbook, pp. 1-49, (昭和 60).

h일 때와 태양이 천정에 있을 때의 비로서 $\text{cosec } h = 1/\sin h$ 와 같다. 여기서 $1/\sin h$ 는 대기질량 (air mass)이라고 하며, 태양고도각 h는 다음 식²⁾에 의하여 산출할 수 있다.

$$\sin h = \cos \delta \cos \phi \cos \omega + \sin \delta \sin \phi \quad (5)$$

여기서, δ : 일적위
 ϕ : 해당지방의 위도
 ω : 시간각

이다.

따라서, 지표면의 법선면 직달일사량(direct beam normal radiation) 즉, 태양으로부터 투사되는 방향에 직각인 면으로 입사되는 직달일사량을 IDN으로 하면,

$$\text{IDN} = I_0 P^{1/\sin h} \quad (6)$$

$$P = (\text{IDN}/I_0)^{\sin h} \quad (7)$$

로 나타내 진다.

여기서, P의 값은 1에 가까워 질 수록 대기의 공기가 깨끗하다는 의미를 내포한다. 이 값은 지역, 계절, 시각에 따라 변동하며, 통상 청명일의 경우 0.7 ~ 0.8의 값을 갖는다.

이에 따라, 수평면 직달일사량(IDH)은 다음 식에 의해 산출할 수 있다.

$$\text{IDH} = \text{IDN} \sin h \quad (8)$$

한편, 대기의 분자나 부유입자 때문에 산란된 태양 빛은 또 다른 태양이 되어 일부가 지표에 도달하며, 이것을 천공일사(IS)라 한다. 또한 지표면이나 건물 등에서 반사되어 입사하는 일사를 반사일사(IR)라고 하며, 구름을 투과한 일사와 지표면에서의 반사가 구

름에서 재 반사하여 지표면에 도달하는 일사를 "구름에서의 일사(IC)"라 한다. 이 세 종류의 간접적 일사를 합쳐 산란일사(IDIF)라고 한다. 즉,

$$\text{IDIF} = I_S + I_R + I_C \quad (9)$$

로 된다. 따라서, 전일사량(I)는 직달일사(IDIR)와 산란일사(IDIF)의 합계로

$$I = I_{\text{DIR}} + I_{\text{DIF}} \quad (10)$$

가 된다.

여기서, 천공일사는 Berlage가 맑을 때의 천공일사의 관측치를 분석하여 천공을 등휘도확산면(等輝度擴散面)으로 가정해서 유도한 이론식이 보통 사용된다. 수평면 천공일사량은,

$$\text{ISH} = 1/2 I_0 \sin h (1 - P^{1/\sin h} / 1 - 1.4 \log_e P) \quad (11)$$

로 나타낸다. 또한 경사면이 수평과 θ 의 각을 이룰 때 경사면 천공일사량은,

$$\text{ISO} = \cos^2 \theta / 2 \text{ISH} \quad (12)$$

로 주어지며 이에 따라 수직면에서는,

$$\text{ISV} = 1/2 \text{ISH} \quad (13)$$

가 된다.

또한, 지물(地物)에 닿고 반사한 일사가 경사각 θ 의 면에 입사하는 반사일사량은 전면의 지물이 확산면이라고 가정시,

$$\text{IRO} = (1 - \cos^2 \theta / 2) \rho_G I_H \quad (14)$$

가 된다. 여기서, I_H 는 수평면상에서의 전일사량이며, ρ_G 는 평균 반사율이다.

2) Duffie John A. and Beckman William A., Solar Engineering of Thermal Process, John Wiley & Sons, Inc., pp. 3-145, (1991).

3. 측정시스템의 구성

한국에너지기술연구원은 기존 노후된 성분일사량 측정시스템을 교체하고자 2005년 4월부터 새로이 수평면일사계 및 직달일사계 등과 같은 일사 측정용 센서와 태양자동추적장치, 태양차폐장치 (shading ball assembly), 그리고 장기간 데이터를 측정 및 저장할 수 있는 데이터수집장치 등, 관련 부속기기를 설치하고 원거리 측정네트워크 구조의 컴퓨터 통신방식에 의한 성분일사량 자동측정 시스템 구성을 시도하였다. 이와 같이 설치된 시스템에 의하여 측정되는 데이터는 통제소에 설치된 데이터 프로세서의 원격제어에 의해 기존 랜통신

표 1. 성분일사량 수집데이터의 종류 및 설치장비 명세

측정데이터	측기명	형식	비고
수평면 전일사량	수평면일사계	Kipp & Zonen CM11형 (신) Eppley PSP형 (구)	1개
		Kipp & Zonen CH1형 (신) Eppley NIP형 (구)	1개
직달일사량	태양자동 추적장치	Kipp & Zonen 2AP-GD형 (신) Eppley SMT형	1셀
		Kipp & Zonen CM11형 (신) Eppley PSP형 (구)	1개
산란일사량	태양차폐장치	Kipp & Zonen 053705형 (신) Eppley SBS형 (구)	1개
		데이터수집장치	Campbell CR10X-2M형
측정시스템	랜통신 인터페이스	Campbell NL-100형	1개
	전원공급기	Campbell PS100형	1개
	태양전지판	Campbell MSX10형	1개
	이터프로세서	HP Pentium4형	1셀

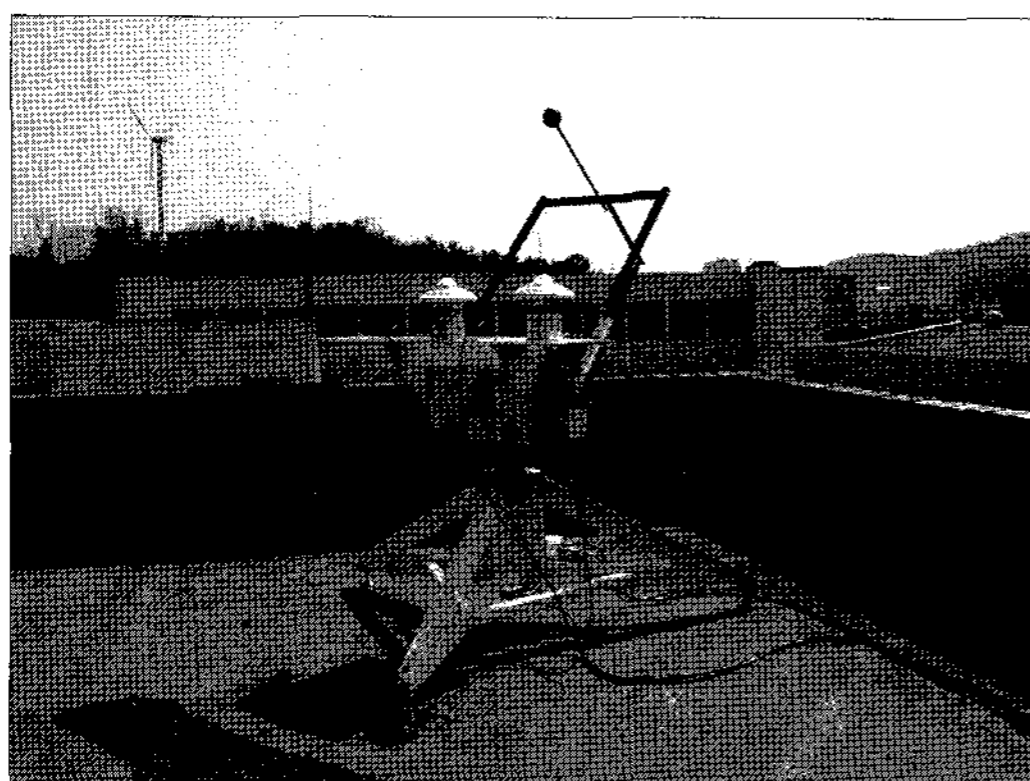


그림 1. 성분일사량 자동측정시스템 설치전경

인터페이스를 통하여 원거리 전송되며, 전송된 데이터는 다시 데이터 파일로 구분하여 하드디스크에 저장시켜 각종 데이터의 분석 및 전산처리를 행할 수 있다.

또한, 통제소에서 전산 처리되고 있는 전산프로그램은 데이터 회수 및 처리용 프로그램으로 이를 통하여 시간별 일사량 자료를 전송 받아 데이터베이스로 재처리해서 저장하고, 이를 지속적으로 보완할 수 있도록 하였다.

그림 1에서 보는바와 같이 측정지에 설치된 태양추적장치 위에 수평면상의 전일사량을 측정하기 위하여 수평면일사계를 설치하였으며, 법선면상에서의 직달일사량 측정하기 위하여 직달일사계를 설치하였다. 또한 수평면상의 산란일사량 측정을 위하여 태양차폐장치와 수평면 일사계를 설치하여 일사량 성분분석을 위하여 일사센서, 태양추적장치, 태양차폐장치, 그리고 데이터수집장치와 관련 부대장치를 각각 설치하였다. 이에 대한 수집데이터의 종류 및 설치장비 명세는 표 1과 같다.

4. 성분일사량의 측정분석

한국에너지기술연구원에 설치하여 운영 중에 있는 성분일사량 자동측정시스템이 위치한 대전지방 (36° 22' N, 127° 22' E)에서 1996년 8월부터 2005년 12월까지 약 9년간에 걸쳐 매 시간마다 측정된 실측자료³⁾를 토대로 청명일만이 아닌 전 기간에 걸친 1일 평균일사량을 성분별로 분석하여 보면, 표 2와 그림 2에서 나타난바와 같이 수평면상에서 전일사량 H에 대한 산란일사량 Hd의 비는 0.39로 나타났으며, 상대적으로 직접 지표면에 도달한 직달일사량 Hb는 0.61로 나타났다. 반면에 지표면에 도달하는 태양빛과 법선 방향의 직달일사량, Hbn은 수평면 전일사량 H에 대해 0.83으로 매우 높은 편이었다.

3) 기상청, "기상년·월보", (1982 ~ 2005).

계절별에 따른 1일 평균 일사량을 성분별로 살펴보면, 표 3에서 나타난바와 같이 수평면상에서 전일사량에 대한 산란일사량의 비, Hd/H는 여름

표 2. 성분별에 따른 일평균 일사량 비교 (단위: kWh/m²/day)

수평면 전일사량 (H)	구 분	성분별 일사량	수평면 전일사량과의 비교
3.67	법선면 직달일사량 (Hbn)	3.05	0.83
	수평면 산란일사량 (Hd)	1.44	0.39
	수평면 직달일사량 (Hb)	2.23	0.61

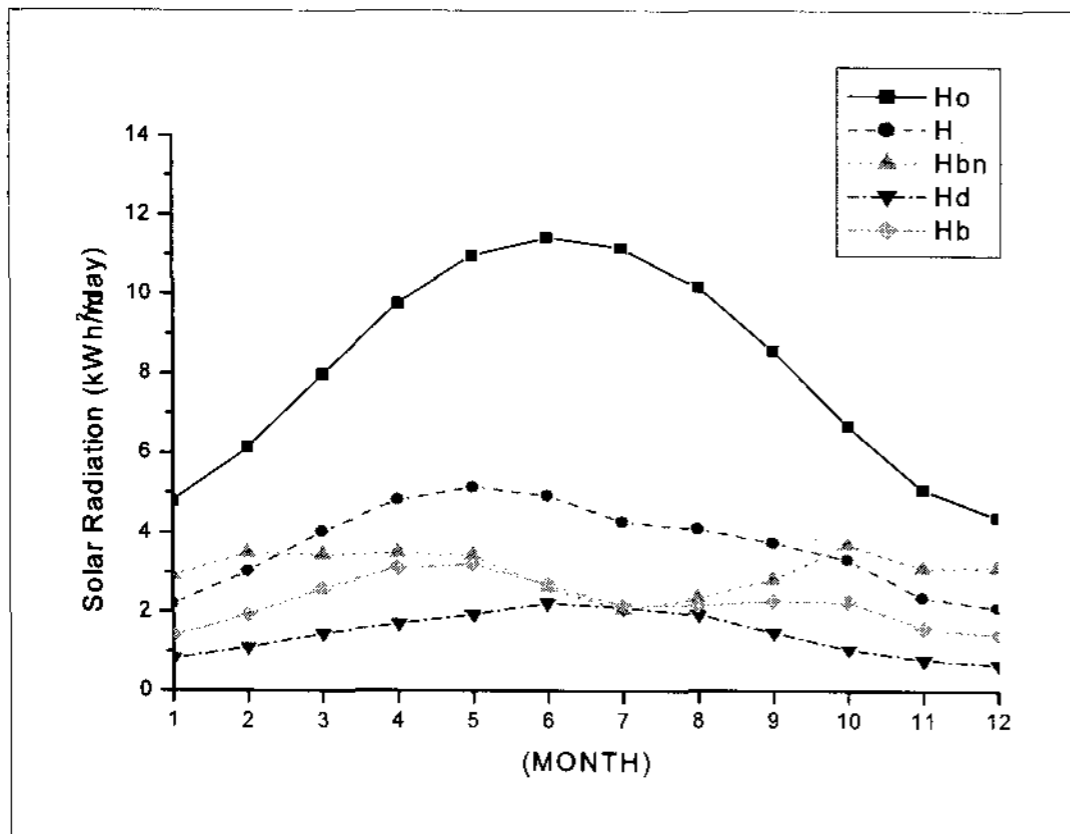


그림 2. 월별 일평균 성분일사량

표 3. 계절별에 따른 일평균 성분일사량 (단위: kWh/m²/day)

구 분 \ 계 절	봄	여름	가을	겨울	평균
대기권밖 일사량 (Hbn)	9.57	10.93	6.78	5.11	8.10
수평면 전일사량 (H)	4.67	4.44	3.15	2.44	3.67
법선면 직달일사량 (Hbn)	3.46	2.35	3.21	3.18	3.05
수평면 산란일사량 (Hd)	1.70	2.09	1.10	0.86	1.44
수평면 직달일사량 (Hb)	2.97	2.35	2.04	1.58	2.23
Ho/H (Kt) (%)	49	41	46	48	45
Hbn/H (Kbn) (%)	74	53	102	130	83
Hd/H (Kd) (%)	36	47	35	35	39
Hb/H (Kb) (%)	64	53	65	65	61

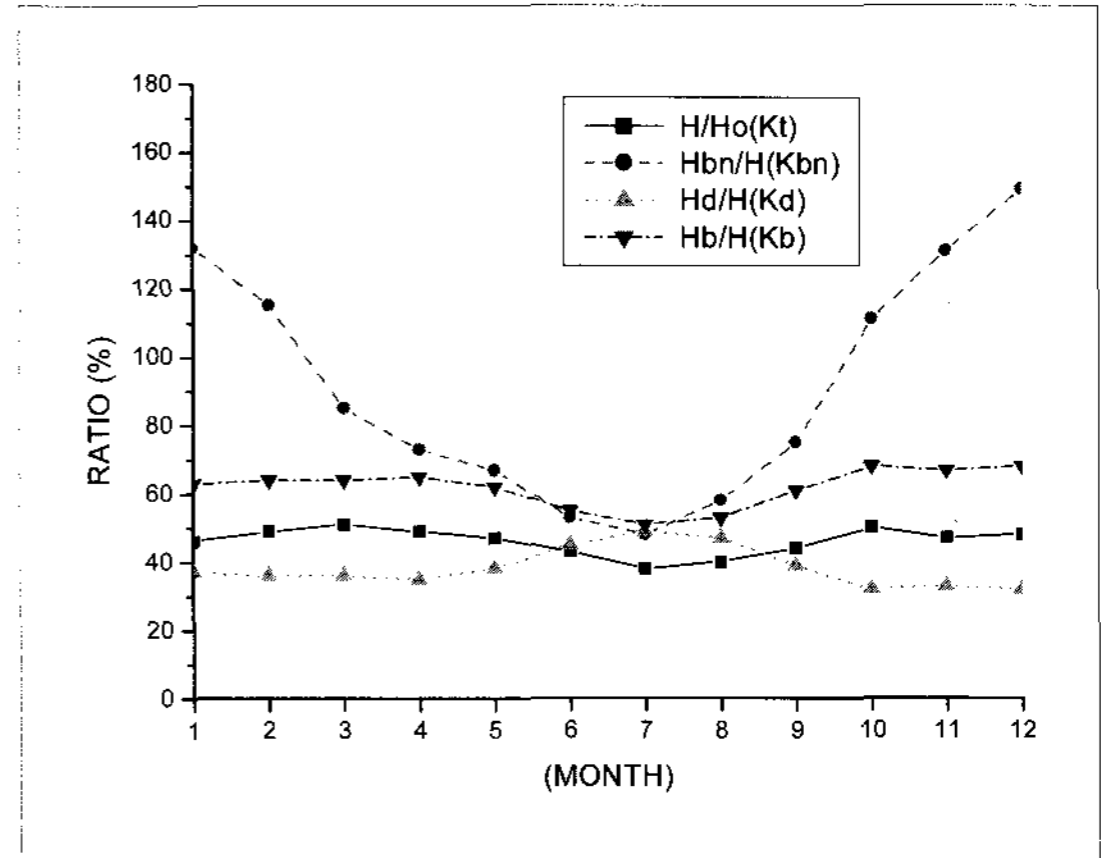


그림 3. 월별 일평균 수평면 전일사량에 대한 성분별 일사량의 비

철에 0.47로 산란일사 성분이 가장 많은 계절로 나타났으며, 가장 적게 나타난 계절은 가을철과 겨울철로 공히 0.35로 나타났다. 반면에 수평면상에서 전일사량에 대한 직달일사량의 비, Hb/H는 가을철과 겨울철에 0.65로 직달일사 성분이 가장 많은 계절로, 가장 적은 계절은 여름철로 0.53으로 나타났다.

또한, 수평면상의 전일사량에 대한 태양과 법선 방향의 직달일사량의 비, Hbn/H는 겨울철에 1.30으로 가장 높게, 그리고 여름철에 0.53으로 가장 적게 나타났다. 따라서 그림 3에서도 나타난바와 같이 다른 계절보다도 수평면상의 전일사량에 대한 수평면상에서의 산란일사량의 직달일사량의 비, Hd/H는 우기철인 여름철에 높게 나타나고 있으며, 상대적으로 수평면상의 전일사량에 대한 수평면상에서의 직달일사량의 비, Hb/H와 수평면상의 전일사량에 대한 태양과 법선 방향의 직달일사량의 비, Hbn/H는 한랭한 겨울철에 전반적으로 높게 나타나는 경향을 보였다.

그러나, 최근에 개발되고 있는 추적식 집광형 태양광발전시스템등과 같은 기기의 설계나 효율 예측, 그리고 그린하우스 설계를 위해서는 직달일사량과 산란일사량에 대한 성분일사량 자료가 요구되고 있다. 지금까지 발표된 직달일사량 자료는 청명

표 4. 월별 일평균 성분별 일사량

(단위 : kWh/m²/day)

구분 \ 월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	평균
ETR	4.80	6.14	7.98	9.77	10.97	11.43	11.17	10.18	8.57	6.67	5.09	4.39	8.10
HOR(H)	2.20	3.03	4.04	4.82	5.14	4.93	4.28	4.10	3.74	3.32	2.37	2.10	3.67
DIRN(Hbn)	2.91	3.50	3.45	3.50	3.43	2.62	2.05	2.37	2.82	3.70	3.10	3.13	3.05
DIFH(Hd)	0.81	1.10	1.46	1.70	1.93	2.23	2.11	1.93	1.47	1.05	0.79	0.68	1.44
DIRH(Hb)	1.39	1.93	2.58	3.11	3.20	2.70	2.17	2.17	2.27	2.27	1.59	1.42	2.23
Kt (%)	46	49	51	49	47	43	38	40	44	50	47	48	45
Hbn/H (%)	132	116	85	73	67	53	48	58	75	111	131	149	83
Hd/H (%)	37	36	36	35	38	45	49	47	39	32	33	32	39
Hb/H (%)	63	64	64	65	62	55	51	53	61	68	67	68	61

일만 측정되었으며, 집광형 태양광발전시스템은 청명일 뿐만 아니라 구름이 있는 날 중에서도 구름에 태양이 구름에 가리지 않는 시간대에도 발전이 가능하기 때문에 전 기후조건을 포함 않는 시간대에도 발전이 가능하기 때문에 전 기후조건을 포함한 날들의 측정자료는 모든 기후조건하에서 직달일사량에 따라 에너지 부하 또는 취득량을 산출할 수 있으며, 여기서 산출된 수평면 전일사량에 대한 성분별 일사량 비율은 전일사량을 측정하는 지역에서 전일사량에 대한 직달일사량 구성 비율을 적용하여 해당 지역의 태양광발전시스템의 크기나 운전조건을 결정하는 기본자료로 활용된다.

참고로 대전지방에서 1996년 8월부터 2005년 12월까지 약 9년간에 걸쳐 측정된 월별 연평균 1일 성분별 일사량 값과 같은 기간 수평면 전일사량에 대한 성분별 일사량의 비 값을 표 4에 제시하였다.

5. 결 론

한국에너지기술연구원에 설치하여 운영 중에 있는 성분일사량 측정시스템이 위치한 대전지방에서 1996년 8월부터 2005년 12월까지 약 9년간에 걸쳐 매 시간마다 측정된 실측자료를 토대로 지금까지 추진해온 태양광자원의 성분분석 평가를 종합해 볼 때 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 전 기간에 걸친 1일 평균일사량을 성분별로

분석한 결과, 수평면상에서 전일사량, H에 대한 산란일사량, Hd의 비는 0.39로 나타났으며, 상대적으로 직접 지표면에 도달한 직달일사량, Hb는 0.61로 나타났다. 반면에 지표면에 도달하는 태양빛과 법선 방향의 직달일사량, Hbn은 수평면 전일사량, H에 대해 0.83으로 매우 높은 편이었다.

(2) 계절별에 따른 1일 평균 성분별 일사량은 수평면상에서 전일사량에 대한 산란일사량의 비, Hd/H는 여름철에 0.47로 산란일사 성분이 가장 많은 계절로 나타났으며, 가장 적게 나타난 계절은 가을철과 겨울철로 공히 0.35로 나타났다. 반면에 수평면상에서 전일사량에 대한 직달일사량의 비, Hb/H는 가을철과 겨울철에 0.65로 직달일사 성분이 가장 많은 계절로, 가장 적은 계절은 여름철로 0.53으로 나타났다. 또한 수평면상의 전일사량에 대한 태양과 법선 방향의 직달일사량의 비, Hbn/H는 겨울철에 1.30으로 가장 높게, 그리고 여름철에 0.53으로 가장 적게 나타났다. 따라서 다른 계절보다도 Hd/H는 우기철인 여름철에 높게 나타나고 있으며, 상대적으로 Hb/H와 Hbn/H는 한랭한 겨울철에 전반적으로 높게 나타나는 경향을 보였다.

(3) 지금까지 발표된 직달일사량 자료는 청명일만 측정되었으며, 집광식 태양광발전은 청명일

뿐만 아니라 구름이 있는 날 중에서도 구름에 태양이 구름에 가리지 않는 시간대에도 발전이 가능하기 때문에 전 기후조건을 포함한 날들의 측정자료는 모든 기후조건하에서 직달일사량에 따라 에너지 부하 또는 취득량을 산출할 수 있으며, 여기서 산출된 수평면 전일사량에 대한 성분별 일사량 비율은 전일사량을 측정하는 지역에서 전일사량에 대한 직달일사량 구성 비율을 적용하여 해당 지역의 태양광발전시스템의 크기나 운전조건을 결정하는 기본자료로 활용될 수 있다.

그러나, 한정된 측정장소와 선진국에 비해 짧은 측정기간으로 인하여 현재까지 만의 결과만을 가지고, 우리나라의 전반적인 일사량 성분평가는 아직 어려운 실정이다. 이에 따라 여러 지역에 대한 장기적인 일사량 성분 측정뿐만 아니라 앞으로는 이를 토대로 하여 일사량 성분예측을 위한 우리나라 전 지역

에 적합한 이론식을 유추해 나아가야 할 것이다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 연구비지원으로 수행되었음 (과제번호 : 2004-NC02-P-01).

참 고 문 헌

1. Japan Solar Energy Society, Solar Energy Utilization Handbook, pp. 1-49, (昭和 60).
2. Duffie John A. and Beckman William A., Solar Engineering of Thermal Process, John Wiley & Sons, Inc., pp. 3-145, (1991).
3. 기상청, "기상년·월보", (1982 ~ 2005).