

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 25, No. 1, 2005

국내 태양열발전단지 건설을 위한 법선면 직달일사량 자원조사

조덕기*, 강용혁*, 오정무*

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

A Survey of Direct Normal Insolation Resources for the Construction of Solar Thermal Power Generation Sites in Korea

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

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

Abstract

Since the direct normal insolation is a main factor for designing any solar thermal power system, it is necessary to evaluate its characteristics all over the country.

We have begun collecting direct normal insolation data since December 1990 at 16 different locations and considerable effort has been made for constructing a standard value from measured data at each station. KIER(Korea Institute of Energy Research's new data will be extensively used by solar thermal concentrating system users or designers as well as by research institutes.

From the results, we can conclude that

1) Yearly mean $5.4 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$ of the direct normal insolation was evaluated for clear day all over 16 areas in Korea.

2) Clear day's direct normal insolation of spring and summer were $5.53 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$ and $5.84 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$, and for fall and winter their values were $5.3 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$ and $4.94 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$ respectively. So, spring and summer were higher, and fall and winter were lower than the yearly mean value.

Keywords : 법선면 직달일사량(Direct Normal Insolation), 측정네트워크(Measurement Network)

1. 서 론

대기권내에 입사하는 태양 빛은 대기를 구성하는 분자에 따라 흡수 및 산란되어 감퇴해서 지구 표면 위에 도달되며, 이 중 지표면상에 떨어질 때까지 입사방향이 직각인 면으로 입사하여 그 방향이 변하지 않고 직접 도달되는 성분을 법선면 직달일사량¹⁾이라고 한다.

법선면 직달일사량은 태양에너지자원이라는 측면에서 보면, 넓은 면적에 입사하는 태양광선을 한곳으로 모아 고온에너지를 얻도록 설계되는 고온 집열시스템, 즉 Dish형 태양열집광시스템, 태양로와 같은 기기²⁾를 이용한 태양열 발전시스템의 개발과 보급을 위해서는 법선면 직달일사량의 측정과 평가는 절대적으로 요구된다.

그동안 평판형 집열기나 온수기, 건조기, 증류기, 그린하우스 등과 같이 낮은 온도 하에서 동작하는 태양열시스템이나 태양전지 등과 같은 태양광발전시스템을 설치할 때는 수평면 전일사량에 대한 상세한 자료가 요구되어 이에 대한 국내 수평면 전일사량 조사가 연구되어 온 반면에, 최근에는 넓은 면적에 입사되는 직달일사량을 한곳에 모아 중고온을 사용하도록 설계된 태양열집광기와 이를 응용한 태양열 발전시스템 설계나 효율을 예측하기 위하여 직달일사량에 대한 자료가 절실히 요구되고 있는 실정이다.

이에 따라 한국에너지기술연구원은 관련 장비를 확보하고 1990년 말부터 우리나라 주요지역에 법선면 직달일사량 측정네트워크를 구성하여 집광식 태양열시스템 및 관련 기기 설계를 위한 보다 정확한 기초자료 수집을 시도하였다.

본 논문에서는 측정기간 동안에 얻은 각 지역의 법선면 직달일사량 자료를 월별 및 1일 평균 혹은

특정한 기간별로 정리, 분석하고 그 결과를 통하여 지역간의 법선면 직달일사량 자원 현황과 자원 환경 분석을 평가하고자 하였다. 따라서 본 연구를 통하여 법선면 직달일사량 자원이 풍부한 지역에 대한 발굴조사와 자원부존량 분석을 통하여 우리나라에서의 태양열발전단지의 건설을 위한 최적지를 선정하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 태양열 발전시스템 현황

태양복사열은 지구상에서 최대의 신재생에너지 자원이라 할 수 있다. 전세계 사막 지역의 약 1% 정도만 태양열 발전소가 건설되어진다고 하더라도 전세계 수요 발전량에 해당하는 충분한 전기를 생산할 수 있다. 이런 태양열 에너지원은 풍력 또는 바이오메스 보다 전세계의 훨씬 넓은 지역에 걸쳐 태양권역이 고르게 분포하고 있어, 보다 넓은 지역에서 에너지원의 이용이 가능하다.

태양열 발전은 선진 외국에서는 이미 오래 전부터 연구되어 이미 성공적으로 개발된 기술로 선진 외국의 경우, 1980년대 후반 이미 미국, 독일 및 호주 등의 국가에서 태양열 발전시스템의 실용화 및 상용화가 이루어 졌으며, 태양열 발전시스템이 향후 2000년대 중반까지 전 세계적으로 약 9GW의 발전을 위하여 사용될 것이라는 연구보고서가 미국 DOE에 의하여 제시되기도 하였다.

고집광기술의 선진국인 미국을 포함하여 프랑스, 독일, 이스라엘 등에서는 태양열발전을 위한 집광비 600 sun이상의 Dish형 시스템에서부터 초고온(2,000 °C) 획득을 위한 집광비 10,000 sun이상의 태양로를 실현하여 첨단 신물질 및 신소재 제조 등에 이용하고 있다.

현재 태양열 발전시스템의 발전 단가가 US¢ 12 ~20/kWh이며, 장기 발전 단가가 US¢ 5~10/kWh으로, 가장 경제적인 신재생에너지 발전 기술 중의 하나이며, 미래에 화석 연료를 에너지 원으로 하는 발전 단가와 경쟁 할 수 있는 최소의

1) Lunde P.J., Solar Thermal Engineering, John Wiley & Sons New York, 1980.

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

태양열 발전 단가라고 할 수 있다.

그러나 전 세계적으로 태양열발전이 대규모 발전에서 소규모 발전으로 개발 보급되고 있는 시점에서 국내의 경우 태양열발전에 관한 연구는 아직 개발단계이며 설치된 예가 전무한 상태로 Dish형 태양열 집광기의 설계, 제작 기술은 확보한 상태이나 태양열 발전을 위한 스테링엔진의 개발은 초보단계이다.

태양열 발전 등을 위한 중·고온 집광시스템의 경우에는 수평면 일사량보다 상대적으로 높은 겨울철 법선면 직달일사량을 이용할 수 있어 겨울철 획득열량이 평판형에 비해 높고, 기존 평판형 태양열집열기의 한계인 중고온 생산에 년중 높은 집열효율을 유지하여 사계절 내내 같은 부하의 공급이 이루어져 태양열시스템의 년중사용에 따른 경제성 증가 및 적용분야 확대가 가능하다.

따라서 직달일사량 자원분석 및 평가는 고온집열 및 태양열발전시스템의 개발과 최적화를 위해서 절대적으로 요구되는 기초부문이며, 장기성능 예측 및 평가를 위해서도 필수적인 자료이다.

태양열 발전을 위한 최소한의 법선면 직달일사량의 수준은 시간당 평균 600 Wh/m^2 정도로 국내의 경우 직달일사량은 청명일 연평균 5.4 kWh/m^2 ($4,600 \text{ kcal/m}^2$)로 나타나, 국내 중고온 이용 분야에 맞는 최적화 고집광 태양열시스템 설계에 이용이 가능하다. 이 평균치는 미국의 알바쿠키나 엘파소 등의 남부사막지대보다는 30% 정도 낮은 반면, 매디슨, 보스턴, 뉴욕, 시애틀 등 3.5 kWh/m^2 ($3,000 \text{ kcal/m}^2$)³⁾대를 기록하고 있는 북부 대도시지역보다는 상대적으로 40% 이상 많은 양이다.

이는 국내 직달일사량 자원이 고집광 태양열 이용에 가능하다는 점이 입증되어 이번 결과로 앞으로의 태양열에너지 고집광 이용기술의 활성화가 기대된다.

3. 측정네트워크의 구성 및 자료처리

측정지 선정작업에 고려된 사항들은 우선, 측정지 상호간의 거리는 가능한 균등하게 유지하기 위하여 전국을 위도와 경도로 등분하여 측정지 분포를 고르게 하였으며, 가능한 내륙 및 해안 등 지역적 특수성에 따른 일사량 변동형태를 연구할 수 있도록 측정지 선정에 반영하였다. 또한 측정지는 시스템의 관리유지와 데이터수집이 용이하게 할 수 있도록 기상청의 협조를 얻어 해당지역 기상대와 당 연구원을 측정지로 하였으며, 사업추진 경비를 고려하여 측정지를 표 1에서와 같이 16개소로 한정하였다.

측정장치는 미국 Eppley사가 제작한 NIP(Normal Incidence Pyrheliometer) 직달일사계)와 태양자동추적장치(모델 SMT), 그리고 미국 Vaisala사가 제작한 데이터수집장치(모델 570 A)를 사용하였다.

표 1. 전국 법선면 직달광자원 측정지 명세

지역명	지역번호	위도	경도	고도
춘천	101	37° 54'	127° 44'	74.0 m
강릉	105	37 45	128 54	26.0
서울	108	37 34	126 58	85.5
원주	114	37 20	127 57	149.8
서산	129	36 46	126 28	19.7
청주	131	36 38	127 26	59.0
대전	133	36 22	127 22	67.2
포항	138	36 02	129 24	2.5
대구	143	35 53	128 37	57.8
전주	146	35 49	127 09	51.2
광주	156	35 10	126 53	70.3
부산	159	35 06	129 02	69.2
목포	165	34 49	126 22	36.5
제주	184	33 31	126 32	22.0
진주	192	35 12	128 06	21.5
영주	272	36 52	128 31	209.5

3) NREL, Solar Radiation Data Manual for Flat-Plate and Concentrating Collectors, DE 93018229, 1994.

그 외에 측정네트워크⁴⁾에 설치된 개개의 시스템에서 측정된 데이터를 전송매체인 기존 통신회선을 이용하여 통제소(key station)에서 수신할 수 있고, 또한 시스템을 제어할 수 있는 형태로 결합시켜 유기적으로 작동하게 하는 컴퓨터통신망을 구성하였으며, 또한 시스템 가동에 필요한 전력을 자체 내에서 조달하고, 측정작업과 이에 따른 데이터의 자체 저장처리 문제를 스스로 해결할 수 있도록 측정의 자동화를 시도하였다.

관측지에서 측정된 자료의 처리는 현재 한국에너지기술연구원에서 전산 처리되고 있으며, 특히 실시간으로 측정된 데이터를 시간별로 평균하여 데이터를 데이터베이스(DBASE) 형태로 재처리하여 저장하고, 지속적으로 자료를 보완할 수 있도록 각종 분석용 프로그램과 데이터의 상호교환이 가능하도록 하였다. 자료분석은 주로 분포현황 분석과 양적비교 분석, 경년변화 분석으로 구분하여 국내 법선면 직달일사량 자원의 전반적인 평가가 가능하도록 총량적 분석내용으로 다루었다. 분석대상자료는 전국을 대상으로 1990 ~ 2003년 사이에 걸쳐 측정된 대략 24년간 평균자료가 사용되었다.

4. 분석결과

4.1 분포형태

우리나라 주요 16개 지역에서 '90. 12 ~ 2003. 12 사이에 1일 평균 운량값이 0 또는 1 이하인 청명(淸明)한 날에 매 시간마다 측정된 실측자료를 토대로 전기간에 걸친 법선면 직달일사량(法線面 直達日射量) 즉, 태양과 법선방향의 법선면 직달일사량을 분석하여 보면, 표 2에서 나타난바와 같이 전지역에서 청명한 날 하루에 연평균 5.4 kWh/m² 정도의 직달일사 에너지를 받고 있는 것으로 나타났다.

계절별로 분석하여 보면, 표 2에서 나타난바와 같이 연중(年中) 여름철의 법선면 직달일사량 조건이 가장 좋은 것으로 나타났으며, 겨울철은 연평균치에도 못 미치는 낮은 수준인 것으로 나타났다.

표 2. 계절별 법선면 직달일사량의 변동추이 (청명일 기준)
(단위 : kWh/m²/day)

구분 \ 계절	봄	여름	가을	겨울	연평균(A)
법선면 직달일사량(DN)	5.53	5.84	5.30	4.94	5.40
DN/A (%)	102	108	98	91	100
수평면 전일사량(HO)	5.94	6.69	4.13	3.13	4.97
HO/A (%)	120	135	83	63	100
DN/HO (%)	93	87	129	158	109

연평균치에 대한 각 계절별 법선면 직달일사량(DN)의 비율은 봄철(3~5월)과 여름철(6~8월)이 각각 2%, 8% 높았고, 가을철(9~11월)과 겨울철(12~2월)은 각각 연평균치에 비해 2%, 9% 정도 낮게 나타났으며, 같은 기간동안 한국에너지기술연구원에서 측정된 수평면 전일사량(HO)의 계절별 변동추이 역시 법선면 직달일사량과 유사한 분포경향을 보였다. 또한 수평면 전일사량에 대한 법선면 직달일사량의 비, DN/HO는 연중 겨울철이 158%로 가장 높게, 여름철이 87%로 가장 낮게 나타났다. 월별로는 그림 1에서 보는바와 같이 여름철인 8월에 법선면 직달일사량이 가장 많은 달로 나타났으며, 가장 적게 나타난 달은 겨울철인 12월로 나타났다. 또한 수평면 전일사량에 대한 법선면 직달일사량의 비, DN/HO는 그림 2에서 보는바와 같이 겨울철인 12월에 176%로 가장 높은 달로 나타났고, 가장 낮은 달은 초여름철인 6월에 81%로 나타났다.

4.2 지역별 분포형태

우리나라 주요 16개 지역에서 '90. 12 ~ 2003.

4) 조덕기외, 국내 수평면 전일사량 자원의 분포특성 분석, 한국태양에너지학회, Vol. 20, No. 2, 2000.

12 사이에 청명한 날 측정된 지역별 법선면 직달 일사량의 연평균치를 살펴보면, 그림 3과 그리고 같은 기간동안 실측된 자료의 평균치를 가지고 전 산시물레이션 기법으로 그린 그림 4에서 나타난바 와 같이 하루에 5.6 kWh/m² 이상의 법선면 직달 일사량을 받는 비교적 큰 지역은 광주-진주를 잇 는 남원분지 및 진주분지 일대와 대전-청주를 잇 는 대전분지, 그리고 역시 분지지대인 춘천-원주- 영주-포항을 잇는 일대임을 알 수 있으며, 그 중 에서도 특히 대전지역은 하루에 6.0 kWh/m² 이 상인 것으로 나타났다.

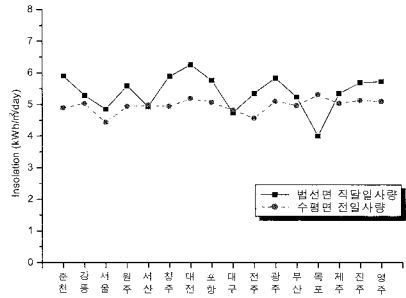


그림 3. 우리나라 주요 지역별에 따른 법선면 직달 일사량 및 수평면 전일사량의 연평균치

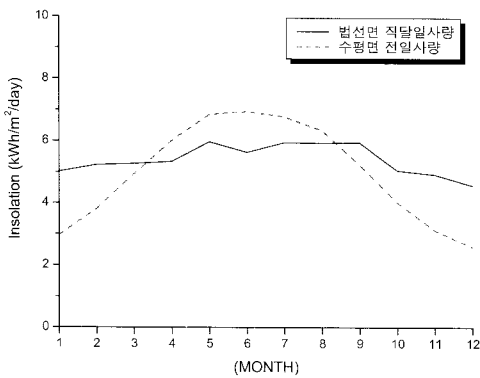


그림 1. 우리나라 주요 16개 지역 평균 법선면 직달일사량 및 수평면 전일사량

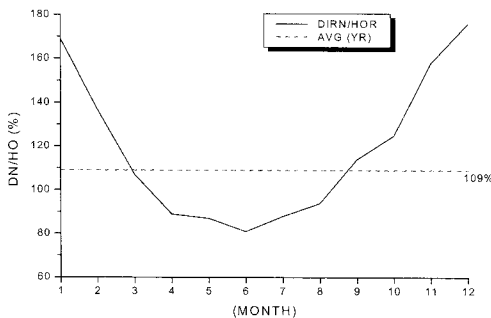
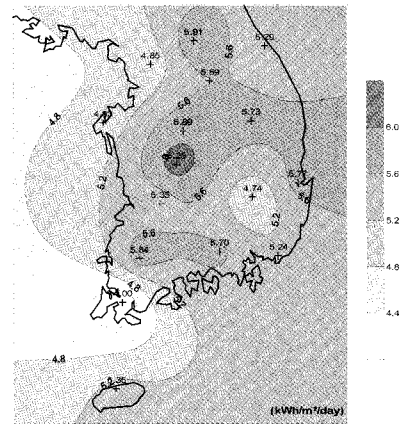
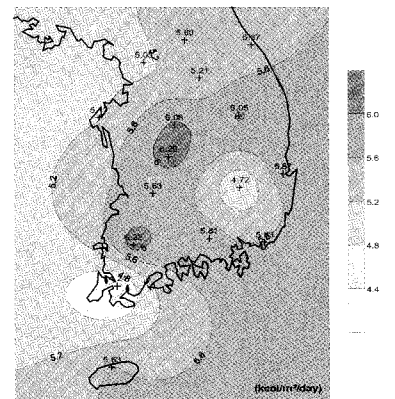


그림 2. 우리나라 주요 16개 지역 평균 월별 수평면 전일사량에 대한 법선면 직달일사량의 비



Annual-average (1990-2003)

그림 4. 전국 연평균 1일 법선면 직달일사량 자원분포도



Spring (Mar.-May)

그림 5. 전국 봄철 일평균 법선면 직달일사량자원 분포도

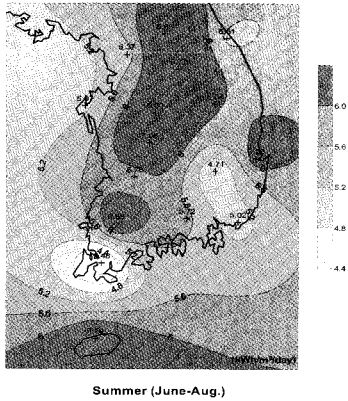


그림 6. 전국 여름철 일평균 법선면 직달일사량자원 분포도

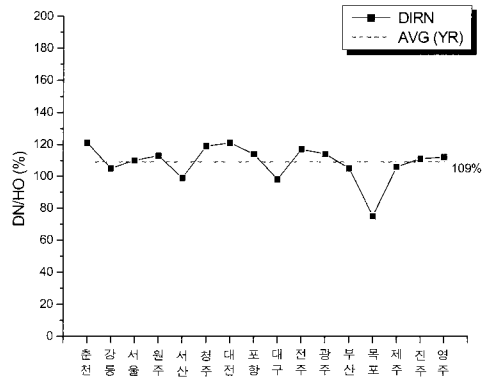


그림 9. 우리나라 주요 지역별 연평균 수평면 전일사량에 대한 법선면 직달일사량의 비

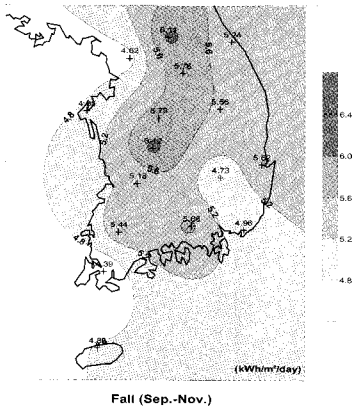


그림 7. 전국 가을철 일평균 법선면 직달일사량자원 분포도

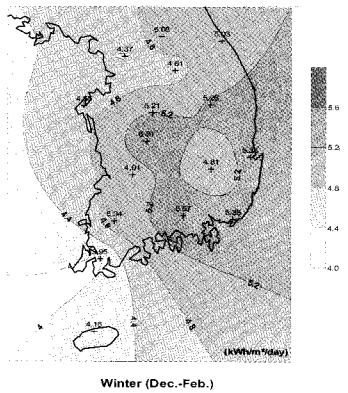


그림 8. 전국 겨울철 일평균 법선면 직달일사량 자원분포도

또한, 법선면 직달일사량이 비교적 낮은 하루에 4.4 ~ 4.8 kWh/m²인 지역은 수도권지역인 서울과 대도시지역인 대구, 해안지역인 서산으로 나타났으며, 하루 4.0 kWh/m² 정도로 매우 작은 지역은 역시 해안지역인 목포로 나타났다.

계절별로 분포특징을 살펴보면, 그림 5 ~ 그림 8에서와 같이 봄철의 일사조건은 광주-대전-영주 지역 일원을 잇는 분지대에서 높게 나타나고 있는 반면에, 대도시지역인 서울, 대구와 해안지역인 목포 일원은 전국에서 가장 낮게 나타나는 현상을 보였다. 여름철은 광주와 대전-청주-원주 춘천을 잇는 중부이북지방과 제주지방 일원에서 가장 높게 나타난 반면에, 대도시지역인 서울과 부산, 대구, 그리고 해안지역인 서산, 목포지방에서 상대적으로 낮게 나타났다.

또한, 가을철은 전주-대전-청주-원주-춘천을 잇는 분지대 일원에서 비교적 타지역에 비해서 높게 나타나고 있는 반면에, 대도시지역인 서울, 대구, 부산과 해안지역인 서산, 목포, 제주지방에서는 낮게 나타났다. 겨울철은 대전 및 영주분지와 진주-부산-포항을 잇는 일원에서 비교적 높게 나타났으나, 서산-서울-원주를 잇는 일원과 목포-제주를 잇는 일원은 전국에서 가장 낮게 나타나는 현상을 보였다. 이와 같이 이들 지역이 타지역에

비해 낮게 나타나는 원인은 특히, 겨울철 도심난방으로 인한 스모그 현상과 겨울철의 계절풍이 이들 지역의 법선면 직달일사 조건에 상당한 영향을 미치고 있는 것으로 믿어진다. 또한 대부분의 서해안지역은 중부 내륙지방과 동해안지역에 비하여 낮게 나타났다.

한편, 같은 기간동안 수평면 전일사량에 대한 법선면 직달일사량의 비, DN/HO는 그림 9에서 나타난바와 같이 대도시지역인 부산, 대구와 강릉, 서산, 목포, 제주와 같은 해안지역에서는 전지역의 연평균치에 비하여 낮게 나타나는 경향을 보인 반면에, 서울, 춘천, 원주, 영주, 청주, 유성, 전주, 광주 등 수도권지역과 중북부 산간지방, 그리고 일부 분지지역 일대에서 높게 나타나는 경향을 나타내어 대체로 해안지방보다는 내륙지방에서 법선면 직달일사 조건이 큰 것으로 나타났다.

5. 결 론

우리나라 주요 16개 지역에서 '90. 12 ~ 2003. 12 사이에 1일 평균 운량값이 0 또는 0.1 이하인 청명(淸明)한 날에 매 시간마다 측정된 실측자료를 토대로 전국 법선면 직달일사량에 대한 실측평가 사업을 종합해 보면, 다음과 같은 결론을 얻게 된다.

- 1) 전기간에 걸친 법선면 직달일사량을 분석한 결과, 전지역에서 청명한 날 하루에 연평균 5.4 kWh/m^2 정도의 일사에너지를 받고 있는 것으로 나타났다.
- 2) 계절별로는 연중(年中) 여름철의 법선면 직달일사조건이 가장 좋은 것으로 나타났으며, 겨울철은 가장 낮게 나타났다. 연평균치에 대한 각 계절별 법선면 직달일사량의 비율은 봄과 여름철이 각각 2%, 8% 높았고, 가을철과 겨울철은 각각 연평균치에 비해 2%, 9% 정도 낮게 나타났으며, 같은 기간동안 수평면 전일사량의 계절별 변동추이 역시 법

선면 직달일사량과 유사한 분포경향을 보였다. 또한 수평면 전일사량에 대한 법선면 직달일사량의 비는 연중 겨울철이 158%로 가장 높게, 여름철이 87%로 가장 낮게 나타났다.

- 3) 우리나라 주요 16개 지역에서 측정된 지역별 법선면 직달일사량의 연평균치를 분석한 결과, 하루에 5.6 kWh/m^2 이상의 법선면 직달일사량을 받는 비교적 큰 지역은 광주-진주를 잇는 남원분지 및 진주분지 일대와 대전-청주를 잇는 대전분지, 그리고 역시 분지지역인 춘천-원주-영주-포항을 잇는 일대를 알 수 있으며, 그 중에서도 특히 대전 지역은 하루에 6.0 kWh/m^2 이상인 것으로 나타났다. 반면에 법선면 직달일사량이 비교적 낮은 하루에 $4.4 \sim 4.8 \text{ kWh/m}^2$ 인 지역은 수도권지역인 서울과 대도시지역인 대구, 해안지역인 서산으로 나타났으며, 하루 4.0 kWh/m^2 정도로 매우 작은 지역은 역시 해안지역인 목포로 나타났다.
- 4) 계절별로 분포특징을 분석한 결과, 봄철의 일사조건은 광주-대전-영주지역 일원을 잇는 분지지역에서 높게 나타나고 있는 반면에, 대도시지역인 서울, 대구와 해안지역인 목포 일원은 전국에서 가장 낮게 나타나는 현상을 보였다. 여름철은 광주와 대전-청주-원주-춘천을 잇는 중부이북지방과 제주지방 일원에서 가장 높게 나타난 반면에, 대도시지역인 서울과 부산, 대구, 그리고 해안지역인 서산, 목포지방에서 상대적으로 낮게 나타났다. 또한, 가을철은 전주-대전-청주-원주-춘천을 잇는 분지지역 일원에서 비교적 타지역에 비해서 높게 나타나고 있는 반면에, 대도시지역인 서울, 대구, 부산과 해안지역인 서산, 목포, 제주지방에서는 낮게 나타났다. 겨울철은 대전 및 영주분지와 진주-부산-포항을 잇는 일원에서 비교적 높게 나타났으나, 서산-서울-원주를

있는 일원과 목포-제주를 잇는 일원은 전국에서 가장 낮게 나타나 현상을 보였다.

그러나, 측정기간이 충분하지 못하기 때문에 우리나라 전지역에 대한 정확한 법선면 직달일사량 자원을 평가한다는 것은 아직 어려운 실정이다. 또한 앞으로는 본 연구사업을 바탕으로 고도나 대기오염도 등의 변화에 따른 일사량의 변동형태 등, 대기조건과의 연관성도 규명해 나아갈 계획이다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 연구비지원으로 수행되었음(과제번호 : 2004-N-PS04-P-03-0-000-2004).

참 고 문 헌

1. Lunde P.J., Solar Thermal Engineering, John Wiley & Sons New York, 1980.
2. Duffie John A. and Beckman William A., Solar Engineering of Thermal Process, John Wiley & Sons, Inc., 1991, pp. 3-145.
3. NREL, Solar Radiation Data Manual for Flate-Plate and Concentrating Collectors, DE 93018229, 1994.
4. 조덕기외, 국내 수평면 전일사량 자원의 분포 특성 분석, 한국태양에너지학회, Vol. 20, No. 2, 2000.