지형효과를 고려한 강원지역의 태양광 발전지도 개발

지준범*, 조일성**, 이규태**, 이원학***

*강릉원주대학교 자연과학연구소(rokmc717@gwnu.ac.kr), **강릉원주대학교
대기환경과학과(zoisung@gwnu.ac.kr/ktlee@gwnu.ac.kr), ***강원발전연구원(whlee@gdri.re.kr)The Development of Photovoltaic Resources Map
Concerning Topographical Effect on Gangwon Region

Jee, Joon-Bum* Zo, Il-Sung** Lee, Kyu-Tae** Lee, Won-Hak***

*Research Institute of Natural Sciences, Gangneung-Wonju National University(rokmc717@gwnu.ac.kr),
**Dept. of Atmospheric and Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National
University(zoisung@gwnu.ac.kr/ktlee@gwnu.ac.kr), ***Research Institute of Gangwon Development(whlee@gdri.re.kr)

Abstract

The GWNU (Gangneung-Wonju national university) solar radiation model was developed with radiative transfer theory by Iqbal and it is applied the NREL (National Research Energy Laboratory). Input data were collected and accomplished from the model prediction data from RDAPS (Regional Data Assimilated Prediction Model), satellite data and ground observations. And GWNU solar model calculates not only horizontal surface but also complicated terrain surface. Also, We collected the statistical data related on photovoltaic power generation of the Korean Peninsula and analyzed about photovoltaic power efficiency of the Gangwon region. Finally, the solar energy resource and photovoltaic generation possibility map established up with 4 km, 1 km and 180 m resolution on Gangwon region based on actual equipment from Shinan solar plant, statistical data for photovoltaic and complicated topographical effect.

Keywords : 태양광(Photovoltaic), 태양에너지 자원지도(Solar energy resource map), GWNU 태양복사 모델(GWNU solar radiation model), 강원지역(Gangwon region)

기 호 설 명

		θ	: 태양 천정각 ($^{\circ}$)
		τ	: 광학두께
		t	: 투과율
I	: 전천일사 (W/m^2)	$H(\phi)$	: 그림자 각(shading angle)
I_d	: 직달일사 (W/m^2)	V	: 하늘시계요소(sky view factor)
I_s	: 산란일사 (W/m^2)		

투고일자 : 2011년 1월 18일, 심사일자 : 2011년 1월 20일, 게재확정일자 : 2011년 2월 28일
교신저자 : 지준범(rokmc717@gwnu.ac.kr)

1. 서 론

태양으로부터 방출되는 복사 에너지(65,700 TW/year)가 대기를 통과하는 동안 65% 정도 감쇠하여 지표면에 도달하는 양은 약 23,000 TW/year로 다른 어떤 종류의 에너지원보다도 많은 양이다(Perez and Perez, 2008). 상용화된 태양광 발전 제품의 효율은 약 15% 정도으로써 지표면에 도달하는 일사량이 1 KW/m^2 일 경우 태양 전지는 0.15 KW/m^2 의 전력을 얻을 수 있다(신재생에너지센터, 2008). 태양광 발전을 계획할 경우 그 경제성 평가를 위해서는 발전소 입지 조건과 부지 비용 그리고 인구 밀도 및 송전 비용 등 많은 요소들이 사전에 검토되어야 하며 이때 지표면에 도달하는 태양광의 시·공간 분포 특성은 가장 우선 분석되어야 하는 중요 요소이다.

실제 태양 에너지의 평가는 관측 자료를 토대로 평가되어야 하지만 지상에서의 관측 자료 및 관측지점이 부족하며 복잡한 지역에서 세밀한 태양에너지의 평가 및 활용에는 추론 및 경험식을 이용한다. 지상에 도달하는 태양에너지는 이론적인 모델을 이용하여 비교적 정확하게 예측될 수 있으나 이러한 모델을 구동하기 위해서는 고해상의 많은 입력 자료들이 요구되어진다. 입력 자료와 태양복사 모델을 활용하면 강원지역의 복잡한 지형에 따른 고해상도의 태양 에너지 자원지도를 구축할 수 있다. GIS기반의 태양복사 모델의 연구로는 Klingseisen et al.(2007)의 연구가 있었으며 지리정보 소프트웨어인 ArcGIS에서는 태양복사 계산틀이 개발되어 사용되어지고 있다. 지형고도(DEM) 자료 기반의 태양복사 모델의 연구로는 Aguilar et al.(2010) 그리고 Lai et al.(2010) 등 다양하며 이들은 복잡한 지형에서 태양에너지의 지면도달 및 차폐에 대하여 다양한 계산 방법을 제안하였으며 태양광발전에 적용되고 있다.

강원지역은 태백산맥을 중심으로 비교적

고도가 높고 복잡한 지형으로 인하여 자원개발 및 토지이용이 한정적으로 이루어지고 있으며 다른 지역과 비교하여 면적대비 활용성이 현저하게 떨어지고 있다. 따라서 이 연구에서는 복잡한 지형 및 고해상의 자료들을 이용하여 태양 에너지 자원지도를 구축하고 태양발전관련 자료들을 적용하여 태양광 발전 가능성 및 효율성을 평가하였다.

2. 자료 및 방법

2.1 태양복사 모델

이 연구에서는 조일성 등(2010)이 개발한 강원주대학교(GWNU) 태양복사 모델을 이용하였다. 이 모델은 Iqbal(1983)의 태양복사 모델이론을 기반으로 제작되었으며 미국 NREL에서 사용된 태양복사 모델(Bird, 1984) 이론을 수정 및 적용하였다. 지표면에 도달하는 태양광(태양복사)은 물리적 과정에 따라 직달 일사와 산란 일사로 구분되고 지표면에서 이 요소들은 분리 관측(직달과 산란 및 전천 일사)할 수 있다. 즉 지표면에 도달하는 태양광은 직달 성분($I_{d\lambda}$)과 산란 성분($I_{s\lambda}$)으로 분리되며 직달 태양광은 다음과 같이 계산된다.

$$I_{d\lambda} = I_{0\lambda} E_0 \cos\theta \exp(-\tau_{\lambda}) \quad (1)$$

이 식에서 λ 는 파장을 의미하고 $I_{0\lambda}$ 는 대기 외 일사량(extraterrestrial radiation)이며 E_0 는 지구와 태양사이의 거리변화를 나타내는 이심율(eccentricity)이다. 그리고 θ 는 천정각(solar zenith angle)이며 τ_{λ} 는 흡수 기체들에 대한 광학 두께(optical thickness)이며 투과율 $t_{\lambda} = \exp(-\tau_{\lambda})$ 로 나타낼 수 있고 대기의 성분에 따른 투과율은 다음과 같이 표시된다.

$$t_{\lambda} = t_{r\lambda} t_{a\lambda} t_{o\lambda} t_{wa\lambda} t_{g\lambda} \quad (2)$$

식 (8)의 $t_{r\lambda}$, $t_{a\lambda}$, $t_{o\lambda}$, $t_{wa\lambda}$, $t_{g\lambda}$ 는 각각 공기 분자, 에어로솔, 오존, 수증기 그리고 혼합 기체에 대한 투과율로써 이 연구에서는 다음과 같은 경험식들을 사용하였다(Iqbal, 1983).

$$t_{o\lambda} = \exp(-k_{o\lambda} l m_o) \quad (3)$$

$$t_{wa\lambda} = \exp[-0.2385 k_{wa\lambda} w m_r / (1 + 20.07 k_{wa\lambda} w m_r)^{0.45}] \quad (4)$$

$$t_{r\lambda} = \exp(-0.008735 \times m_a \times \lambda^{-4.08}) \quad (5)$$

$$t_{a\lambda} = \exp(-\beta \times (\lambda/0.55)^{-\alpha} m_r) \quad (6)$$

$$t_{g\lambda} = \exp[(-1.41 k_{g\lambda} m_a) / (1 + 118.93 k_{g\lambda} m_a)^{0.45}] \quad (7)$$

식 (9) ~ (13)에 나타난 변수들 중 $k_{o\lambda}$ 와 $k_{g\lambda}$ 및 $k_{wa\lambda}$ 는 오존과 혼합 기체 및 수증기에 대한 파장별 흡수계수이고 α 는 에어로솔 상수로써 파장이 $0.5 \mu\text{m}$ 보다 작을 경우 1.027이고 나머지는 1.206이 사용되었으며 l 과 w 는 각각 연직 오존량과 가강수량이다. 그리고 m_r 은 공기분자의 상대 광학 질량(relative optical mass)으로써 m_a 는 기압 보정된 값이며 m_o 는 오존에 대한 상대 광학 질량이다(Kasten, 1966).

지표면에 도달하는 산란 태양광($I_{s\lambda}$)은 공기 분자에 의한 산란($I_{r\lambda}$)과 에어로솔 산란($I_{a\lambda}$) 그리고 대기 및 지표면과의 다중산란($I_{g\lambda}$)의 합으로 다음과 같이 표시된다.

$$I_{s\lambda} = I_{r\lambda} + I_{a\lambda} + I_{g\lambda} \quad (8)$$

식 (1)의 직달 일사와 식 (8)의 산란 일사는 아래의 식을 이용하여 지표면에 도달되는 전천 일사를 계산할 수 있다.

$$I = I_{d\lambda} \cos \theta + I_{s\lambda} \quad (9)$$

이상과 같은 태양 복사 모델에서 식 (3) ~ (7)의 흡수계수들($k_{o\lambda}$ 와 $k_{g\lambda}$ 및 $k_{wa\lambda}$ 등)은 여러 기층에 따른 고도와 기압 함수이나 이 연

구에서는 단일 기층을 가정하였기 때문에 일정 수준의 오차가 유발될 수 있다. 그러나 시·공간 분포에 따른 연직 입력 자료 확보가 불가능하고 계산 시간이 오래 걸리는 단점 때문에 이 연구를 위해서는 다층 모델 채택은 적절하지 못하기 때문에 GWNU 태양복사 모델은 다층 기준 모델(Line-by-Line Model; Chou and Suarez, 1999)을 이용하여 보정하였다.

2.2 태양복사 모델 입력 자료

지표면 도달 일사량을 계산하기 위하여 2.1절에 설명된 GWNU 태양복사 모델을 이용하였으며 이 모델을 구동하기 위한 입력 자료는 2009년 위성과 지역규모의 수치 모델 그리고 관측 자료 등을 이용하였다.

지표면에 도달하는 태양광은 지표면 고도에 따라 크게 변화하기 때문에 태양광 자원지도 제작을 위하여 정밀한 지형자료가 요구되어 미국 NASA(National Aeronautics and Space Administration) SRTM(Shuttle Radar Topographic Mission)의 3초 자료(약 90 m의 해상도)를 사용하였다. 강원지역의 지면특성은 MODIS에서 제공하는 0.05° 월평균 자료가 사용되었으며 해상도에 따라 내삽하여 이용하였다. 해상도 $1^\circ \times 1^\circ$ 의 AQUA와 TERRA 위성의 MODIS의 에어로솔 광학두께 그리고 AURA 위성의 OMI의 오존전량 자료를 이용하여 격자점에 맞도록 내삽하였다. 기상청 지역예보 모델인 RDAPS (Regional Data Assimilation and Prediction System; $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$) 예측자료에서 가강수량 자료를 계산하여 사용하였고 이들 자료는 6시간 간격의 자료이기 때문에 시간 내삽하여 적용하였다. 구름 자료는 정기궤도 위성인 MTSAT-1R의 운량과 가시광선 영역의 반사도를 이용하여 구름 요소(Cloud Factor; 기상청, 2009)를 계산하여 적용하였다. 이 연구에 사용된 입력 자료를 표 1에 정리하였다.

표 1. GWNU 태양복사 모델의 입력 자료.

입력 자료	4 km × 4 km	1 km × 1 km	180 m × 180 m
지형		SRTM 3s(0.9 km)	
지면 알베도		MODIS(0.05°)	
에어로솔		MODIS(1°)	
오존		OMI(1°)	
기온, 기압, 가강수량		RDAPS(10 km)	
구름	MTSAT-1R Asia(≈4 km)	MTSAT-1R Korea (≈1 km)	

2.3 지형효과

지표면의 태양광은 복사이론에 근거한 태양복사 모델로 계산될 수 있으나 대부분의 경우 일차원 수평면에 대하여 계산된다. 그러나 태백산맥을 중심으로 복잡한 산악이 위치한 강원도의 경우에는 수평면에서 계산된 태양광은 오차가 발생할 수 있다. Lai et al.(2010)의 방법을 이용하여 그림 1과 같이 직달 성분과 산란 성분을 계산하였다.

그림 1. 태양복사의 지형효과.

먼저 경사면에서 직달 성분의 계산은 식 (10)과 같다.

$$B_{dir} = \frac{I_d}{\cos\beta} \frac{\cos\theta_T}{\cos\theta} \quad (10)$$

여기서 I_d 는 식 (1)에 의하여 계산되어진 직달 일사량을 의미하며 β 는 지형의 경사각 (slope angle)을 의미한다. 또한 θ_T 는 태양의 직달 성분과 지형경사의 수선 사이의 각이며 태양의 직달 일사가 관측지점에 도달할 때까지

의 차폐 유무를 확인할 수 있는 shelf-shading 계수로서 θ_T 가 90° 보다 크면 그림자에 의하여 지표면에 도달하는 직달광은 0이 되고 그 외의 경우 차폐는 일어나지 않고 직달광은 모두 지표면에 도달하게 된다.

$$\cos\theta_T = \sin\beta\sin\theta\cos(\phi_0 - \phi) + \cos\beta\cos\theta \quad (11)$$

여기서 ϕ_0 와 ϕ 는 각각 태양의 방위각(azimuth angle)과 지형경사의 방향(aspect angle)을 의미하며 경사의 방향은 북쪽이 0° 이며 시계 방향으로 증가된다. 또한 계산하려는 지점에 대하여 떨어져 있는 지형은 태양의 고도각이 낮을 때 먼 거리까지 그림자가 발생되며 그림자영역을 만들게 된다(shading angle). 따라서 각각의 태양 방위각에 대하여 가까운 거리부터 먼거리까지 모든 지형고도를 조사하여 미리 계산하여 이용하게 된다.

$$H_i(\phi) = \tan^{-1}\left(\frac{x_i - x_o}{z_i - z_o}\right) \quad (12)$$

여기서 x_0 와 z_0 는 관측위치의 거리와 지형고도를 의미하고 x_i 와 z_i 는 태양의 방위각 ϕ 방향의 임의의 거리와 지형고도이다. 태양의 천정각이 $90^\circ - H_i(\phi)$ 보다 크면 관측지점에서 떨어져 있는 지형의 차폐를 의미한다. 따라서 태양 직달광은 $\theta > 90^\circ - H(\phi)$ 또는 $\theta_T > 90^\circ$ 일 때 지형에 의하여 차폐가 되어 $B_{dir} = 0$ 이 되며 지형에 의한 차폐가 없을 때에는 식 (10)에 의하여 계산된다. 산란성분의 지형효과는 식 (13)와 같다.

$$F_s = V \frac{I_s}{\cos\beta} \quad (13)$$

여기서 I_s 는 식 (9)에서 계산된 산란 일사량을 의미하고 V 는 하늘시계 요소(sky-view factor)를 의미하며 식 (14)와 같다.

$$V = \frac{1}{2\pi} \left[\int_{\phi - \phi_n = \pi/2}^{3\pi/2} \sin^2 \gamma_1 d(\phi_0 - \phi) + \int_{\phi - \phi_n = -\pi/2}^{\pi/2} \sin^2 \gamma_2 d(\phi_0 - \phi) \right] \quad (14)$$

하늘시계 요소는 관측지점의 전 방향에 대하여 지형에 의한 하늘 차폐 정도를 의미하며 차폐가 일어나지 않을 때의 값은 1이고 차폐가 일어나게 되면 차폐 영역에 따라 1보다 작은 값을 가진다. 또한 여기서 γ_1 과 γ_2 는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \text{Min}[H + \delta, \frac{\pi}{2}] \\ \gamma_2 &= \text{Max}[H + \delta, 0] \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 H 는 shading angle로서 식 (12)에서 계산되어진 값을 의미하며 δ 는 태양 방위 각에 대한 경사를 의미한다.

2.4 태양광 발전 통계자료

한국전력 및 에너지공단은 전력생산과 관련하여 매년 발전설비 및 발전량 등을 조사하여 통계연보를 공개하고 있다(에너지공단, 2008, 2009; 한국전력공사, 2008, 2009). 이 연구에서는 강원지역 및 전국에 대한 태양광 발전설비 및 발전량 자료를 이용하여 강원지역에 대한 효율성 및 태양광 발전에 대한 발전가능지역을 산출에 적용하였다.

3. 결 과

3.1 강원지역의 태양광 발전지도

태양광 에너지는 GWNU 태양복사 모델을 이용하여 강원지역을 중심으로 수평면과 지형을 고려한 경우에 대하여 계산하였다. 지형을 고려하였을 때 가장 중요한 지형자료는 SRTM 3초(90 m 해상도) 자료를 이용하여 4 km 와 1 km 및 180 m 자료로 내삽하여 계산하였다. 계산을 위한 지형고도, 경사와 향 및 하늘시계요소는 그림 2~4와 같다. 해상도에

따라 뚜렷한 고도 차이를 볼 수 있으며 해상도가 높아짐에 따라 지형의 경사와 방향이 뚜렷하게 나타난다. 지형에 의한 주변 차폐를 나타내는 하늘시계요소가 복잡하게 나타나 주변 지형에 의한 지면도달 일사량의 특성을 뚜렷하게 구분 지을 수 있다. 그러나 해상도가 높기 때문에 그에 따른 그림의 크기도 확대되어야만 관심지점의 태양광 특성을 확인 할 수 있을 것으로 분석된다.

그림 2. 강원지역의 4 km 해상도의 지형. (a)는 지형고도 (m), (b)는 지형의 경사도 (°), (c)는 경사의 향 (°), 그리고 (d)는 천공율.

그림 4. 강원지역의 180 m 해상도의 지형. 순서는 그림 2와 같음.

수평면 도달 태양광과 지형효과를 고려한 태양광을 복사 모델을 이용하여 계산하였으며 이들의 차이를 그림 5에 나타내었다. 계산 해상도가 높을수록 정밀한 값을 표현할 수 있으며 해상도가 높을수록 그 차이가 큰 것을 그림에서 확인할 수 있으며 복잡한 지형이 많은 강원지역에서 남향인 경사지에서 뚜렷한 차이를 볼 수 있다. 태양광 계산에서 중요한 직달 일사량에서 뚜렷한 차이를 볼 수 있으나 산란 일사에서는 그 차이가 뚜렷하게 나타나지 않는다. 이는 태양에서 직접 받는 에너지가 아니고 반사 또는 산란되어 도달되는 양이며 그 양이 직달 일사와 비교하여 15%이하이기 때문으로 분석된다.

그림 5. 강원지역의 일사량(단위: MJ)과 일사량 차이(단위: MJ 또는 %). (a), (b)와 (c)는 4 km 해상도, (d), (e)와 (f)는 1 km 해상도, 그리고 (g), (h)와 (i)는 180 m 해상도.

또한 지형에 의한 태양에너지는 남향일 때 특히 많은 양이 지면에 도달될 수 있고 북향

일 때는 지형에 의하여 self-shading 되어 줄어들게 된다. 그림 2~4에서 해상도별로 남향에 해당되는 지형의 방향은 90°에서 270°이다. 해상도가 낮은 4 km에서는 지역의 구분이 뚜렷하나 해상도가 높은 180 m 해상도의 그림에서는 그 면적이 복잡하게 나타나 구분하기가 힘든 것을 볼 수 있다. 그러나 180 m 해상도의 각 화소의 면적은 그리 적지 않으며 지형자료의 위치에 대한 정확성에 따라 실제와 다소 차이가 있을 수 있다. 따라서 고해상도의 지도는 참조자료로 활용될 수 있으나 태양광 설비를 위해서는 현장 답사가 수행되어야 할 것으로 분석된다.

3.2 태양광 발전효율

최근 남한지역의 신재생에너지 발전은 급격한 증가를 보이고 있으며 특히 태양광 발전의 경우 1998년을 시작으로 2008년에는 풍력 다음으로 높은 발전 효율을 보이고 있다. 에너지공단과 한국전력공사에서 발표된 2008년과 2009년 태양광 설비 및 전력 생산량 통계자료를 이용하여 지역별로 발전량과 설비량 및 효율을 표 2에 정리하였다.

2008년의 경우 강원지역의 태양광 발전설비의 효율이 13.67%로 도별로 최고효율을 보였으나 2009년에는 13.09%로 다소 효율이 떨어졌으며 남부지방의 대부분의 도와 비교하여 효율이 떨어진 것을 볼 수 있다. 표 2에 정리된 결과에서 2008년과 2009년의 태양광 발전의 설비는 거의 변화가 없는 것을 알 수 있다. 그러나 남부지역 대부분의 발전효율이 10%이하에서 15%에 가깝게 증가된 것을 볼 수 있으나 강원지역의 발전소 효율은 비슷한 상태를 유지하고 있다. 이는 강원지역의 발전소를 제외한 나머지 지역의 발전소의 발전설비와 운영설비의 최신화가 이루어진 것으로 분석되어진다. 최근 태양발전에 관한 법률이 제정되면서 산지와 임지 등 용도가 있는 토지에 대한 발전소 건립에 대하여 제약을 두고

표 2. 2008년과 2009년의 지역별 태양광 발전설비의 발전량(MW) 및 설비효율(%).

		부산	인천	경기	강원	충남	전북	전남	경북	경남	제주	전체결과
2008	발전량 (MWh)	167.4	1289.9	0.0	1200.9	11417.9	11544.8	36059.9	10814.0	6675.7	46.3	79216.7
	발전량 (MW)	0.0191	0.1468	0.00	0.1367	1.2998	1.3143	4.1052	1.2311	0.7600	0.0053	9.0183
	설비총량 (MW)	0.39	1.00	0.00	1.00	17.48	21.02	48.21	33.35	10.14	0.05	132.63
	효율 (%)	4.86	14.68	0.00	13.67	7.44	6.25	8.52	3.69	7.50	10.54	6.80
2009	발전량 (MWh)	390.7	1224.0	71.6	1213.5	23569.8	31697.0	67835.2	39388.8	13579.4	58.8	179028.8
	발전량 (MW)	0.0445	0.1393	0.0081	0.1381	2.6833	3.6085	7.7226	4.4842	1.5459	0.0067	20.3812
	설비총량 (MW)	0.39	1.00	0.10	1.06	17.52	21.02	48.45	34.14	10.14	0.05	133.86
	효율 (%)	11.35	13.93	8.58	13.09	15.31	17.17	15.94	13.13	15.25	13.38	15.23

있어 산악지역(임야와 공원)이 많은 강원지역은 발전에 제한되어지고 있다. 비록 산지가 발전소 건설에 어려움은 있으나 산악의 경사면에 설치함으로써 설치부지의 효율적인 활용이 이루어질 수 있다.

3.3 강원지역의 태양광 발전지도

3.1절의 강원지역의 태양광 자원지도와 지형효과를 고려하여 태양광 발전량의 지도를 작성하였다. 태양에너지가 100% 전기로 전환되었을 때의 잠재 발전량과 최근 신안의 대규모 태양광 설비(24 MW)를 기준으로 하였을 때 발전설비 가능량 그리고 2009년 한국전력의 태양광 발전소의 발전효율을 기준으로 예상발전량을 계산하였다.

(1) 최대발전 잠재량

태양에너지가 지상에 도달될 때 100% 전기로 전환되었을 때의 발전량을 계산하였다. 3.1절의 결과에 대한 각 화소의 면적에 대한 발전량으로 지면에 도달되는 양을 기준으로 태양에너지를 전기에너지로 변환한 이론적인 값이다.

그림 6. 강원지역의 태양광 최대발전 잠재량 지도

4 km 지도의 최대발전 잠재량은 4300 MW이고 1 km 지도에서는 440 MW 그리고 180 m 해상도의 지도에서는 최대발전 잠재량이 11 MW이다.

(2) 발전설비 가능량

최근 신안 태양광 발전소의 경우 670,000 m²의 부지에 24 MW의 발전설비를 건설하였고 15% 효율의 태양전지 패널을 설치하였으며 그림자를 고려하여 패널사이에 일정거리를 유지하고 있다.

그림 7. 강원지역의 발전설비 가능량 지도(기준: 신안 태양광 발전단지 기준).

이 발전소를 기준으로 강원지역의 태양광 발전의 가능한 발전설비지도를 계산하였다.

3.3.1절과 같은 조건일 때 4 km 지도의 최대발전설비는 880 MW이고 1 km 지도에서는 86 MW 그리고 180 m 해상도의 지도에서는 2.2 MW이다.

(3) 예상발전 가능량

표 2의 2009년 발전효율 통계 자료에 따르면 태양광 발전소의 평균 발전효율은 15.23%이었다. 3.3.2절에서 계산된 설비를 기준으로 발전효율을 곱하면 예상되는 발전 가능량이 산출할 수 있다. 3.3.1절과 같은 조건일 때 4 km 지도의 최대 예상 발전량은 130 MW이고 1 km 지도에서는 13 MW 그리고 180 m 해상도의 지도에서는 0.33 MW이다. 이러한 발전량은 신안 태양광 발전소와 동일한 규모로 설비했을 때의 양이며 지표의 특성은 고려되지 않은 값이다. 만일 발전가능한 지역일 경우에는 강원지역의 경우 경사지형이기 때문에 발전 설비를 할 때 태양광 패널에 의한 그림자 영역의 고려 없이 설치할 수 있기 때문에 실제 지도에서 나타나는 값보다는 높을 것이다.

그림 8. 강원지역의 태양광 예상발전 가능량 지도 (기준: 신안 태양광 발전 단지과 2009년 태양광 발전 효율).

3.4 강원지역의 태양광 발전 가능지도

강원지역에서 최대의 설비로 태양광 발전을 계산해 보았으며 예상 발전지는 원주와 영월 그리고 영동 해안지역으로 나타났다. 3.3.1~3.3.3 절의 지도는 이론적으로 계산된 결과이며 실제와 다르다. 지형이나 도로 및 주택 등 다양한 인간 활동이 있기 때문에 자원지도의 모든

화소에 대하여 발전 가능한 것은 아니며 참조 자료로 활용가능하다.

3.3절의 결과는 태양광자원지도를 고려하여 작성되었으나 지형이 북향이거나 경사각이 20도 이상일 때는 태양광 발전설비의 설치가 힘들어 진다. 따라서 3.3의 결과를 이용하여 지형의 경사와 향을 고려하여 효율적인 태양광 발전 가능지도를 작성할 수 있다. 발전 가능지도는 0~100%로 표현되며 100%에 가까울수록 발전량이 높고 발전설비의 설치가 쉬운 곳이다. 최대 해상도가 180 m이기 때문에 이 자료는 참조자료로 활용될 수 있고 직접적인 적용은 설치가능 위치에 대한 답사나 세밀한 조사가 수반되어야 한다.

그림 9. 강원지역의 태양광 발전 가능성 지도.

4. 결 론

이 연구에서는 강릉원주대학교에서 개발한 GWNU 태양복사 모델을 이용하여 지표면에 도달하는 태양광 에너지를 계산하였다. 태양복사 모델은 Iqbal의 태양복사 이론에 기초하였으며 NREL의 방법을 일부 수정 적용하여 개발되었다. 해상도에 따른 계산을 위해서는 그에 해당되는 입력 자료가 요구되며 지역규모의 모델 예측자료, 위성자료 및 지상 관측 자료를 수집하여 입력 자료를 구축하여 GWNU 태양복사 모델을 수행하였다. 또한 해상도에 따른 지형자료를 구축하여 지형효과가 적용된 태양광 에너지를 계산하였다. 수평면뿐만 아니라 복잡한 지형에 대하여 계산 가능하기 때문에 더욱 현실적인 값을 산출하게 된다. 4 km와 1 km 및 180 m

해상도의 강원지역을 중심으로 수평면 및 지형효과에 따른 태양광 자원지도를 계산하였으며 그들의 차이를 보였다. 특히 지형효과가 고려된 태양광 자원지도를 분석하였을 때 지형의 경사가 남향일 때 수평면일 때보다 태양광 발전에 유리함을 확인할 수 있었다.

그리고 실제 한반도의 태양광 발전에 관련된 통계자료를 수집하여 강원지역의 태양광 발전에 대한 특성을 살펴보았으며 발전설비 및 발전량을 이용하여 발전소의 효율을 분석하였다. 2008년과 2009년 발전설비 및 발전량은 다른 지역과 비교하여 적었으나 2008년 발전효율은 최고 수준이었고 투자나 설비 개선이 이루어지지 않은 2009년에는 하위권으로 발전 효율이 떨어졌다. 강원지역은 태양복사 모델의 입력 자료들을 통하여 일조시간이 비교적 길고 가강수량이 적으며 해염입자 등의 침착성 에어로솔이 적다. 상대적으로 고도가 높은 지형이기 때문에 태양광 발전시 태양전지의 효율이 저온에서 높기 때문에 효율적인 태양광 발전을 이룰 수 있는 기상학적이점을 가지고 있다. 또한 경사지가 많은 강원지역의 경우 동일한 수평면적에 대하여 경사지의 경우 태양광 설비시 공간 활용이 높은 유리한 지형적 특성을 가지고 있다. 이러한 기상학적 그리고 지형적 특성을 고려할 때 강원내륙인 영월, 원주지역이 상대적으로 태양광 발전 가능성 높은 것으로 분석되었다.

태양광 자원지도를 기준으로 태양광 발전 통계 자료 및 실제 발전설비와 발전효율을 이용하여 4 km와 1 km 및 180 m 해상도의 강원지역 태양광 발전량 지도를 작성하였으며 지형효과 및 지형 특성을 고려하여 발전설비 가능지도를 작성하여 태양광 발전의 기초자료로 활용할 수 있도록 하였다. 고해상도 자료에서는 복잡한 지형으로 그 특성을 뚜렷이 볼 수 없으나 4 km와 1 km 해상도 지도에서는 태양광 자원지도와 마찬가지로 원주 및 영월지역에서 발전소 건설 및 에너지

생산의 효율이 높은 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 2010년 강원발전연구원의 연구비 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. 기상청, 2009: 통신해양기상위성 기상자료 처리시스템 개발 최종보고서, p846.
2. 신재생에너지센터, 2008: 2008년 신재생에너지 가이드북.
3. 에너지관리공단, 2009: 2009년 신재생에너지 보급통계.
4. 에너지관리공단, 2008: 2008년 신재생에너지 보급통계.
5. 이규태, 1997: 강릉 지방에서 지표면의 자외선 변화. 한국기상학회, 10, 151-154
6. 이규태, 지준범, 2000: UV-B와 적외 복사영역에서 구름에 의한 산란효과. 한국기상학회, 4, pp. 39~42.
7. 조일성, 지준범, 이원학, 이규태, 최영진, 2010: 복사 모델에 의한 남한의 지표면 태양광 분포. 한국기후변화학회지, 1(2), pp. 147~161
8. 한국전력공사, 2009: 2009년도 한국전력통계.
9. 한국전력공사, 2008: 2008년도 한국전력통계.
10. Aguilar, C., J. Herrero, and M. J. Polo, 2010: Topographic effects on solar radiation distribution in mountainous watersheds and their influence on reference evapotranspiration estimates at watershed scale, Hydrol. Earth Syst. Sci., 7, pp. 2373~2411.
11. Bird, R. E., 1984: A Simple Spectral Model for Direct Normal and Diffuse Horizontal Irradiance. Solar Energy, 1, 13-21.
12. Chou, M. D. and M. J. Suarez, 1999: A Solar Radiation Parameterization for

- Atmospheric Studies. NASA/TM-1999-104606, 15.
13. Dozier, J. and J. Frew, 1990: Rapid calculation of terrain parameters for radiation modeling from digital elevation data, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 28(5), pp. 963~969.
 14. Iqbal, M, 1983, An introduction to solar radiation. Academic Press, New York, USA, pp. 391.
 15. Kasten, F., 1966: A new table and approximate formula for relative optical air mass. Arch. Meteorol. Geophys. bioklimatol., Ser. B 14, pp. 206~223.
 16. Klingseisen, B., G. Mettemicht, and G. Paulus, 2007: Geomorphometric landscape analysis using a semi-automated GIS -approach, Environmental Modelling & Software, xx, pp. 1~13.
 17. Lai, Y. J., M. D. Chou and P. H. Lin, 2010: Parameterization of topographic effect on surface solar radiation. J. Geophys. Res. 115, D01104, doi:10.1029/2009JD012305.
 18. Perez R. and M. Perez, 2008: Making the Case for Solar Energy. Daylight & Architecture Magazine by Velux. Autumn 2008, Issue No. 9, pp. 8~17.