

TECHNICAL NOTE

해석학적 모델을 이용한 태양광 발전소 주변 지역의 기온 상승 추정 연구

김해동* · 허경춘¹⁾ · 김지혜

계명대학교 지구환경학과, ¹⁾신태양발전소(주)

Determining the Warming Effect Induced by Photovoltaic Power Plants in neighboring Region Using an Analytical Model

Hae-Dong Kim, Kyong-Chun Huh¹⁾, Ji-Hye Kim

Department of Global Environment, Keimyung University, Daegu 42601, Korea

¹⁾New Solar Power Plant(Co), 39855, Korea

Abstract

We studied the warming effect induced by Photovoltaic(PV) power plants in rural areas during summer daytime using a simple analytical urban meteorological model. This analysis was based on observed meteorological elements and the capacity of the PV power plant was 10 MWp. The major axis length of the PV power plant was assumed to be 1km. Data of the necessary meteorological elements were obtained from a special meteorological observation campaign established for a over a PV power plant. We assumed that the wind flowed along the major axis of the PV power plant(1 km). As a result, the air temperature on the downwind side of the PV power plant was estimated to increase by about 0.47 °C.

Key words : Photo-Volatic power, Warming effect, Analytic urban meteorological model

1. 서론

2015 파리 신 기후체제의 출발로 지구온난화로 인한 기후변화 문제에 대응하기 위한 온실가스 감축은 195개 기후변화협약 당사국 모두의 의무 사항이 되었다. 파리 신 기후체제는 금세기 말까지 지구 평균온도 상승을 2°C 이내로 억제하는 것을 목표로 하고 있다. 이에 호응하기 위하여 국내외 대형 기업체들도 중장기적으로 생산 활동에 재생에너지 사용 목표치를 제

시하면서 원전과 화력발전을 벗어나 재생에너지 중심의 에너지전환에 동참하고 있는 상황이다(Choi, 2017). 지구온난화로 인한 기후변화는 급격한 인구와 산업 활동 증가, 그에 따른 석유, 석탄 계열의 화석연료 소비 증가 등에 기인한다. 각국 정부는 현재 진행되는 지구온난화를 완화시키고 에너지 생산에 따른 이산화탄소 발생량을 감축하기 위하여 화석연료가 아닌 청정 재생에너지 개발에 집중하고 있다. 우리나라 정부도 에너지전환 비전 3020(2030년까지 재생에너지

Received 26 September, 2017; Revised 24 October, 2017;
Accepted 1 November, 2017

*Corresponding author: Hae-Dong Kim, Department of Global Environment, Keimyung University, Daegu 42601, Korea
Phone : +82-53-580-5930
E-mail : khd@kmu.ac.kr

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

발전 비중 20% 달성)을 제시하면서 재생에너지 비중을 대폭 확대해 가는 국가목표를 제시하고 있다. 2015년 기준으로 우리나라의 신재생에너지 비중은 대규모 수력발전과 소각에너지를 합쳐서 약 6.8%, 그리고 태양광과 풍력만으로는 0.7% 정도로 이스라엘과 함께 전 세계에서 가장 낮은 수준에 머물러 있다(Lee, 2017). 또한 우리나라 정부는 파리 신 기후체제가 시작되는 2020년부터 2030년에 걸쳐서 이산화탄소 배출량을 BAU (Business As Usual) 대비 약 37% 감축을 약속하였으며, 이 중에서 약 25%는 국내에서 달성하기로 함(INDC, Intended Nationally Determined Contribution)에 따라 청정 재생 에너지인 태양광과 풍력의 발전 공급이 빠르게 증가할 것으로 예상된다(Choi, 2017).

전 세계적으로 태양광 에너지를 비롯한 신재생에너지의 개발이 온실기체를 줄여 기후변화에 대처할 수 있는 유력한 방안으로 받아들여져서 관련 기술개발 분야에 예산이 집중되고 있다(Courtland, 2008). 특히 태양광에너지는 풍력에너지와 더불어 기술적인 성숙도가 다른 신재생에너지에 비하여 높으며, 전자, 전기기술의 발달로 인하여 태양광에너지 획득 기술의 발달 정도가 매우 빠르게 진척되고 있다. 태양광 에너지는 신재생에너지 중 기술적 성숙도가 높고 개발 경제성이 급격히 증가하고 있기 때문에 화석연료를 대체할 수 있는 미래의 가장 확실한 에너지원으로 인정받고 있는 상황이다. 전 세계적으로 태양광에너지 자원은 23,000 TW/year로 매우 풍부하고 우리나라의 태양광발전 잠재량도 170GW/year에 이르는 것으로 파악되고 있다(Choi, 2017). 우리나라의 경우, 중위도 기압대에서 날씨변동이 심하여 태양광발전엔 큰 변동요인으로 작용하는 불리한 점도 있지만 전라남도과 경상북도 지역의 태양광 발전 가능성 및 경제성이 매우 우수한 것으로 평가된다(Lee et al., 2014).

우리나라는 태양광발전 확대 필요성이 높고 발전 잠재량도 풍부하지만 태양광발전소로 인한 환경영향에 대한 우려로 지역에서는 부지확대에 어려움을 겪고 있는 실정이다. 태양광발전소 건설로 인해 주변에 기온이 상승하고 태양광 panel에서 반사 태양광이 증가하여 주변의 농경지에 피해를 가할 수 있다는 민원에 따른 부지건설 규제가 태양광발전소 확대에 중대

한 장애요인이 되고 있다.

이러한 배경에서 이 연구에서는 단순 해석학적 도시대기모델을 이용하여 태양광발전소로 인한 주변의 기온상승 효과를 평가해보고자 한다. 향후 현장관측을 통하여 이 연구 결과를 검증해 보는 것이 남겨진 과제이다. 아울러 도시 건축물 옥상을 이용한 태양광발전소 건설이 도시의 미기후환경에 미치는 효과도 관측과 이론적 분석을 동원하여 파악해 보고자 한다. 이 연구의 결과는 태양광발전 부지 허가기준을 설정함에 있어서 기초자료로 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

2. 연구재료와 방법

2011년 4월부터 2013년 10월에 걸쳐서 경상북도 칠곡군 동명면에 위치한 ㈜신태양발전소에 자동기상관측장치를 설치하여 바람, 기온, 습도, 일사량(지표면과 태양광 panel 각도), 지온 및 panel의 표면온도를 1분 간격으로 관측하였다. ㈜신태양발전소는 우리나라에서 신재생에너지발전 지원을 위하여 2002년에 FIT(발전차액지원제도)가 도입된 이듬해인 2003년에 설립된 국내 민간태양광발전소 1호로 알려져 있는 곳이다. 주변에 특별한 시설이 없는 광활한 공간이어서 현장 기상관측에 유리한 조건을 갖추고 있다. 풍속은 지상 4 m, 온도, 습도 및 일사량은 지상 2 m 고도에서 관측되었다. 관측 센서는 Vaisalla사 제작의 제품이 사용되었으며, 기상관측장치를 집적시키는 데이터로거는 CR1000 이다(Fig. 1).

현장 관측 자료를 바탕으로 Kimura and Kuwagata (1993)의 도시기상 단순모델을 채용하여 기류가 태양광 panel 위를 지나면서 하층으로부터 현열을 받아 가열될 경우에 예상되는 기온 상승량을 해석학 기법으로 추정해보았다. 이 방법을 간략히 소개하면 다음과 같다. Fig. 2는 이 연구에서 도입한 기류에 가정한 혼합 층의 모식도이다. 도시의 풍상(upwind)과 풍하(downwind) 측의 온위 연직분포 발달 과정을 나타낸 모식도이다. 이 모델에서 도시는 주위와 같은 평탄한 면이면서 주변 교외의 평원보다 현열 수송량이 큰 것으로 가정하였다. 도시의 풍상 측에서는 일출 전에 점선으로 표시된 온위 분포가 오후에는 실선과 같이



Fig. 1. Photograph of field weather observation system established at New Solar Power Plant Cooperation.

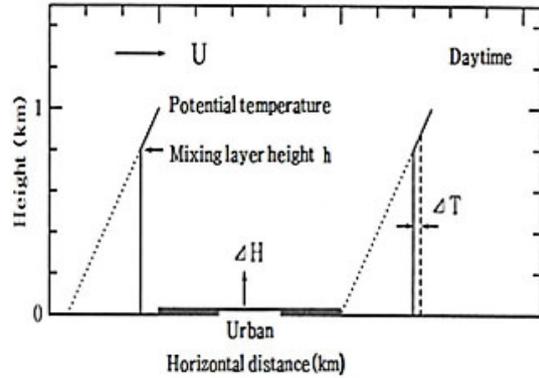


Fig. 2. Schematic map of the warming process during daytime.

가열된다. 도시의 풍하 측에 있는 공기 기둥은 도시를 통과해 가는 도중에 보다 많은 현열을 받게 되어 온위 분포가 파선과 같이 발달하게 되고 혼합층 내의 기온은 ΔT 만큼 상승한다.

위에서 소개한 단순 도시기상 모델을 다음과 같은 방식으로 적용하였다. 태양광발전소가 설치되어 있지 않은 평탄지형의 토양 위에서는 일출 이전에 점선으로 분포하였던 온위분포가 오후에 지표면으로부터 현열을 받아 실선으로 발달한다. 태양광 발전소가 설치되어 공기가 길게 설치된 태양광 panel을 지나게 되는 공기 기둥은 태양광발전소를 통과하면서 토양 위의 공기보다 지표로부터 더 많은 양의 현열을 받아서 풍하에서 온위분포가 파선과 같이 발달하고 혼합층 내의 온위가 토양 위를 지나는 공기보다 ΔT 만큼 더 상승한다.

기류가 태양광 panel 위를 지나면서 받게 되는 현열 수송량(H , W/m^2)이 태양광 panel이 없는 토양 위를 지나면서 받는 것보다도 ΔH 만큼 더 많다고 가정하고, 기류의 풍향을 따라서 태양광 panel이 늘어선 길이를 L_u , 풍속을 U 라고 하면, 기류의 기주가 태양광 panel 위를 통과하면서 지표면을 지나면서 받는 현열 양보다도 추가로 더 얻게 되는 총 열량은 다음과 같다.

$$\Delta Q = \Delta H \cdot L_u / U \quad (1)$$

한편, 기류의 혼합 고도 h 와 같은 높이에서 ΔT 만큼 기온 상승이 발생하기 위해서 필요한 열량은 다음과 같다.

$$\Delta Q = C_p \rho \Delta T \cdot h \quad (2)$$

(1)과 (2)는 같아야하므로 기류가 태양광 panel 위를 지나간 후에 풍하에서 다음과 같은 양의 기온 상승이 나타나게 된다.

$$\Delta T = \Delta H \frac{L_u}{C_p \rho \cdot h U} \quad (3)$$

여기서 H 는 현열(W/m^2), C_p 는 정압비열($1004 J/kg$), ρ 는 지상공기의 밀도($1.275 kg/m^3$), θ , θ_0 는 각각 $z=0$ (태양광 panel 표면)의 온위와 $t=0$ (태양광 panel을 지나기 직전의 공기의 온위)이다. 식(1)은 Fig. 1에서 θ_0 와 $\theta(z)$ 로 둘러싸인 삼각형의 면적이 적산 현열 플럭스

3. 결과

(주)신태양발전소 현장에 자동기상관측장치를 2011년 4월에 설치하여 2013년 10월까지 연속 관측을 수행하였다. 이들 자료 중에서 2011년 5월 21일부터 10월

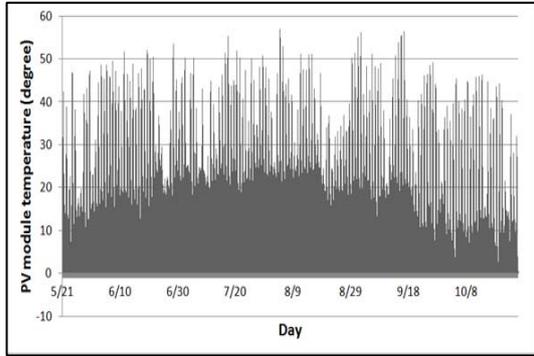


Fig. 3. Time variation of photovoltaic module Temperature from 21 May to 25 October 2011.

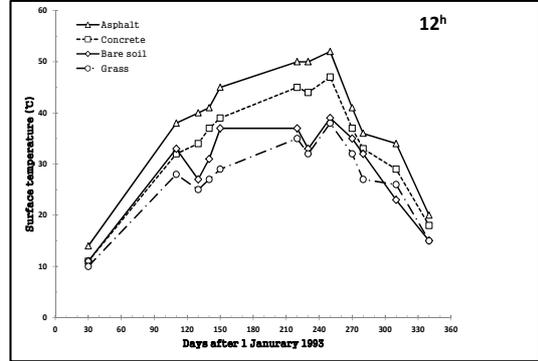


Fig. 4. Time series of several surface temperatures observed at Sendai Japan(Sugimoto and Kondo, 1994).

25일까지 관측한 태양광 모듈 panel의 표면온도 시계열을 Fig. 3에 나타내었다. panel 표면 온도의 최고 온도는 8월 4일 13시에 관측된 59.6°C이다. 여름철 야간의 panel 표면온도는 20°C 내외였고 낮의 최고 온도는 50°C 내외로 나타났다. 또 같은 기간 동안에 관측한 지상 풍속의 평균값은 1.3 m/s로 나타났다.

한편 Sugimoto and Kondo(1994)가 일본의 센다이시(서울과 비슷한 위도 대(37N)에 위치)에서 1년간 다양한 지표온도를 관측한 자료(Fig. 3)에 의하면, 낮 12시의 지표온도는 계절에 관계없이 온도가 높은 순서는 아스팔트, 콘크리트, 나대지, 잔디였다. 관측 기간 중에 변동 폭이 가장 큰 지표는 나대지였는데, 토양의 함수율 변화에 의존성이 가장 큰 것이 나대지이기 때문이라고 한다. 온도가 가장 높은 아스팔트 면과 나대지 면의 온도차는 10~20°C에 이르는 것을 확인할 수 있다. 이 연구에서는 태양광발전소가 설치되지 않은 토양 표면의 온도를 한낮에 약 40°C 정도라고 가정하였는데, 그 근거를 이 관측 자료에서 찾았다.

Fig. 2와 3의 결과로부터 태양광 모듈 panel 표면온도와 지표면간의 최대 온도 차이는 대략 20°C로 간주할 수 있다. 또 250 Wp 생산 용량의 태양광 모듈 panel의 가로 × 세로의 크기는 1000 mm × 1480 mm이다. 이 태양광 모듈 panel을 교외(농경지 또는 삼림지역)에 장축으로 1000장(1 km), 단축으로 40장(60 m)장이 놓인 직사각형으로 설비용량 10 MWp급의 대형 태양광발전소를 건설한다고 가정하였을 시에 기류가

장축을 따라서 불어 갔을 때에 태양광 모듈 panel로부터 추가적으로 현열을 받아서(비교 대상은 나대지) 풍하에서 나타나게 될 기온 상승량을 Kimura and Kuwagata(1993)의 도시기상 단순모델을 도입하여 계산해 보면 다음과 같다.

식(3)에서 필요로 하는 변수는 다음과 같은 가정으로 설정하였다. 장축으로 1개당 1000 mm 길이 모듈이 1000매 설치되고 단축으로 1,480 mm 모듈이 40매 설치되는 경우를 가정하였다. 그러면 약한 바람(1m/s)이 장축을 따라서 불 경우에 L_u 는 1000 m, $U=1$ m/s, h (접지 혼합층) ≈ 50 m, $C_p \rho$ (1004×1.275) ≈ 1280 ($J \cdot m^{-3} \cdot K$)이다. 기류가 천연의 토양 대신에 태양광 모듈 위로 지남으로서 추가적으로 열게 되는 현열량인 ΔH 는 bulk 식을 이용하여 천연 토양과 태양광 모듈 표면 온도 차로 20°C, 풍속 1 m/s, bulk 수송계수 초로 0.0012를 가정하여 추정해 보면 대략 30 W/m²이다. 이들 값을 식 (3)에 대입하여 계산하면,

$$\Delta T = 30 \frac{1000}{1280 \cdot 50 \cdot 1} \approx 0.47^\circ\text{C} \text{가 된다.}$$

설비용량 10 MWp의 대용량 태양광발전소를 가정하였을 시에 예상된 추가적 기온 상승량 0.47°C는 Kimura and Kuwagata(1993)가 도시 규모로 10 km를 가정하고 여름철 낮에 1 m/s의 바람이 도시를 지나갈 때에 나타날 것으로 추정한 추가적 기온 상승량($\approx 0.75^\circ\text{C}$)의 약 62%에 이르는 값이다.

4. 결론

Kimura and Kwagata(1993)의 단순 도시기상모델을 이용하여 천연의 토양이 펼쳐진 공간에 설비 용량 10 MWp의 대형 태양광발전소가 설치되었다고 가정하였을 시에 주변에 미칠 기온상승효과를 추정해본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 단순 도시기상모델에 이용할 태양광 모듈 표면온도와 풍속은 자동기상관측장치를 경상북도 칠곡군에 위치한 태양광발전소 현장에 설치하여 2011년 5월부터 10월 25일까지 관측한 자료로부터 여름철 낮에 태양광 모듈 표면온도는 약 60℃, 풍속은 1 m/s 정도로 상정하였다. 태양광 모듈이 설치되지 않은 천연의 토양 표층 온도는 서울과 비슷한 위도 대에 위치한 일본의 Sendai에서 1년간 관측한 다양한 지표 표면온도로부터 여름철 한낮의 토양표층온도를 약 40℃로 설정하였다.

둘째, 기류가 지나가는 태양광 모듈의 길이는 1000m로 하였다. 태양광 모듈에서 대기로 전달된 현열로 가열되는 대기층의 두께는 하층의 불안정 성층 범위(50 m)에 한정되는 것으로 설정하였다. 이렇게 상정한 근거는 Kimura and Kwagata(1993)의 혼합층 고도 시간변화 분석에서, 여름철 한낮에 하층의 온위분포는 지상에서 50 m 정도에 걸쳐서 불안정성층을 형성하고 있다는 지적에 있다.

셋째, 태양광발전소 설치로 인한 풍하 측 방향에서의 기온 상승효과를 위의 기초자료를 바탕으로 추정해 본 결과는 약 0.47℃로 나타났다.

농경지나 과수원이 위치하는 곳에 설비 용량 10 MWp 규모의 대형 태양광발전소가 들어서는 경우는 드물다. 그럼에도 불구하고 태양광발전소로 인해 나타날 수 있는 기온의 추가적 상승은 0.5℃에도 미치지 않는 것으로 평가되었다.

향후 대형 태양광발전소 부지의 풍상과 풍하에 자동기상관측장치를 설치하여 기류가 태양광발전소의 panel 위를 지나갈 때에 나타나는 추가적 기온 상승효과를 실측을 통하여 확인해볼 계획이다. 최근 태양광발전소 건설로 인해서 추가적 기온상승과 panel로부터의 반사광이 농업에 지장을 줄 수 있다는 막연한 의심에 근거한 민원이 제기되고 있다. 그래서 정부의 재생에너지 확대정책이 지역차원에서는 오히려 규제강화로 나타나서 부지 확보에 제동이 걸리고 있다. 이러한 배경에서 이 연구결과는 태양광발전소 건설로 인한 추가적인 기온상승의 우려에 대응할 수 있는 과학적 근거로 널리 이용될 수 있을 것으로 기대한다.

REFERENCE

- Courtland, R., 2008, How the world invests in R&D. *Nature*, 451(7176), 378.
- Choi, H. K., 2017, Political meaning and direction of completion from nuclear plants, 25th ceremony presentation materials of Daegu social institute.
- Kimura, F., Kuwagata, T., 1993, Thermally induced wind passing from plain to basin over a mountain range, *J. Appl. Meteor.*, 32, 1538-1547.
- Lee, S. C., 2017, Renewable energy policy in Korea and Japan, Presentation materials of seminar on improving the energy-water-material nexus toward sustainable future in east Asia, 9-41.
- Lee, S. H., Kim, H. D., Cho, C. B., 2014, Study on the variation characteristics of the photo-volatic power generation due to regional meteorological elements, *J. of Environ. Sci. Int.*, 23, 1943-1951.
- Sugimoto, S., Kondo, J., 1994, An Observational study of heat island and diurnal variations of surface temperature of various grounds, *Tenki*, 41, 541-544.