

신재생에너지 국가참조표준 시스템 구축 및 개발 - 모델 기반 표준기상년

김보영¹⁾ · 김창기²⁾ · 윤창열²⁾ · 김현구³⁾ · 강용혁^{4)*}

System Construction and Data Development of National Standard Reference for Renewable Energy - Model-Based Standard Meteorological Year

Boyoung Kim¹⁾ · Chang Ki Kim²⁾ · Chang-yeol Yun²⁾ · Hyun-goo Kim³⁾ · Yong-heack Kang^{4)*}

Received 23 February 2024 Revised 12 March 2024 Accepted 12 March 2024 Published online 14 March 2024

ABSTRACT Since 1990, the Renewable Big Data Research Lab at the Korea Institute of Energy Technology has been observing solar radiation at 16 sites across South Korea. Serving as the National Reference Standard Data Center for Renewable Energy since 2012, it produces essential data for the sector. By 2020, it standardized meteorological year data from 22 sites. Despite user demand for data from approximately 260 sites, equivalent to South Korea's municipalities, this need exceeds the capability of measurement-based data. In response, our team developed a method to derive solar radiation data from satellite images, covering South Korea in 400,000 grids of 500 m × 500 m each. Utilizing satellite-derived data and ERA5-Land reanalysis data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), we produced standard meteorological year data for 1,000 sites. Our research also focused on data measurement traceability and uncertainty estimation, ensuring the reliability of our model data and the traceability of existing measurement-based data.

Key words Standard reference data(국가참조표준데이터), Reanalysis data(재해석 자료), Quality control(품질평가), Renewable energy(신재생에너지), Typical meteorological year(표준기상년)

Nomenclature

TMY : typical meteorological year

GHI : global horizontal irradiance, W/m^2

DNI : direct normal irradiance, W/m^2

T : temperature, °

U : transverse wind speed, m/s

V : longitudinal wind speed, m/s

P : pressure

1) Senior researcher, Renewable Energy Big Data Laboratory, Korea Institute of Energy Research

2) Principal researcher, Renewable Energy Big Data Laboratory, Korea Institute of Energy Research

3) Director, Renewable Energy Institute, Korea Institute of Energy Research

4) Honorary Researcher, Renewable Energy Institute, Korea Institute of Energy Research

*Corresponding author: yhkang@kier.re.kr

Tel: +82-42-860-3094

Subscript

db : dry bulb

dp : dew point

sfc : surface

sea : sea level

1. 서론

한국에너지기술연구원 신재생빅데이터연구실은 1990년부터 국내의 16개 지점의 일사관측을 수행해왔다. 이러한 장기축적 데이터를 바탕으로 2010년부터 산업통상자원부로부터 신재생에너지 분야의 국가참조표준 데이터센터로 지정 되었다. 국가참조표준 데이터센터는 ISO 9001(품질경영시스템) 및 ISO 17025(시험소 또는 교정기관의 능력에 관한 요구사항)에 준하여 시스템을 구축하고 평가를 받는다. 정식으로 한국인정기구(KOLAS)의 인정을 요구하는 것은 아니지만, 최초 지정 후 매 3년마다 사후관리, 매 5년마다 갱신평가를 KOLAS 평가사자격을 지닌 심사위원들에게 받고 있다. 또한 매년 데이터 생산계획을 수립하고 생산하여, 데이터 생산 절차서와 생산된 데이터에 대해 각각 데이터센터에서 개최하는 전문위원회, 국가참조표준 센터에서 개최하는 기술위원회 총 4번의 위원회를 통해 생산된 데이터를 검증받고 있다.

2011년 일사량 1120건, 풍속 20건 등록을 시작으로 2012년까지 총 일사량 6,372건, 풍속 28건을 등록하였으나 과거 특정 시점의 태양에너지와 풍력에너지의 데이터는 실제 활용에서 큰 의미가 없다고 판단하여, 2015년 부터는 태양광 에너지 사전설계에 필요한 종합기상데이터는 표준기상년 자료와 시점에 따른 변동성이 비교적 적은 풍속고도분포 지수를 개발하여 생산해오고 있다. 데이터를 표준화하기 위해서는 단순히 데이터 생산 뿐만 아니라, 생산 데이터에 대한 측정 소급성 확보와 불확도 평가가 필수적이다. 본 센터에서 생산한 데이터의 경우 계산공학을 통한 모델 데이터도 상당부분 포함되어 있기 때문에 측정기기로부터 소급성을 확보하는 과정이 쉽지 않았다.

2020년 기준으로 22개 지점의 측정기반 표준기상년 데이터를 표준화하였다. 하지만 설문조사를 활용한 수요조사에서 실제 수요자가 원하는 데이터의 지점수는 대한민국 시군구 수인 260개 수준인 것으로 드러났으며, 이는 측정기반 데이터로는 충족할 수 없다. 본 연구진에서 2017년에 개발한 위성영상 기반 일사량 데이터는 현재 대한민국 영토를 500 m × 500 m 의 격자로 구성하여 그 개수가 40만 개에 달한다. 본 연구에서는 자체 개발한 위성영상 일사량과, 유럽의 ECMWF의 ERA5-Land 재해석자

료를 활용하여 국내 1,000개 지점의 표준기상년 자료를 생산하였다. 데이터의 표준화에서 필수인 데이터의 측정소 급성 확보와 불확도 산정에 대한 연구를 진행하였다. 그 결과 기존의 측정기반 국가참조표준 데이터에서 측정을 소급할 수 있었으며, 이를 통해 모델 데이터의 불확도를 산정 가능했다.

2. 데이터 개발

TMY 즉, 표준기상년 데이터는 장기간 축적된 기상데이터베이스를 바탕으로 기상의 장기 특성을 반영할 수 있도록 추출하여 제작된 시간 간격의 연간 기상데이터이다. 기본적으로 일사량과 건구온도, 습구온도, 풍속, 상대 습도 등 다양한 기상요소를 포함하고 있다. 이러한 데이터베이스는 장, 단기 기상의 특징을 모두 포함하기 때문에 기상현상의 예측이나 에너지 연구 및 평가의 입력 자료로 유용하게 사용된다. TMY 데이터를 제작하기 위해서는 가장 먼저 장기간 축적된 한 시간 간격의 기상데이터를 확보하는 것이 중요하다.

2.1 표준기상년 데이터

장기 데이터베이스 구축이 완료되면, 대표 기상 월(Typical Meteorological Month, TMM)을 1월부터 12월까지 선정하고 12개월 데이터를 연결하여 가상적인 TMY 데이터를 제작한다. 대표 기상 월을 선정하는 방법은 여러 가지가 있는데, 기본적으로 Sandia Method, Danish Method, Festa-Ratto Method가 있다. 본 과제에서는 Sandia Method에 기반을 둔 미국 NREL의 대표 기상연도 데이터 제작 방법을 이용하여 국내 지역에 대한 표준기상년 데이터를 제작했다.^[1]

Sandia Method는 1978년 Sandia Lab의 Hall이 고안하였으며, 원래 9가지 기상요소를 사용하였다. NREL은 법선면 직달일사량을 추가하고 10가지 기상요소를 이용해 TMY 데이터를 제작한다. 건구 온도와 습구 온도에 대해서는 일간 최대, 최소, 평균을, 풍속에 대해서는 일간 최대, 평균을, 수평면 전일사량과 법선면 직달일사량에 대해서는 일간 합을 고려한다. 대표 기상 월 선정 시 기상요소 간의 가중치, 데이터 포맷 등에 따라 TMY 데이터의 버전이 다르다. 각 기상요소별 가중치는 Table 1에 정리하였다.

Table 1. Weighting of each entity

Entity	Sandia method	NREL TMY
GHI	12/24	5/20
DNI	0	5/20
Maximum T_{db}	1/24	1/20
Minimum T_{db}	1/24	1/20
Mean T_{db}	2/24	2/20
Maximum T_{dp}	1/24	1/20
Minimum T_{dp}	1/24	1/20
Mean T_{dp}	2/24	2/20
Maximum wind speed	2/24	1/20
Minimum wind speed	2/24	1/20

2.2 위성영상 일사량

미국 애리조나대학교에서는 위성영상을 기반한 지표일사량 산출 알고리즘인 UASIBS(University of Arizona Solar Irradiance Based on Satellite) 모형을 개발하였다. UASIBS 모형은 미국 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 운용하는 GOES-W(Geostationary Operational Environmental Satellite-West)의 가시채널, 근적외채널 그리고 적외채널 영상과 Goddard Space Flight Center RTM을 이용하여 개발되었다. 이후 한국에너지기술연구원과 미국 애리조나대학교와 협력을 통해 UASIBS-KIER(Korea Institute of Energy Research) 모형으로 개선되어 천리안 위성영상을 활용할 수 있도록 하였고, 수평면 전일사량과 법선면 직달일사량을 생산하고 있다.

UASIBS-KIER 모형은 Goddard Space Flight Center RTM을 기반으로 작성된 조건표를 활용하는 방식으로 법선면 직달일사량을 산출하였다. 대기상태를 표현하는 기온, 기압 그리고 수증기량의 연직분포는 오산기상대에서 오후 9시에 실시하는 라온존데 관측값을 이용하며, 오존의 연직분포는 기후통계값을 사용하였다. 에어로졸 효과를 고려하기 위하여 연세대학교에서 매일 관측되는 에어로졸 광학깊이의 월평균 값을 조건표 작성에 활용하였다. 매일 새로운 조건표가 생산되고, 조건표는 대기 상단 반사도를 보여준다. 지표반사도, 태양천정각 그리고 구름물 광학깊이의 함수로 구성되어 있다. 대기 상단 반사도는 천리안 위성의 가시영상으로부터 얻어지고 지표반사도는 미국 USGS (United

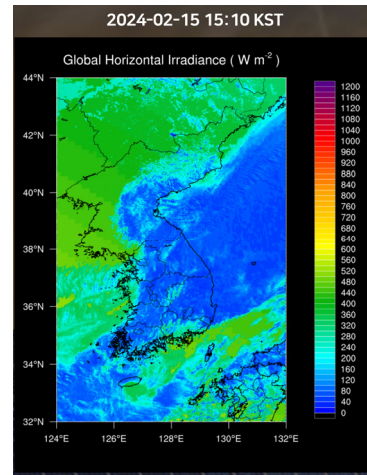


Fig. 1. Global horizontal irradiance in Korea from UASIBS-KIER

States Geological Survey)의 토지피복에 따른 지표반사도 지도로부터 확인된다. 태양천정각은 지점의 위·경도와 현재 시각을 통해 계산한 후, 구름물 광학깊이가 유추되고 주어진 조건에서 구름물 광학깊이를 통해 쉽게 대기 투과율이 산출되고 최종적으로 법선면 직달일사량이 계산된다.

모델기반 TMY를 생산하기 위한 데이터는 최소 1시간 간격의 10년치가 확보되어야 한다. 본 연구에서는 위성영상 일사량 생산을 시작한 2008년부터 2017년까지의 데이터를 사용하였다(Fig. 1 참조).

2.3 ERA-5 재해석 자료^[2]

모델 기반 TMY 데이터를 제작하기 위한 나머지 기상항목들은 유럽의 ECMWF에서 제공하는 ERA5-Land 재해석자료를 사용하였다. 재해석이란 매 6~12시간 간격으로 라디오존데(Radiosonde), 부이(Buoy), 항공기, 선박 등 다양한 경로로 획득되는 7~9백만 관측자료를 불변성 자료동화구조(Invariant Data Assimilation Structure) 및 수치기상모델에 통합적으로 반영하여 체계적이며 일관성 있는 전지구 장기간의 기상자료를 재생산하는 접근방식이다. ERA5 및 ERA5-Land는 ECMWF의 통합 예측 시스템으로 생산된 재해석 기상자료이다. 1979년부터 거의 실시간(NRT: Near Real Time, 현재로부터 2~3개월 전)까지의 데이터가 웹상에 공개되어, 파일 또는 API로 받을 수 있다.

ERA5와 ERA5-Land가 TMY와 관련하여 제공하는 기상자료 및 해상도는 Table 2에 정리하였다.

Table 2. Meteorological parameters related to TMY provided by ERA5 and ERA5-Land

Content	ERA5	ERA5-Land
Period	1979.01 ~ NRT	1981.01 ~ NRT
Spatial resolution (°)	0.25° × 0.25°	0.1° × 0.1°
Spatial resolution (in Korea)	27.75 km × 22 km	11.1 km × 8.8 km
Vertical level	137	1
Meteorological elements	T _{db} , T _{dp} , 10 m U, 10 m V, P _{sfc} , P _{sea}	T _{db} , T _{dp} , 10 m U, 10 m V, P _{sfc}
Uncertainty	Provided	Provided
etc.	Need to calculate relative humidity	Need to calculate relative humidity and P _{sea}

3. 모델기반 표준기상년 결과

모델기반 표준기상년을 최대한 많은 지점에서 만들기 위해 ERA-5의 가능한 대한민국 전 국토 지점을 선택하였다. 울릉도 제주도 등을 포함하여 정확히 1,000개의 지점을 선정하고, 이를 북쪽과 동쪽에서부터 1부터 1,000까지 넘버링하였다. 그 지점들을 지도에 나타내면 아래 Fig. 2와 같으며 각 지점정보는 Table 3과 같다. 본문에 1,000개 지점을 모두 표시할 수는 없으므로 생략한다.

국내의 1,000지점 각각의 TMY 데이터는 1년 8,760시

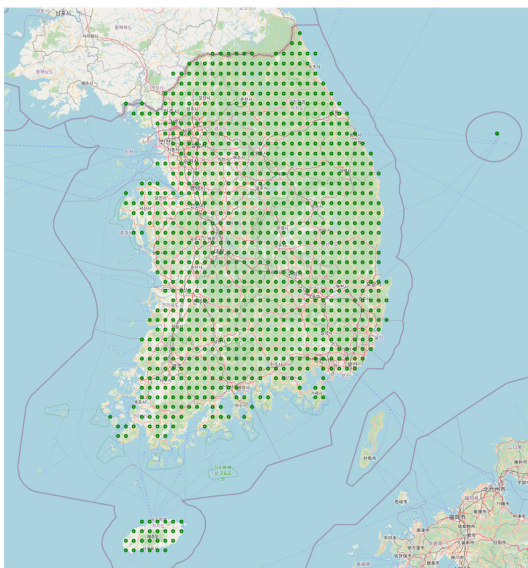


Fig. 2. All sites for TMY in KOREA

Table 3. Site list of model-based TMY

Site	Latitude	Longitude	Site	Latitude	Longitude
1	38.3	128.6	8	34.5	126.3
2	38.1	127.3	9	36.7	126.7
3	37.9	126.8	10	33.4	126.9
4	37.5	130.9	11	33.2	126.6
5	34.8	128.4	12	37.7	126.4
6	35.3	126.6	13	38.1	128.2
7	35	127.4	∴	∴	∴

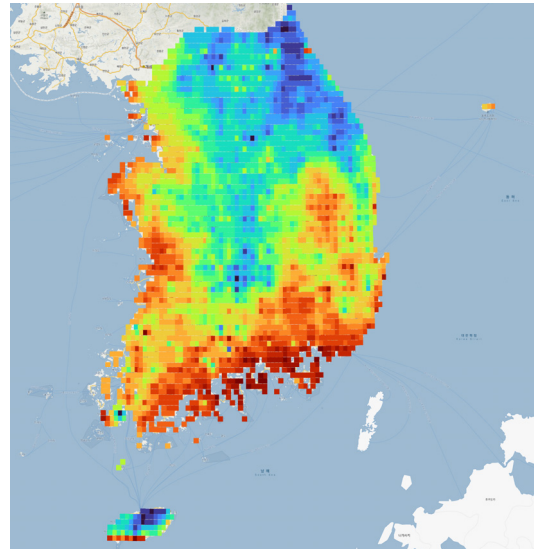


Fig. 3. Day accumulated GHI from TMY

간이므로 8,760개의 데이터로 구성되어 있다. 위에서 생산한 데이터 중 일누적 일사량을 지도에 나타내면 Fig. 3과 같다.

GHI의 경우 일반적으로 북반구에서는 위도가 낮을수록 높다. 위 결과에서 강원도 지역은 일사량이 낮고 남해안과 서해안은 높은 것으로 나타났다. 또한 전라도 지방보다는 경상도 지방이 다소 높은 것으로 나타났다. 울릉도의 경우 일사량이 좋지만 제주도의 경우는 좋지 않은 것으로 나타났다.

4. 데이터의 불확도 평가

모델기반 TMY자료에 활용하는 일사량은 한국에너지기술연구원 신재생에너지 데이터 센터가 개발한 UASIBS-

KIER 모델^[3,4]을 사용한다. UASIBS-KIER 모델은 수많은 입력자료를 사용하며, 구름층을 59개로 구분하여 다른 식을 적용하는 등 굉장히 복잡한 모델식을 사용한다. 따라서 이 모델의 입력자료의 소급성을 확보하는 것과 모델식의 감도계수를 산정하는 것은 거의 불가능하다. ERA5 기상자료는 유럽중기예보센터에서 데이터만 제공하고 있어, 실제 모델식이 어떻게 구성되어 있는지 알 수 없다.

작동방식이 복잡한 측정기기에서 표준물질을 사용하여 그 불확도를 산정하듯이, 위성일사량과 재해석 기상자료 대해서는 표준데이터를 사용하여 그 불확도를 산정하는 방법을 택한다. Fig. 4에 위에서 설명한 불확도 직접계산 방식과 표준물질을 활용한 산정법을 도시하였다.

기존에 생산되어 있는 표준기상년 국가참조표준 자료와 같은 기간, 같은 지점의 자료를 활용하여 Bias Correction을 먼저 수행하여, 측정량을 추정하고 그 불확도를 Estimation 한다. 대상 측정량은 이슬점온도, 건구온도, 표면기압, 풍속, 수평면 전일사량이다.

측정일사량 또는 측정기상자료 (E_o) 와 위성일사량 또는 재해석기상자료 (E_m)는 이상적인 경우 기울기가 1이고, 절편이 0인 선형관계를 가져야한다(Fig. 5의 검은 선). 하지만 실제로는 아래 그림의 파란색 점과 같은 분포를 가진다. 이 데이터에 대해 선형 회귀를 수행하여 기울기 a와 절편 b를 산정한다. 파란색점들에 대한 최소제곱선은 Fig. 5의 빨간색 선과 같다.

최소제곱선을 검은색 선과 일치시키기 위해 Bias Correction을 수행한다. Bias Correction된 일사량을 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$E'_o = aE_m + b \tag{1}$$

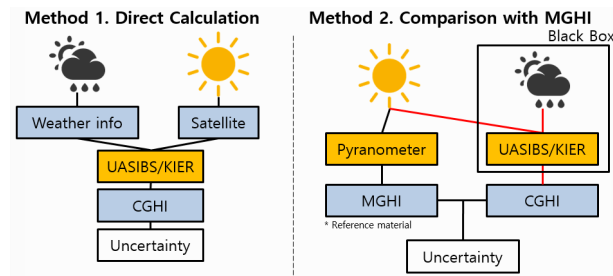


Fig. 4. Uncertainty estimation methods

모델 값을 측정값과 비교하여 Bias Correction이 완료되었다. 보정된 모델 일사량의 선형 회귀 결과가 기울기 1, 절편 0인 1:1 선으로 나와 Bias가 보정되었음을 알 수 있었다(Fig. 6 참조).

Bias가 보정된 E'_o 의 불확도 $u(E'_o)$ 은 식 (2)와 같이 표현이 가능하다.

$$u(E'_m) = \sqrt{E_m^2 u^2(a) + u^2(b) + 2E_m u(a,b)} \tag{2}$$

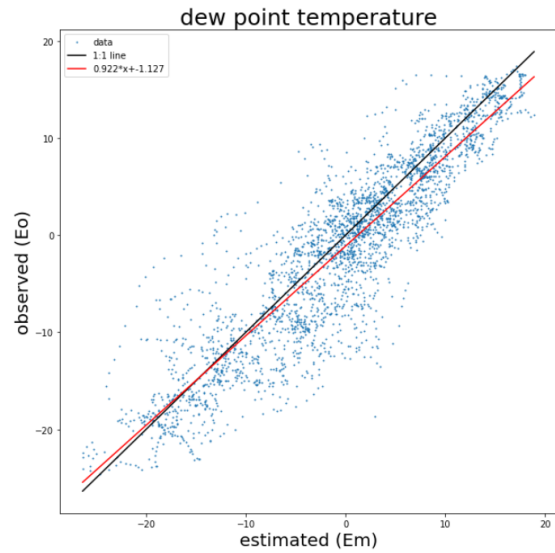


Fig. 5. Linear regression of T_{dp}

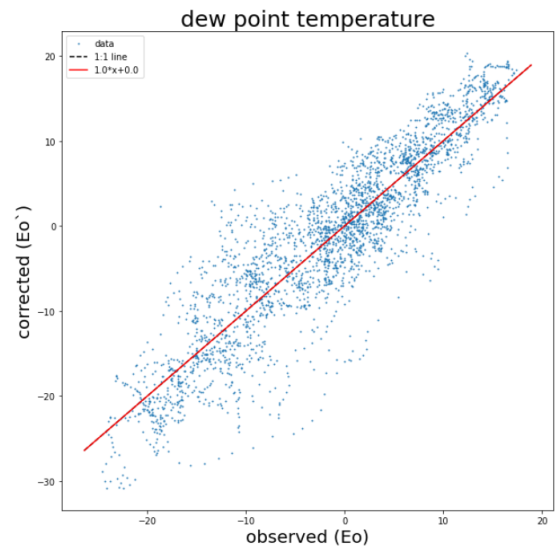


Fig. 6. bias correction of T_{dp}

포함인자를 적용하여, 확장불확도는 식 (3)과 같다.

$$U = 2u(E_m') \quad (3)$$

위 과정을 각각 슬점온도, 건구온도, 표면기압, 풍속, 수평면 전일사량에 대하여 각각 수행하여 불확도를 산출한다.

측정 TMY에서 측정불확도를 소급해 오는 방법은 고안했지만, 측정 TMY의 지점수는 16개, 모델 TMY의 지점수는 1,000개이므로 일치하는 지점을 찾아 1:1로 소급하는 것은 불가능하다. 본 연구에서는 Fig. 7과 같이 측정 TMY 16 지점을 기준으로 대한민국 국토를 16분할하여, 각 지역 안에 속해있는 모델 TMY의 불확도는 동일하다고 가정하여 소급하였다. 이는 지점이 일치하지 않는 모델 TMY에 대해 소급성을 확보하기 위한 어쩔 수 없는 선택이다.



Fig. 7. Divided 16 regions by measured TMY

상기 과정을 거쳐 최종적으로 평가된 포함인자 2의 측정 불확도는 다음과 같다. 건구온도 2.4°, 이슬점온도 1.7°, 상대습도 12%, 표면기압 1.5 hPa, 풍속 37%, GHI 7%. 이 풍속과 GHI는 상대불확도로 표시되어 %의 단위를 가지며, 상대습도의 경우 절대 불확도이지만 단위 자체가 %이다.

5. 결론

본 연구를 통해 위성영상 일사량과 ERA-5 재해석 자료 기반의 모델 TMY 데이터를 국내 1,000지점에 대해 생산하였다. 생산된 데이터에 대해 각 항목들은 국제적으로 통하는 GUM(Guide to the expression of Uncertainty in Measurement)의 엄밀한 절차를 거친 불확도 평가를 하였다. 측정 불확도를 측정 원기 또는 단위 정의에서부터 직접적으로 소급할 순 없었으나, 직접적으로 소급하여 이미 불확도를 생산한 측정 TMY에서 간접적으로 소급해올 수 있었다. 이미 생산된 측정 TMY를 일종의 인증표준물질(CRM: Certified Reference Material)로 활용하여 모델 데이터의 생산 방식 자체는 블랙박스로 두고 불확도를 평가하였다. 그 결과 측정 TMY 데이터의 불확도에 비해 다소 높지만, TMY 사용자 입장에서 수용할 수 있을 정도로 크기의 불확도를 제공할 수 있었다. 측정 불확도가 제공이 되면 이 숫자를 기반으로 최종적으로 태양광 발전량의 확률분포를 사전에 알 수 있으므로 리스크 평가가 가능해진다. 본 데이터를 활용하면, 리스크 평가를 통해 투자금을 회수할 확률이 얼마나 될 것인지 정량적인 평가가 가능해지므로 은행들이 프로젝트 파이낸싱을 더 적극적으로 끌어낼 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 2021년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구입니다(20016225).

References

- [1] Wilcox, S., and Marion, W., 2008, "Users manual for TMY3 data sets", NREL Technical Report, <https://www.nrel.gov/docs/fy08osti/43156.pdf>.
- [2] Munoz Sabater, J., 2019, "ERA5-Land hourly data from 1950 to present", Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), Accessed 23 February 2024, DOI: 10.24381/cds.e2161bac.

- [3] Kim, C.K., Leuthold, M., Holmgren, W.F., Cronin, A.D., and Betterton, E.A., 2016, "Toward improved solar irradiance forecasts: a Simulation of deep planetary boundary layer with scattered clouds using the weather research and forecasting model", *Pure Appl. Geophys.*, **173**, 637-655.
- [4] Kim, C.K., Kim, H.G., Kang, Y.H, and Yun, C.Y., 2017, "Toward improved solar irradiance forecasts: Comparison of the global horizontal irradiance derived from the COMS satellite imagery over the Korean Peninsula", *Pure Appl. Geophys.*, **174**, 2773-2792.