

# 태양광 패널 일사량에 기반한 대표연도 데이터 비교 평가

윤창열<sup>1)</sup> · 김보영<sup>2)</sup> · 김창기<sup>1)</sup> · 김현구<sup>3)</sup> · 강용혁<sup>4)</sup> · 김용일<sup>5)</sup>\*

## Comparative Assessment of Typical Year Dataset based on POA Irradiance

Changyeol Yun<sup>1)</sup> · Boyoung Kim<sup>2)</sup> · Changki Kim<sup>1)</sup> · Hyungoo Kim<sup>3)</sup> · Yongheack Kang<sup>4)</sup> · Yongil Kim<sup>5)</sup>\*

Received 8 March 2024 Revised 15 March 2024 Accepted 15 March 2024

**ABSTRACT** The Typical Meteorological Year (TMY) dataset compiles 12 months of data that best represent long-term climate patterns, focusing on global horizontal irradiance and other weather-related variables. However, the irradiance measured on the plane of the array (POA) shows certain distinct distribution characteristics compared with the irradiance in the TMY dataset, and this may introduce some biases. Our research recalculated POA irradiance using both the Isotropic and DIRINT models, generating an updated dataset that was tailored to POA characteristics. Our analysis showed a 28% change in the selection of typical meteorological months, an 8% increase in average irradiance, and a 40% reduction in the range of irradiance values, thus indicating a significant shift in irradiance distribution patterns. This research aims to inform stakeholders about accurate use of TMY datasets in potential decision-making. These findings underscore the necessity of creating a typical dataset by using the time series of POA irradiance, which represents the orientation in which PV panels will be deployed.

**Key words** Typical meteorological year(표준기상년), Plane of array(패널 배열면), Reference standards(참조표준), Irradiance(일사량)

### Nomenclature

$I_t$  : total irradiance  
 $I_b$  : beam(direct) irradiance  
 $I_d$  : diffuse irradiance  
 $I_r$  : reflected irradiance  
 $Z$  : zenith angle  
 $R_b$  : the ratio of beam radiation on the tilted surface to beam radiation on a horizontal surface  
 $\beta$  : tilt angle  
 $\rho$  : ground reflectance

- 1) Principal researcher, Renewable Energy Big Data Laboratory, Korea Institute of Energy Research
- 2) Senior 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
- 5) Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Seoul National University

\*Corresponding author: yik@snu.ac.kr  
Tel: +82-02-880-7364

## Subscript

TMY : typical meteorological year  
 TMM : typical meteorological month  
 FS : finkelstein-schafer  
 CDF : cumulative distribution function  
 POA : plane of array  
 GHI : global horizontal irradiance  
 DNI : direct normal irradiance  
 DHI : diffuse horizontal irradiance

## 1. 서론

수시로 변하는 기후 데이터를 적용하는 방법으로 표준 기상년(TMY; Typical Meteorological Year) 데이터를 이용할 수 있다. 단순 평균값으로 수치를 적용한다면, 변동성이 적은 온화한 경향만을 반영하므로 실제의 데이터를 이어붙인 데이터셋을 구축하여 표준데이터로 이용하는 것이다.

일반적인 표준기상년 추출방법은 장기 기상데이터를 월 단위로 구분하고, 평균에 가장 가까운 연도의 월 데이터를 대표기상월(TMM; Typical Meteorological Month)로 정하는 방식이다.<sup>[1]</sup> 각 월별로 적합한 연도의 데이터를 선정하고, 총 12개의 월 데이터를 결합하여 전체 표준기상년 데이터셋을 구성하게 된다.

현재 한국에너지기술연구원에서 공개하는 표준기상년 데이터는 Sandia method(1978)를 이용하여 제작하였다.<sup>[2]</sup> 대표기상월을 선정하는 과정에는 일반적으로 FS(Finkelstein-Schafer) 통계방법을 이용하게 된다.<sup>[3]</sup>

Sandia method를 기준으로 한다면, 먼저 Table 1의 10개 기상요소별로 누적밀도함수(CDF; Cumulative Distribution Function)를 제작한다. 그리고 가중치를 고려했을 때, 전체 기간의 누적밀도함수와 가장 가까운 연도의 데이터를 해당 월의 대표기상월로 정하게 된다. 각 기상요소별 가중치는 균등하지 않다. 특히 일사량의 가중치가 50%로 기상요소들 중에서 차지하는 비중이 가장 크기 때문에 태양광과 태양열에 관한 분석에서 중요한 지표로 활용될 수 있다.

Table 1. Weighting values for FS statistics (Sandia method)<sup>[1]</sup>

Index	Weights
Global radiation	12/24
Dry bulb temperature (Max.)	1/24
Dry bulb temperature (Min.)	1/24
Dry bulb temperature (Mean)	2/24
Dew Point temperature (Max.)	1/24
Dew Point temperature (Min.)	1/24
Dew Point temperature (Mean)	2/24
Wind Velocity (Max.)	2/24
Wind Velocity (Min.)	2/24

표준기상년 데이터의 일사량 데이터는 일반적으로 GHI (Global Horizontal Irradiance)라고 부르는 수평면 전일사량이다. 고정형 태양광 설비를 설치할 경우에는 일반적으로 해당지점의 위도값을 활용하여 태양광 패널에 설치각을 부여하기 때문에 태양전지에 도달하는 일사량 수치는 수평면 전일사량과 달라지게 된다.

일반적인 설치방법에 따라 남향을 향하고, 위도값을 활용한 최적 설치각을 적용한다면, 태양광패널 입사면에 도달하는 일사량의 분포는 표준기상년의 일사량의 분포와 차이가 발생할 수 있다.

표준기상년의 대표기상월을 선정하는 방식으로 태양광 패널에 도달하는 일사량(이하 POA(Plane of Array) 일사량)에 대해서도 FS 통계를 적용한다면, 새로운 대표기상월이 등장하는지 의구심이 발생한다. 보통 각 표준월이 적용된 표준기상년 데이터를 활용하여 POA 일사량을 연산하기 때문에 일사데이터 분포형태를 분석하는 과정에서 오류가 발생할 수 있다.

본 연구에서는 고정식 태양광 설비를 가정한 POA 일사량과 기존 수평면 전일사량의 분포특성을 비교하고, FS 통계에 의한 표준데이터 추출결과를 비교하여 그 차이를 분석하였다. 기존의 다수 연구들이 수평면 전일사량을 이용하여 특정 조건에서의 POA 일사량을 추출하는 모델 정확도에 치중하였다면, 본 연구에서는 수평면 전일사량 데이터 분포와 이에 상응하는 POA 일사량 데이터 분포를 비교하고, 대표년(Typical Year) 데이터셋을 새로 선정하였다.

## 2. 선행 연구

대표기상월을 선정하는 방식에 따라 각기 다른 결과가 도출된 많은 사례가 존재한다. Habte *et al.* (2014; 2023)의 경우, 대표기상월을 선정하기 위한 가중치를 법선면 직달일사량에 100% 부여한 TDY(Typical Direct(normal irradiance) Year), 수평면 전일사량에 100%에 부여한 TGY(Typical Global(horizontal irradiance) Year) 데이터셋을 생성하여 TMY, TDY, TGY 데이터셋 간의 분포 특성과 그 차이를 비교하였다.<sup>[4]</sup> 이후에도 태양광 패널 배열면(POA) 수치를 이용하여 TPY(Typical POA Year) 데이터셋을 생성하고 평가하였다. 새로운 TPY와 기존 TMY를 비교한 결과, 일반적인 태양광 시스템을 가정할 경우, 약 ±5% 가량의 에너지 생산량을 오차 발생을 확인하였다.<sup>[5]</sup>

문제는 새로운 POA 일사량을 얻기 위해서는 추가적인 모델식과 입력인자가 요구된다는 것이다. 이에 POA 일사량 산정에 적합한 모델식을 평가하고 실제의 데이터를 활용하여 그 성능을 평가하는 논문이 다수 존재한다.

Gueymard(2009)는 미국 콜로라도의 중위도 지역에 대해 10개의 전치(Transposition) 모델과 다양한 직접/확산 모델을 비교하였다.<sup>[6]</sup> Yang *et al.* (2013)은 이러한 연구를 열대대기조건을 나타내는 적도 지역에 적용하였다.<sup>[7]</sup> Lave *et al.* (2015)의 연구에서도 미국 전역 12지점에 대해 분석을 수행하였으며, 모델이 오차를 가지는 원인으로, 알베도, 일사량 성분별 추정치 등을 지적한 바 있다.<sup>[8]</sup>

이외에도 많은 논문들이 POA 일사량을 구하는 최적모델을 분석하여 그 결과를 제시하였으나, 공통적인 의견은 기후조건과 시공간적 상황에 따라 모델의 성능은 다르게 나타날 수 있다는 것이다. 따라서 가장 높은 성능의 일사량 추정을 위해서는 대상지역에 대한 장기간의 지상관측데이터를 구하고 이를 이용하여 최적화를 수행하는 과정이 필요하다.

## 3. 연구 방법

### 3.1 이론적 배경

POA 일사량을 구하는 전치 모델은 보통 등방성(Isotropic) 모델과 비등방성(Anisotropic) 모델로 나뉘게 된다. 등방성 모델은 산란 일사가 모든 방향에서 균일하게 분포한다고 가정하는 반면, 비등방성 모델은 태양의 위치와 대기 중의 산란 특성을 고려하여 산란 일사량을 보다 정밀하게 추정한다.<sup>[9]</sup>

등방성 모델로는 대표적으로 Liu and Jordan 모델이 있으며, 비등방성 모델에는 Hay model, HDKR model, Perez model 등이 있다.<sup>[6~10]</sup> 이 외에도 등방성 또는 비등방성에 해당하는 다양한 모델이 존재한다. 본 연구에서는 비교적 단순하지만 SAM 소프트웨어 등에서 많이 활용되고 있는 등방성 모델을 활용한다.<sup>[10]</sup>

비등방성 모델은 다양한 입력인자를 요구하는 복잡한 수식을 가지기 때문에 입력인자의 수치가 상황에 맞게 정교하게 적용되어야 한다. 대상지역의 주변상황과 적용시점에 따라 이러한 입력인자는 차이가 발생하기 때문에 사전에 각 모델식의 적용조건에 따른 성능 분석이 필요하다.<sup>[6~9]</sup> 본 연구에서는 국내의 다양한 위치에 대한 일반적인 경향을 확인하기 위해 비교적 단순한 입력인자를 가지는 아래의 등방성 모델식을 적용하였다.

$$I_t = I_b + I_d + I_r \quad [W/m^2] \quad (1)$$

$$I_b = DNI \cos Z \times R_b \quad [W/m^2] \quad (2)$$

$$I_d = DHI \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad [W/m^2] \quad (3)$$

$$I_r = GHI \rho \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad [W/m^2] \quad (4)$$

$I_t$ 는 태양광 패널에 도달하는 전일사량, 즉 POA 전일사량을 의미한다.  $I_b$ 는 POA 직달일사량,  $I_d$ 는 POA 산란일사량, 그리고  $I_r$ 는 지면으로부터 반사되어 오는 POA 반사일사량이며, 모두 POA 일사량의 각 성분들이다.

DNI는 법선면 직달일사량, DHI는 수평면 산란일사량,

GHI는 수평면 전일사량을 의미하며, 모두 지표면 기준의 수치이다.  $Z$ 는 태양 천정각,  $\beta$ 는 태양광 패널의 설치각이다.  $R_b$ 는 수평면 직달일사량에 대한 POA 직달일사량의 비율로, 태양광 패널의 위도, 경도, 설치방위각은 물론 태양의 움직임에 따른 기하학적인 조건을 반영해야 하므로 선행적으로 산출되어야 한다.  $\rho$ 는 지표면 반사율로 일반적으로 0.2의 수치를 적용하며,  $\beta$ 는 태양광 패널의 경사각이다.

POA의 총일사량은 식 (1)과 같이 입사되는 직달일사량, 확산일사량, 반사일사량, 이상 3가지 성분으로 구분할 수 있으며 이들을 개별적으로 산출한 후 합산하여 구하게 된다.

### 3.2 적용 데이터

본 연구에서는 Table 2의 16개 지점의 측정데이터를 기반으로 한국에너지기술연구원에서 제작한 표준기상년 데이터를 활용한다. 기상청에서 관측된 30년 동안의 기상데이터를 활용하여 제작한 결과로, 국가참조표준 데이터센터의 웹사이트(<https://www.srd.re.kr>)에서 내려받을 수 있다.

표준기상년 데이터는 건구온도, 이슬점온도, 상대습도, 대기압, 풍속, 수평면 전일사량의 데이터가 불확도와 함께 1시간 간격으로 기재되어 있다.

기상청에서 측정데이터로 제공하는 자동기상관측시스템

(AWS; Automatic Weather System)과 종관기상관측시스템(ASOS; Automated Synoptic Observing System)의 데이터에는 수평면 전일사량 데이터만 포함되어 있으며, 직달일사량 데이터가 없으므로, 별도의 직산분리(Decomposition)모델을 이용해야 한다.

다양한 직산분리모델에 존재하고, 시공간 조건에 따라 역시 각 모델의 성능이 차이가 난다.<sup>[11]</sup> 본 연구에서는 국가참조표준 데이터센터에서 제공하는 표준기상년 데이터가 이슬점온도와 대기압 데이터를 포함하고 있다는 점에 착안하여, 이 데이터를 입력인자로 활용할 수 있는 DIRINT 모델을 활용하였다. DIRINT 모델은 Perez에 의해 제안된 모델로써, 기존 DISC 모델을 개선한 모델이다.<sup>[12]</sup> 해당 알고리즘은 파이썬 오픈소스 라이브러리인 PVlib을 통해 구현되었다.<sup>[13]</sup>

## 4. 분석 결과

### 4.1 일사량 분포 특성

Fig. 1은 국내 16지점에 대해 총 30년(1991~2020년) 동안의 수평면 전일사량 데이터에 대해서 각 연도별로 월평균 데이터를 표시하고, 표준기상년 데이터를 굵은 선으로 나타낸 결과물이다.

우리나라의 기후 특성상 5월이 일사량이 가장 좋은 특성을 보이고, 여름철은 장마의 영향으로 대체로 봄보다 좋지 못한 모습이다. 7월에서 8월로 넘어가면서 월별 일사량이 증가하는 경향도 많이 나타난다. 표준기상년 데이터를 보면 이러한 경향을 보다 뚜렷하게 확인할 수 있다.

Fig. 2는 마찬가지로 국내 16지점, 총 30년의 POA 일사량 연산 결과물이다. 기존의 수평면 전일사량을 POA 일사량으로 대체한 후, 표준기상년 산출방법을 동일하게 적용시켜 새로운 대표기상월을 선정하게 된다. 마찬가지로, 대표기상월의 POA 일사량을 굵은 선으로 나타내었다.

겨울철에 낮고, 봄철에 높은 일사량 특성을 보이는 표준기상년 일사량 분포패턴과 많은 차이를 보이고 있다. 겨울철 동안의 POA 일사량이 상당히 증가하여, 전체적으로 편차가 줄어든 모습이다.

Fig. 3과 같이 16개 지점의 표준기상년 일사량 데이터의

Table 2. Location information for 16 sites

Code	Province/City	District	Latitude	Longitude
101	Gangwon	Chuncheon	37.90	127.74
105	Gangwon	Gangneung	37.75	128.89
108	Seoul	Seoul	37.57	126.97
112	Incheon	Incheon	37.48	126.62
114	Gangwon	Wonju	37.34	127.95
129	Chungnam	Seosan	36.78	126.49
131	Chungbuk	Cheongju	36.64	127.44
133	Daejeon	Daejeon	36.37	127.37
138	Gyeongbuk	Pohang	36.03	129.38
143	Daegu	Daegu	35.88	128.65
146	Jeonbuk	Jeonju	35.82	127.16
156	Gwangju	Gwangju	35.17	126.89
159	Busan	Busan	35.10	129.03
165	Jeonnam	Mokpo	34.82	126.38
184	Jeju	Jeju	33.51	126.53
192	Jeju	Seogwipo	33.29	126.16

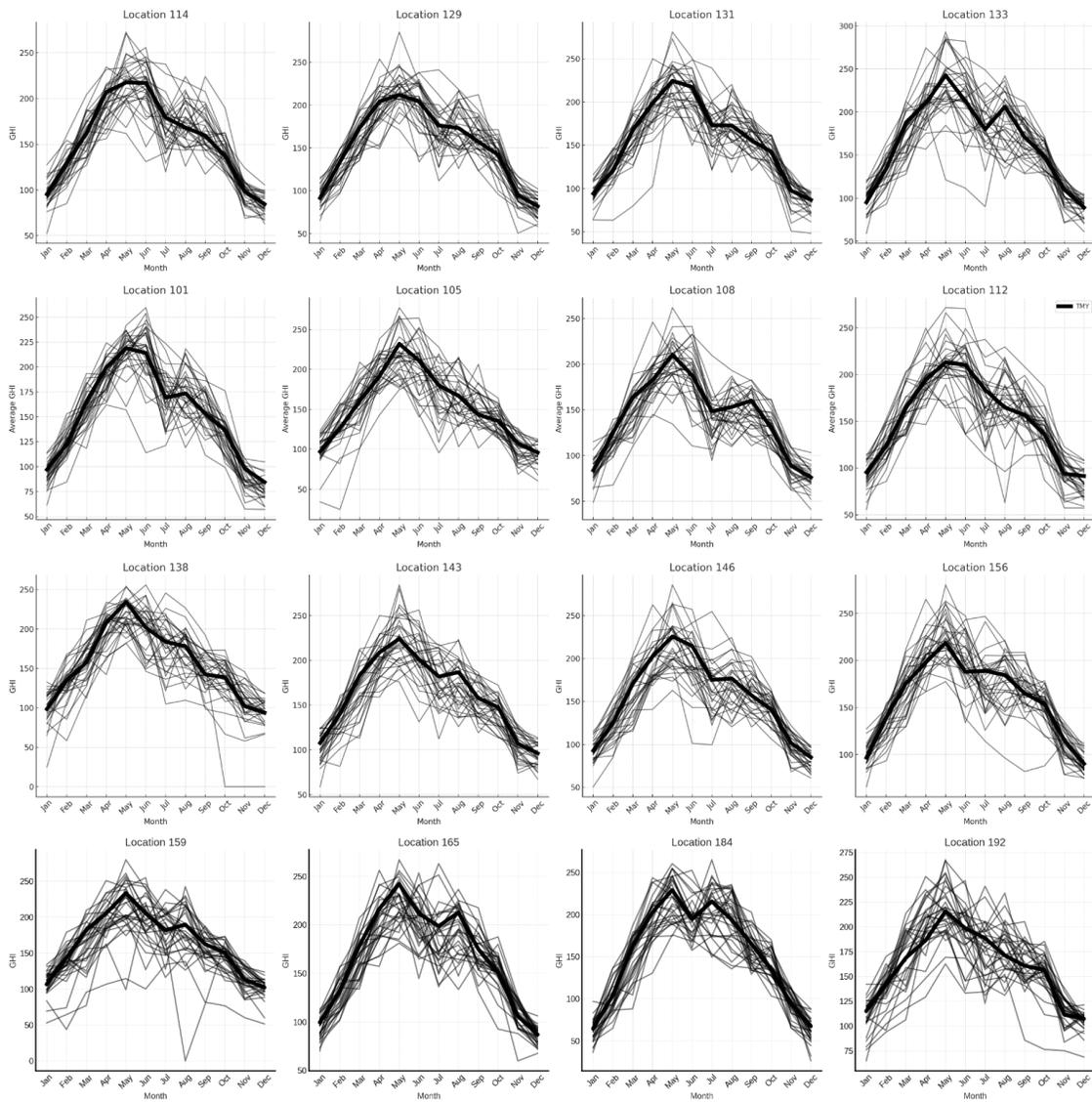


Fig. 1. Monthly GHI with typical year data

평균값을 조사해보면, 표준기상년 일사량의 경우, 최대값 평균이  $224.65 \text{ W/m}^2$ , 최소값의 평균이  $88.50 \text{ W/m}^2$ 으로, 전체 평균값은  $156.72 \text{ W/m}^2$ 로 나타났다. Fig. 4와 같이 16개 지점 대표기상년의 POA 일사량의 경우는 최대값 평균이  $211.16 \text{ W/m}^2$ , 최소값의 평균은  $129.30 \text{ W/m}^2$ 로, 전체 평균값은  $170.94 \text{ W/m}^2$ 이다.

POA 일사량을 표준기상년 일사량과 비교하였을 때, 평균은 9% 상승, 최대값은 6% 하락, 최소값 46% 상승하였다. 최대최소 간 평균편차도  $136 \text{ W/m}^2$ 에서  $81.86 \text{ W/m}^2$ 로 40% 감소하였다.

전체적으로 일사량은 증가한 모습인데, 최대와 최소 사이의 간격을 줄어드는 평활화 효과가 발생함을 확인할 수 있었다.

Table 3과 4는 각 16개 지점별 대표기상년을 선정한 결과물이다. POA 일사량을 이용해서 새로 연산하였을 때, 대표기상년이 변경된 일을 진한 색으로 구분하였다. 전체 192개 중 54개, 약 28% 정도가 변경되었다.

Fig. 5와 같이 월별로 변경된 빈도를 살펴보면 주로 2월에서 5월까지가 제일 많이 변경되었음을 확인할 수 있다.

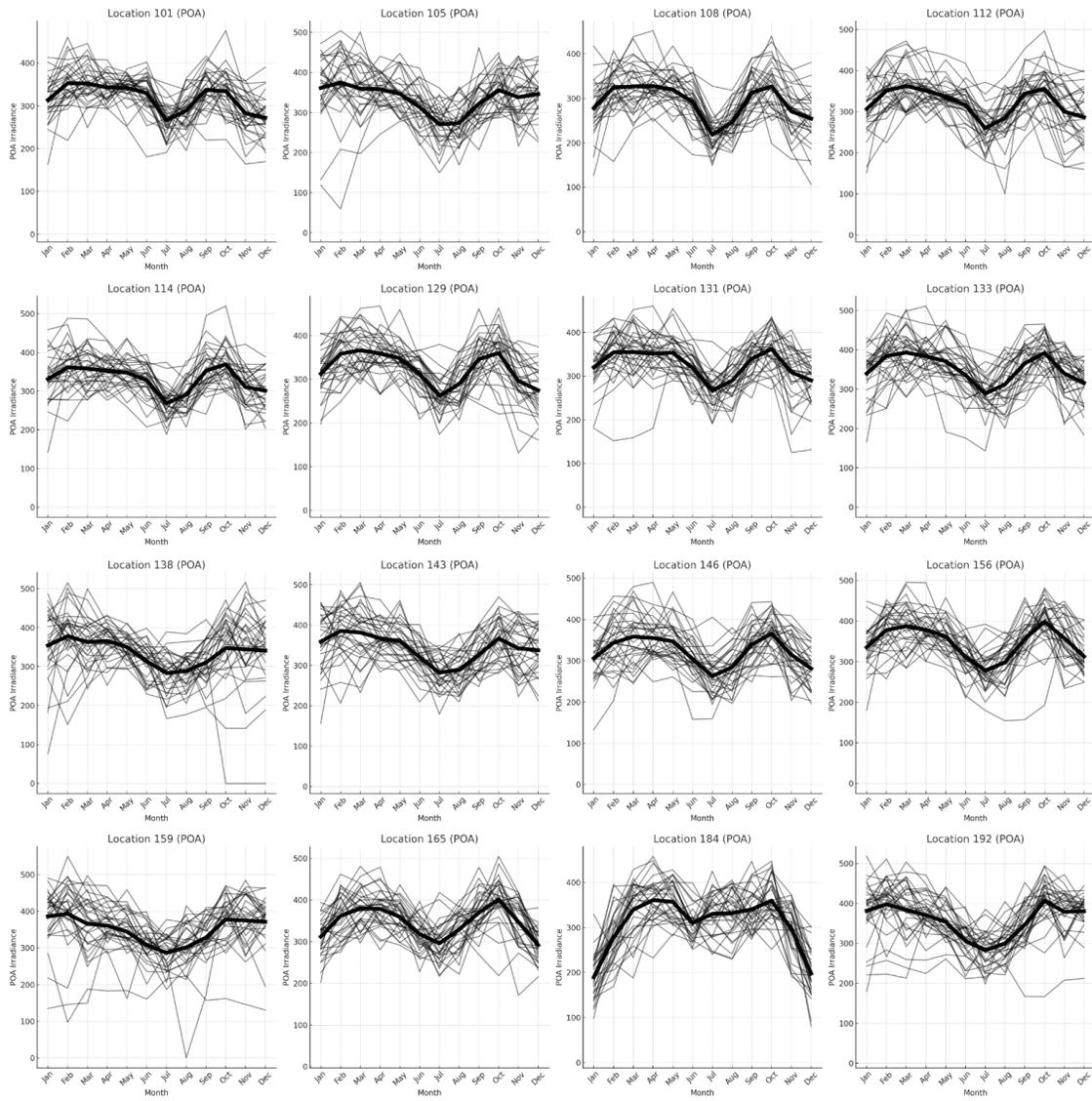


Fig. 2. Monthly POA radiation with typical year data

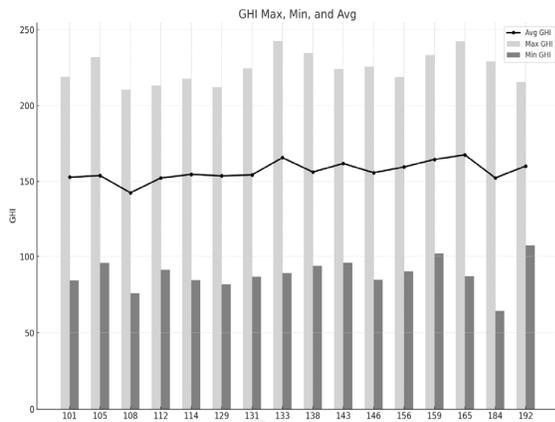


Fig. 3. Monthly GHI (Max., Min., Avg.)

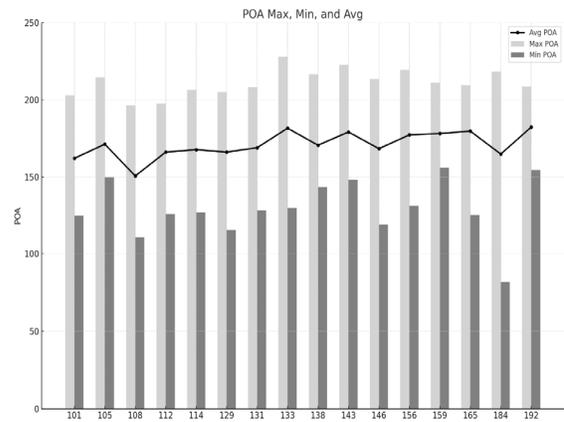


Fig. 4. Monthly POA radiation (Max., Min., Avg.)

Table 3. Typical meteorological month by site

site	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
101	2008	1994	2009	2009	1993	2006	2002	1994	2005	2007	2008	2003
105	2002	1994	1997	1997	2013	1994	1995	1997	2004	1995	2019	2006
108	2014	2011	2006	2007	2020	1994	2002	2017	2004	2012	2006	2008
112	2008	2011	2009	2012	2007	2007	2019	2007	1991	2007	2006	2000
114	2016	2016	2009	2005	2010	2007	2019	2000	2004	2005	2008	2010
129	1993	2006	2009	2008	2006	2007	2012	1992	2003	2007	2008	1993
131	1994	2016	2019	2012	2003	2006	2012	2017	2005	2005	2016	2008
133	2008	2006	2006	2012	2007	2007	2002	2017	2012	2000	2013	1999
138	1996	1993	1997	2005	2008	1999	2019	2005	1991	2004	2009	1994
143	2009	2016	2009	2008	2010	2004	2005	2015	2020	2004	2008	2008
146	2014	2001	2000	2000	2018	2016	2002	2004	2016	2007	2008	2003
156	2015	2016	2003	2012	2010	2007	2004	1996	2003	2010	2004	2008
159	2016	1999	2009	2004	2013	2007	2015	2015	2017	2007	2014	2010
165	2009	2019	2009	2007	2007	2006	2011	1996	2018	2005	2006	2009
184	2001	2001	2009	2007	2020	2010	2000	2019	2014	1999	1999	2013
192	1994	2011	2003	2006	2001	2004	2012	2012	2020	2013	2009	1990

Table 4. Typical month by site (POA)

site	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
101	2016	2010	2017	2018	1993	2006	2002	2011	2005	2007	2008	2003
105	2002	2011	2009	2012	1994	1994	1995	2011	2004	1995	2019	2006
108	1996	2006	2008	2007	2020	1994	2002	2017	2004	2007	2006	2003
112	2008	2006	2018	2012	2007	2007	2019	2007	2006	2007	2006	2000
114	2016	2006	2009	2005	2010	1997	2019	2000	2004	2005	2008	2010
129	1993	2006	2009	2008	2006	2007	2012	1992	1990	2007	2008	1993
131	1994	2016	2009	2012	2010	2006	2012	2017	2004	2005	2016	2008
133	2008	2006	2006	2012	2007	2007	2002	2017	2002	2000	2013	1999
138	1996	1993	1997	1995	1998	2003	1997	2005	1991	2005	2009	2007
143	2004	2016	2009	2016	2008	2004	2005	2001	2019	2004	2008	2008
146	2008	2001	2000	2000	2018	2016	2002	2004	2013	2013	2008	2003
156	2015	2016	2003	1991	2010	2007	2004	1996	2003	2010	2016	2008
159	2016	2015	2016	2004	2011	2014	2015	2015	2017	2007	2014	2010
165	2009	2001	2009	1999	2011	2006	2011	1996	2018	2005	2006	2009
184	2001	2001	2009	2007	2020	2003	2000	2019	2014	2020	1999	2013
192	1994	2002	2003	2014	2000	2004	2012	2012	2020	2013	2009	2008

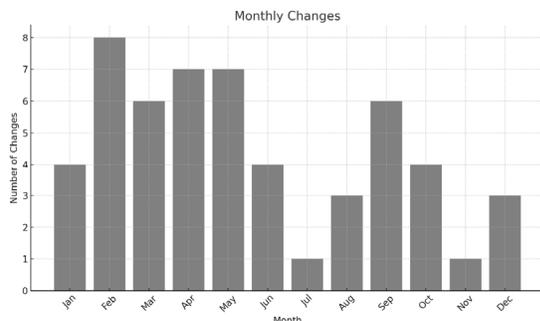


Fig. 5. Monthly distribution of changes

## 5. 결론

일사량 데이터는 시공간 특성에 따라 그 편차가 크게 나타나고, 경향성 파악이 쉽지 않다. 국내 공개된 직접관측 데이터의 지점 수도 적고, 표준데이터를 직접 추출하기도 어려움이 따르기에 앞으로 장기 시계열 데이터를 기반으로 하는 표준기상년의 데이터의 활용은 더욱 많아질 것으로 보인다.

일반적인 표준기상년의 일사량은 수평면 전일사량으로, 경사면 태양광 패널 등에 적용하기 위해서는 태양 입사각 등을 고려하여 복잡하게 연산되는 POA 일사량이 필요하다.

하지만 본 논문에서 제시한 바와 같이 수평면 전일사량을 활용하여 구한 대표기상월과 POA 일사량을 기반으로 한 대표기상월은 차이가 발생하기에 이를 염두에 두고 활용해야 할 것이다. 본 논문의 주요결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 국내 16지점의 30년 시간누적 데이터를 이용하여 분석한 결과, 수평면 전일사량을 활용하여 구한 대표기상월과 POA 일사량을 기반으로 한 대표기상월은 28% 정도의 차이가 발생하였다.
- 2) 대표기상월을 이용하여 추출된 POA 일사량은 표준기상년의 수평면 일사량과 비교하였을 때, 평균값이 9% 상승하고, 최대, 최소의 편차는 40% 감소하였다.

본 연구에서는 Isotropic 전치모델과 DIRINT 직산분리 모델을 적용하여 POA 일사량을 연산하였다. 가용한 전치모델과 직산분리모델의 종류도 매우 다양하고, 시공간적 특성도 세밀하게 적용할 수 있기에 향후 더 정확한 POA 데이터셋이 생성될 수 있을 것이다.

일사량은 동일한 시공간이라고 해도, 설치각, 방위, 그리고 설치조건에 따른 그림자 효과 등, 이용환경에 따라 대상면에 입사되는 일사량이 변화된다. 사업성 평가 등 일사량의 정밀한 분석을 위해서라면, 기존의 수평면 전일사량의 분포만을 그대로 적용하기보다는 본 연구에서와 같이 POA 일사량을 새롭게 연산하고, 이러한 데이터셋을 토대로 새로운 표준일사량을 추출하는 과정이 필요하다.

한국에너지기술연구원에서는 2010년도부터 산업부로부터 신재생에너지 참조표준 데이터센터의 자격을 부여받아

국내 표준기상년 데이터셋을 생산하는 연구를 수행하고 있다. 그리고 새로운 결과물을 국가참조표준 데이터센터에 지속적으로 등재하고 있다.

그 결과, 현재까지 생성된 국내 표준기상년 데이터셋은 1000지점 이상이다. 지상센서를 활용하여 직접 관측된 데이터와 위성영상과 재분석자료를 활용하여 제작된 데이터를 활용하여 데이터셋을 확장해 가고 있다.<sup>[14]</sup> 국가참조표준 데이터센터 웹페이지를 통해 공개하고 있으니 보다 많은 활용과 검증이 이루어지길 바란다.

## 감사의 글

본 연구는 2023년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(C4-4334).

## References

- [1] Wilcox, S., and Marion, W., 2008, “Users manual for TMY3 data sets”, National Renewable Energy Lab. (NREL), DOI: <https://doi.org/10.2172/928611>.
- [2] Kim, S.Y., Lee, H.J., Kim, H.G., Jang, G.S., Yun, C.Y., Kang, Y.H., Kang, C.S., and Choi, J.O., 2016, “A study on uncertainty to direct normal irradiance of typical meteorological year data”, *New. Renew. Energy*, **12**(S2), 36-43.
- [3] Finkelstein, J.M., and Schafer, R.E., 1971, “Improved goodness-of-fit tests”, *Biometrika*, **58**(3), 641-645.
- [4] Habte, A., Lopez, A., Sengupta, M., and Wilcox, S., 2014, “Temporal and spatial comparison of gridded TMY, TDY, and TGY data sets”, National Renewable Energy Lab. (NREL), DOI: <https://doi.org/10.2172/1126297>.
- [5] Habte, A., Sengupta, M., Buster, G., and Xie, Y., 2023, “Development and evaluation of typical plane of array year (TPY) for solar energy systems over the Americas”, *IEEE 50th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, DOI: <https://doi.org/10.1109/PVSC48320.2023.10359681>.
- [6] Gueymard, C.A., 2009, “Direct and indirect uncertainties in the prediction of tilted irradiance for solar engineering applications”, *Solar Energy*, **83**(3), 432-444.
- [7] Yang, D., Dong, Z., Nobre, A., Khoo, Y.S., Jirutitijaroen, P., and Walsh, W.M., 2013, “Evaluation of transposition and decomposition models for converting global solar irradiance from tilted surface to horizontal in tropical regions”, *Solar Energy*, **97**, 369-387.
- [8] Lave, M., Hayes, W., Pohl, A., and Hansen, C.W., 2015, “Evaluation of global horizontal irradiance to plane-of-array irradiance models at locations across the United States”, *IEEE Journal of Photovoltaics*, **5**(2), 597-606.
- [9] Duffie, J.A., and Beckman, W.A., 2013, “Solar engineering of thermal processes”, John Wiley & Sons, New York, 85-97.
- [10] Kang, E., Kim, J., Kim, D., and Yoon, J., 2023, “Development of predicted power generation nomogram of photovoltaic system by installation conditions using typical meteorological year”, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, **43**(4), 29-41.
- [11] Lee, H., Kim, S., and Yun, C., 2017, “Comparison of solar radiation models to estimate direct normal irradiance for Korea”, *Energies*, **10**(5), 594.
- [12] Perez, R., Ineichen, P., Maxwell, E.L., and Seals, R.D., 1992, “Dynamic global-to-direct irradiance conversion models”, *ASHRAE Transactions-Research Series*, **98**, 354-369.
- [13] Holmgren, W.F.H., Hansen, C.W., and Micofski, M.A., 2018, “Pvlib python: A python package for modeling solar energy systems”, *Journal of Open Source Software*, **3**(29), 884.
- [14] National Standard Reference Data Center, “Typical meteorological year data”, Accessed 28 February 2024, [https://www.srd.re.kr/css/srdinfsrv/S\\_CSS\\_010100.do?menuId=M\\_CSS\\_01\\_01](https://www.srd.re.kr/css/srdinfsrv/S_CSS_010100.do?menuId=M_CSS_01_01).