

위성영상 기반 일사량을 활용한 대전지역 표준기상년 데이터 생산

김창기* · 김신영** · 김현구*** · 강용혁*** · 윤창열*

*한국에너지기술연구원 신재생에너지자원·정책센터, 선임연구원
**한국에너지기술연구원 신재생에너지자원·정책센터, 고려대학교 전기전자공학과, 학생연구원
***한국에너지기술연구원 신재생에너지자원·정책센터, 책임연구원

Derivation of Typical Meteorological Year of Daejeon from Satellite-Based Solar Irradiance

Kim Chang Ki* · Kim Shin-Young** · Kim Hyun-Goo*** · Kang Yong-Heack*** · Yun Chang-Yeol*

*New and Renewable Energy Resource & Policy Center, Korea Institute of Energy Research, Senior Researcher
**New and Renewable Energy Resource & Policy Center, Korea Institute of Energy Research/ School of Electrical Engineering, Korea University, Graduated Student Researcher
***New and Renewable Energy Resource & Policy Center, Korea Institute of Energy Research, Principal Researcher

†Corresponding author: ckkim@kier.re.kr

Abstract

Typical Meteorological Year Dataset is necessary for the renewable energy feasibility study. Since National Renewable Energy Laboratory has been built Typical Meteorological Year Dataset in 1978, gridded datasets taken from numerical weather prediction or satellite imagery are employed to produce Typical Meteorological Year Dataset. In general, Typical Meteorological Year Dataset is generated by using long-term in-situ observations. However, solar insolation is not usually measured at synoptic observing stations and therefore it is limited to build the Typical Meteorological Year Dataset with only in-situ observation. This study attempts to build the Typical Meteorological Year Dataset with satellite derived solar insolation as an alternative and then we evaluate the Typical Meteorological Year Dataset made by using satellite derived solar irradiance at Daejeon ground station. The solar irradiance is underestimated when satellite imagery is employed.

Keywords: 표준기상년(TMY, Typical Meteorological Year), 위성영상기반 일사량(Satellite-derived solar irradiance), 관측 기반 일사량(In-situ measured solar irradiance)

기호설명

- AOD : Aerosol Optical Depth
- FS : Finkelstein-Schafer
- I_e : Extraterrestrial Solar Irradiance



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.38, No.6, pp.27-36, December 2018
<https://doi.org/10.7836/kjes.2018.38.6.027>

pISSN : 1598-6411
eISSN : 2508-3562

Received: 28 November 2018

Revised: 11 December 2018

Accepted: 14 December 2018

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I_g : Global Horizontal Irradiance

k_t : I_g/I_e

k_d : I_d/I_g

GOES-W : Geostationary Operational Environmental Satellite-West

KIER : Korea Institute of Energy Research

NREL : National Renewable Energy Laboratory

rMBE : relative Mean Bias Error (=Estimation - Observation)

rRMSE : relative Root Mean Square Error

TMY : Typical Meteorological Year

UASIBS : University of Arizona Solar Irradiance Based on Satellite

그리스 문자

θ : 태양천정각

γ^2 : 결정계수 (coefficient of determination)

1. 서론

2017년 12월 정부가 ‘재생에너지 3020 이행계획’을 발표한 이후 신재생에너지 보급이 가속화되고 있다. 신재생에너지 설비의 경제성 평가 및 최적 설계를 위하여 신재생에너지 자원평가를 수행하는데, 이때 해당 지역에 대한 장기간의 기상학적 패턴을 나타내는 표준기상년(TMY, Typical Meteorological Year) 데이터가 사용된다. TMY 데이터는 1978년 미국 NREL (National Renewable Energy Laboratory)에서 최초로 개발한 이후 현재는 관측 기반(*in-situ* observation) 기상요소뿐만 아니라 위성영상 또는 수치기상예측 데이터를 활용하여 격자별로 생산하는 단계에 이르고 있다¹⁾.

국내에서는 한국에너지기술연구원 신재생에너지자원 정책센터가 2010년 국가참조표준데이터센터로 지정된 이래 현재까지 국내 22개 지점에 대해서 TMY 데이터를 생산하였다²⁾. 한국태양에너지학회에서도 1981년부터 2010년까지 국내 7개 지점에 대해서 TMY 데이터를 제공하고 있다³⁾. Jee et al.(2012)⁴⁾는 2000년부터 2010년까지 국내 22개 지점에 대한 TMY 데이터를 생산한 바 있다. 여러 기관에서 생산된 TMY 데이터는 모두 관측 기반 기상요소로 생산을 하고 있는데, 국내의 경우 산악지형이 많고 일사량 관측소가 조밀하게 분포하고 있지 않아 미계측지에 대한 TMY 데이터 생산에 대한 필요성이 증가하고 있는 추세이다.

따라서 본 연구는 대전지역에 대해서 위성영상 기반 일사량을 통해 생산된 TMY 데이터를 관측 기반 일사량을 통해 생산된 TMY 데이터와 비교검증을 수행하여 향후 일사량 미계측지에 대해서 위성영상 기반 일사량의 활용가능성을 검증하고자 한다.

2. 연구자료 및 방법

2.1 연구자료

(1) TMY 데이터

TMY 데이터는 장기간 축적된 기상요소를 이용하여 기후학적인 패턴을 가장 근접하게 보이는 대표 기상월을 선정하고, 그 대표 기상월에 해당하는 시간별 기상요소를 연결하여 생산된다. 한국에너지기술연구원에서는 미국 Sandia National Laboratory에서 개발한 방법¹⁾을 이용하여 대전 지역의 표준기상월을 선정하여 8760시간에 대한 가상의 연속적인 기상 데이터를 제작하였다. TMY 데이터 생산과 관련된 자세한 내용은 Lee et al. (2017)⁵⁾에 제시되어 있으므로 여기서는 대표 기상월 선정과 관련된 내용만을 기술하고자 한다.

대표 기상월 선정 및 TMY 데이터 생산에 사용된 기상요소는 수평면 전일사량, 법선면 직달일사량, 건구온도 평균값/최대값/최소값, 이슬점 온도 평균값/최대값/최소값, 그리고 풍속의 최대값/최소값이다. Lee et al. (2017)⁵⁾에서 법선면 직달일사량을 제외한 모든 기상요소는 지상에서 관측된 데이터를 사용하였지만, 상대적으로 법선면 직달일사량의 관측 기간이 짧거나 일부 관측소의 경우 법선면 직달일사량을 관측하지 않아 대신 Reindl-2 모델이 이용되었다. 대표 기상월 선정은 10개 기상요소에 대한 누적분포함수(Cumulative Distribution Function)가 장기 누적데이터에 근접한 순서로 5개 후보월을 선정하는데, 정량적인 평가지표로 FS 통계치를 사용하여 근접성을 평가한다⁶⁾. 기후학적인 경향성을 반영하기 위하여 일사량 뿐만 아니라 다른 기상요소도 고려해야 하므로 10개의 기상요소에 대한 가중치를 적용할 필요가 있다. 따라서 대표기상월을 선정하는데 Table 1에 제시된 가중치를 적용하여 FS 통계치의 합을 연산한다. 일사량과 관련된 가중치는 50%로 TMY 데이터 생산에 일사량에 대한 중요도가 큰 것을 알 수 있다.

(2) 위성영상 기반 일사량

Table 1에 따르면 TMY 데이터 생산 시 대표 기상월 선정에 일사량에 대한 가중치가 크므로 장기간 축적된 일사량 데이터를 확보하는 것이 가장 중요하다. 그러나 기상청 산하 종관관측소 중에서 일사량을 관측하는 관측소는 일부에 지나지 않고 그 기간도 상대적으로 짧아서 TMY 데이터를 생산하는데 한계가 있다. 본 연구에서는 위성영상과 일사량 해석모델을 사용하여 일사량을 산정하였는데, 해석 모델에 대한 자세한 알고리즘은 Kim et al. (2016a, 2016b)^{7),8)}에 소개되었다.

미국 애리조나 지역에 최적화된 UASIBS (University of Arizona Solar Irradiance Based on Satellite) 모델은 GOES-W (Geostationary Operational Environmental Satellite-West) 위성영상을 기반으로 일사량 산정에 사용된 바 있고, 그 성능은 시간 평균 일사량에 대한 rRMSE가 11.8%~12.6%에 분포하였다^{7),8)}. 이후 Kim et al. (2017)⁹⁾은 천리안 기상위성 영상을 이용하여 한반도 지역에 대한 일사량을 격자별로 산정하기 위하여 기존 미국 위성에 최적화된 UASIBS 모델을 수정하여 UASIBS-KIER (Korea Institute of Energy Research) 모델을

Table 1 Weighting factor for individual meteorological elements for each dataset

Meteorological elements	TMY case			
	Ref (%)	Ref_G (%)	Ref_D (%)	Sat (%)
Global horizontal irradiance	25	50	0	0
Direct normal irradiance	25	0	50	0
Satellite derived global horizontal irradiance	0	0	0	25
Satellite derived direct normal irradiance	0	0	0	25
Max. dry bulb temperature	5	5	5	5
Min. dry bulb temperature	5	5	5	5
Avg. dry bulb temperature	10	10	10	10
Max. dew point temperature	5	5	5	5
Min. dew point temperature	5	5	5	5
Avg. dew point temperature	10	10	10	10
Max. wind speed	5	5	5	5
Min. wind speed	5	5	5	5
Total	100	100	100	100

개발하였다. 이에 대한 성능은 Kim et al. (2017)⁹⁾이 관측 기반 일사량과 비교를 통해 검증하였는데, 2015년 기준 35개 기상관측소에서 관측된 시간 평균 일사량에 대한 rRMSE의 평균치는 11.8%였다⁹⁾. 본 연구에서는 TMY 데이터 생산을 위해 장기관측 데이터가 필요하기 때문에 2011년에 발사된 천리안 기상위성뿐만 아니라 그 이전에 기상청 현업으로 사용되었던 일본 MTSAT-2 위성을 사용하였다. Table 2에 천리안 기상위성과 MTSAT-2 위성에 대한 자세한 사양을 제시하였다. MTSAT-2 위성에서 수집된 영상은 가시 및 적외영상 모두 공간해상도가 4 km로 천리안 위성에서 수집된 가시영상의 공간해상도보다 좋지 않고, 시간해상도도 30분으로 1시간 평균 일사량을 계산할 때 정시 및 30분 데이터를 이용하게 된다. 따라서 시간해상도가 15분인 천리안 위성영상 기반 일사량에 비해 시간 평균 일사량에서 오차가 발생할 가능성이 크다. Fig. 1은 위성영상 기반 일사량에 대한 산출영역을 표현한 것으로 남북한을 모두 포함하고 있고, 동쪽으로는 독도까지 포함하고 있음을 알 수 있다.

Table 2 Specification of MTSAT-2 and Chollian satellites

Meteorological elements	MTSAT-2	Chollian
Number of sensors	5	5
Spatial resolution	4 km	1 km for visible channel 4 km for infrared channels
Temporal resolution	30 minute	15 minute
Center longitude	145°E	128.2°E
Investigation period	2007 ~ 2011	2012 ~ 2017

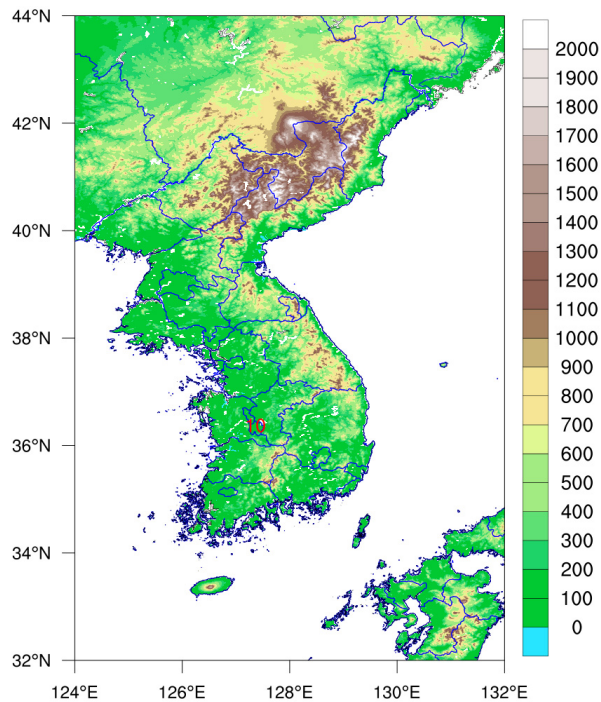


Fig. 1 Domain of satellite-based solar irradiance. 10 indicates the location of Daejeon ground observing station

(3) 연구자료 시간범위 설정

Lee et al. (2017)⁵⁾에서 TMY 데이터는 1991년부터 2010년까지 20년간 관측된 기상요소를 바탕으로 생산되었는데, 본 연구의 목표는 관측 기반 일사량과 위성영상 기반 일사량이 TMY 데이터 생산에 미치는 영향을 파악하는 것이므로 위성영상 기반 일사량과 관측 기반 일사량의 시간범위를 동일하게 맞추고자 한다. 즉 Table 2와 같이 2007년부터 2017년까지 위성영상 기반 일사량이 생산되었으므로 TMY 데이터 생산에 필요한 기상요소도 같은 기간에 관측된 데이터를 사용하였다.

2.2 연구방법

본 연구에서는 우선 기상요소의 가중치에 따른 TMY 데이터에 대한 민감도를 파악하기 위하여 Table 1에 제시된 것처럼 일사량 성분에 대해 가중치를 다르게 설정하였고, 다른 기상요소에 대해서는 가중치를 고정하였다. Ref 실험은 Lee et al. (2017)⁵⁾에서 사용된 가중치와 동일한 기준 실험에 해당하고, Ref_G 실험과 Ref_D 실험은 각각 수평면 전일사량과 법선면 직달일사량에 가중치를 50%로 적용한 실험이다. 즉, Ref_G 실험에서는 법선면 직달일사량이 TMY 데이터 생산에 사용되지 않는 반면 Ref_D 실험에서는 수평면 전일사량이 사용되지 않는다. Sat 실험은 관측 기반 수평면 전일사량 대신 위성영상 기반 수평면 전일사량을 사용한 실험인데, 법선면 직달일사량의 경우 UASIBS-KIER 모델을 통해 생산은 되지만 Ref 실험과의 일관성 유지를 위해 Reindl-2 모델 추정치를 사용하였다.

3. 결과

3.1 일사량에 대한 민감도에 따른 TMY 데이터의 변화

2007년부터 2011년까지 관측된 기상요소를 토대로 생산된 TMY 데이터 중 월별 일사량을 Fig. 2에 도시하였다. 월별로 평균된 시간 평균 수평면 전일사량 (Monthly Average of Hourly Mean Global Horizontal Irradiance)의 11년 (2007 ~ 2011) 평균치와 TMY 수평면 전일사량을 보면, 3월과 8월에 TMY 수평면 전일사량이 11년 평균치보다 높게 나타나고 있음을 제외하면 모든 자료가 거의 일치함을 알 수 있다. 한편, 일사량에 대한 민감도를 비교하기 위한 실험인 Ref, Ref_G 그리고 Ref_D 실험을 보면 TMY 수평면 전일사량이 모두 같다. 이것은 대표 기상월을 선정하는 데 일사량 성분에 대한 의존성 또는 그에 따른 민감도가 거의 없음을 내포한다.

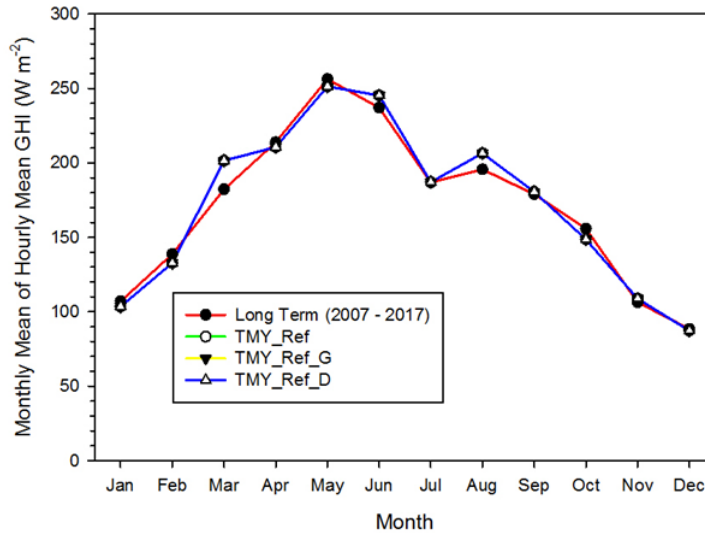


Fig. 2 11 years average of monthly mean of hourly global horizontal irradiance from in-situ observation (red line with closed circle), Ref (green line with open circle), Ref_G (yellow line with inverse triangle) and Ref_D (blue line with triangle)

식(1)은 수평면 전일사량, 법선면 직달일사량 그리고 수평면 산란일사량에 대한 관계를 나타낸 식으로 수평면 전일사량과 수평면 산란일사량이 서로 상관관계가 있으면, 법선면 직달일사량도 수평면 전일사량과 상관관계를 보이게 된다. Fig. 3은 Reindl-2 모델로 계산된 청천지수(k_t)와 수평면 산란일사비율(k_d)의 산포도인데, k_t 가 0.0에서 0.78사이에서 선형적으로 반비례한다. 따라서 이 구간에서 수평면 전일사량이 감소하면 법선면 직달일사량 역시 감소하므로 기상요소에 대한 가중치를 일사량 성분별로 다르게 설정하여도 대표 기상월을 선정하는데, 큰 차이를 보이지 않는다.

$$I_g = I_b \times \cos\theta + I_d \tag{1}$$

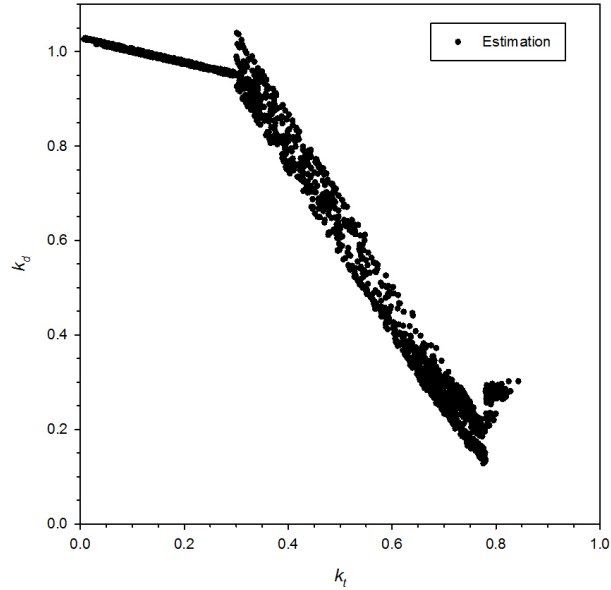


Fig. 3 Scatter plot of k_t and k_d from Reindl-2 model during the investigation period

3.2 위성영상 기반 일사량 활용 TMY 데이터

Sat 실험에서 생산된 TMY 수평면 전일사량을 Ref 실험과 비교하기 위한 산포도를 Fig. 4에 나타내었다. 결정계수인 γ^2 은 0.88로 높지만 선형회귀선의 기울기는 0.83이다. 이것은 Ref 실험의 수평면 전일사량이 높을 때 Sat 실험의 수평면 전일사량은 낮음을 의미한다. Ref 실험과 Sat 실험의 월평균 수평면 전일사량을 표시하면, 3

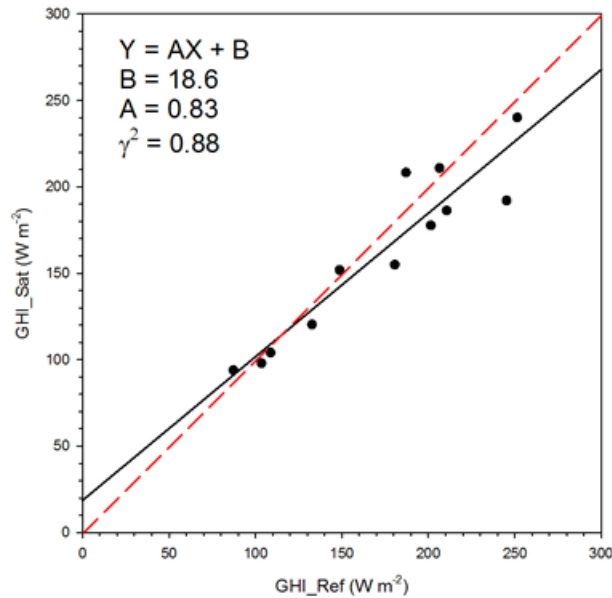


Fig. 4 Scatter plot of monthly mean of hourly global horizontal irradiance from Ref and Sat with regression coefficient, linear regression line (black solid line) and reference regression line (red dashed line)

월, 4월, 5월, 6월 그리고 9월의 Sat 실험의 월평균 수평면 전일사량이 낮았다(Fig. 5). 3월~5월까지 Sat 실험의 일사량이 낮은 것은, 일반적으로 이 시기에 황사 또는 미세먼지 유입이 많은데, UASIBS-KIER 모델에서 월 평균 에어로졸 광학깊이(AOD)가 이용되어 에어로졸의 일 변동성을 반영하지 못했기 때문으로 추정된다. Kim et al. (2017)⁹⁾은 월 평균 에어로졸 광학깊이를 사용하였을 때 에어로졸 광학깊이의 표준편차가 큰 경우에 오차가 큼을 보인 바 있다.

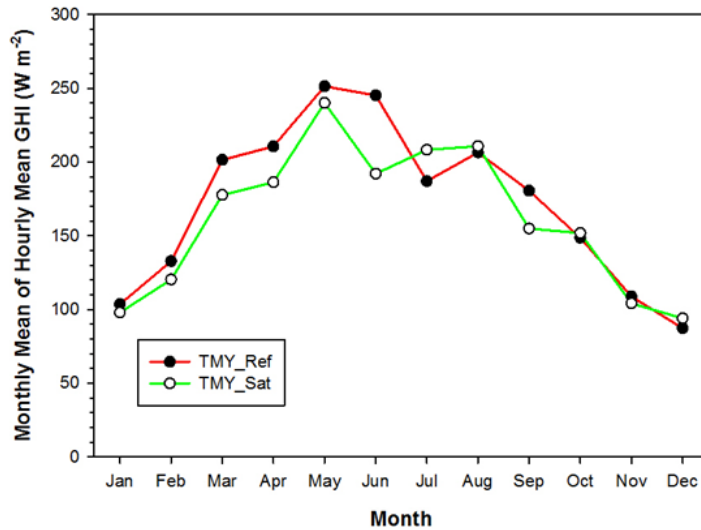


Fig. 5 Monthly mean of hourly global horizontal irradiance from Ref (red line with closed circle) and Sat (green line with open circle)

4. 토의

Sat 실험과 Ref 실험에서 수평면 전일사량의 차이는 UASIBS-KIER 모델이 수평면 전일사량을 산정할 때 발생하는 오차 때문이다. 대전 지역에서 관측된 시간 평균 수평면 전일사량에 대한 UASIBS-KIER 모델의 연평균 rMBE와 rRMSE를 2007년부터 2017년까지 Fig. 6에 나타내었다. 2007년부터 2011년까지 rMBE는 양의 값을 나타내어 수평면 전일사량의 관측치보다 위성영상 기반 수평면 전일사량이 더 크다. 그리고 rRMSE는 2007년부터 2011년까지 점진적으로 증가하고 있다. 이것은 MTSAT-2 위성에 탑재된 관측 센서의 노후화에 따른 것으로 판단된다. 하지만 2012년 천리안 기상위성이 본격적으로 현업에 사용되면서 rRMSE는 12%로 낮아진다. 2007년부터 2011년까지 rRMSE의 평균치는 14.8%인데 반해 2012년부터 2017년까지 rRMSE의 평균치는 12.1%로 낮고, rMBE도 음의 값을 보여 천리안 위성영상 기반 일사량이 관측치에 비해 과소예측 됨을 알 수 있다. Kim et al.(2016)¹⁰⁾은 위성영상 기반 일사량에 내재된 오차를 태양천정각에 대한 함수로 정의하여 보정한 바 있어, 위와 같은 오차는 후처리 과정을 통해 보정될 수 있으므로 위성영상 기반 일사량을 활용한 TMY 데이터의 품질은 보다 고도화 될 것으로 기대된다.

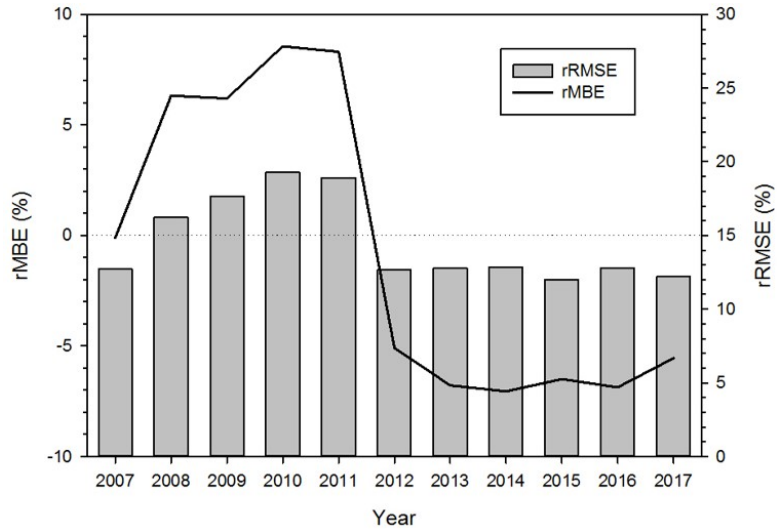


Fig. 6 Annual average value of rMBE (solid line) and rRMSE (vertical bar) from 2007 to 2017

5. 결론

본 연구에서는 TMY 생산에 필요한 기상요소 중 일사량 성분에 대한 기준치의 민감도를 분석하였는데, 일사량 성분에 상관없이 TMY 데이터는 같았다. 이것은 대표 기상월을 선정하는데 일사량 성분에 대한 민감도가 없음을 의미하는데, 수평면 전일사량과 법선면 직달일사량이 서로 비례하는 경향이 나타나기 때문으로 사료된다.

또한 대전 지역에 대해서 위성영상 기반 일사량을 사용하여 TMY 데이터를 생산하였고, 이것을 같은 지역에서 같은 기간에 대해 관측 기반 일사량을 사용하여 생산된 TMY 데이터와 비교를 하였다. 위성영상 기반 일사량을 사용한 경우 TMY 수평면 전일사량이 관측 기반 일사량을 사용한 경우보다 낮았는데, 이것은 천리안 기상위성을 사용하였을 때 수평면 전일사량이 관측치에 비해 낮게 예측되기 때문이다. 반면 2007년부터 2011년까지는 천리안 기상위성 대신 MTSAT-2 위성을 사용하였는데, 이 경우 오히려 관측 기반 일사량에 비해 수평면 전일사량이 높게 예측되었고, rRMSE도 14.8%로 천리안 기상위성을 사용한 경우보다 높았다. 따라서 천리안 기상위성의 rRMSE가 낮으므로 과소예측하는 경향을 보정하기 위한 후처리 과정을 개발하여 적용하면 보다 나은 TMY 데이터가 얻어질 것으로 사료된다.

후기

본 연구는 한국에너지기술연구원 주요사업(B8-2424-02)으로 수행한 결과입니다.

REFERENCES

1. Wilcox, S., and Marion, W., Users manual for TMY3 data sets, NREL/TP-581-43156, NREL, Golden, CO, USA., 2008.

2. National Center for Standard Reference Data, <https://www.srd.re.kr:446/db/dbList.do?selectedId=S06001003>
3. The Korean Solar Energy Society, http://www.kses.re.kr/data_06/list_hi.php
4. Jee, J.-B., Lee, S.-W., Choi, Y.-J., and Lee, K.-T., The Generation of Typical Meteorological Year for Research of the Solar Energy on the Korean Peninsula, *New and Renewable Energy*, Vol. 8, No. 2, pp. 14-23, 2012.
5. Lee, H.-J., Kim S.-Y., and Yun C.-Y., Generation of Typical Meteorological Year Data Suitable for Solar Energy Systems and Analysis of Solar Irradiance Data, *New and Renewable Energy*, Vol. 13, No. 3, pp. 24-33, 2017.
6. Finkelstein, J. M., and Schafer, R. E., Improved goodness-of-fit tests, *Biometrika*, Vol. 58, pp. 641-645, 1971.
7. Kim, C. K., Holmgren, W. F., Stovern, M., and Betterton E. A., Toward Improved Solar Irradiance Forecasts: Derivation of Downwelling Surface Shortwave Radiation in Arizona from Satellite, *Pure Appl. Geophys.*, Vol. 173, pp. 2535-2553, 2016a.
8. Kim, C. K., Holmgren, W. F., Stovern, M., and Betterton E. A., Toward Improved Solar Irradiance Forecasts: Comparison of Downwelling Surface Shortwave Radiation in Arizona from Satellite, *Pure Appl. Geophys.*, Vol. 173, pp. 2929-2943, 2016b.
9. Kim, C. K., Kim, H.-G., Kang, Y.-H., and Yun, C.-Y., Toward Improved Solar Irradiance Forecasts: Comparison of the Global Horizontal Irradiances Derived from the COMS Satellite Imagery Over the Korean Peninsula, *Pure Appl. Geophys.*, Vol. 174, pp. 2773-2792, 2017.
10. Kim, C. K., Kim, H.-G., Kang, Y.-H., Yun, C.-Y., and Lee, S.-N., Evaluation of Global Horizontal Irradiance Derived From CLAVR-x Model and COMS Imagery Over the Korean Peninsula, *New and Renewable Energy*, Vol. 12, pp. 13-20, 2016.