

기상청 천리안 위성 자료를 활용한 태양광 기상자원 특성 및 오차 분석

이수향 · 김연희*

국립기상과학원 응용기상연구과

(접수일: 2019년 12월 10일, 수정일: 2020년 2월 27일, 게재확정일: 2020년 2월 27일)

Characteristics and Error Analysis of Solar Resources Derived from COMS Satellite

Su-Hyang Lee and Yeon-Hee Kim*

Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

(Manuscript received 10 December 2019; revised 27 February 2020; accepted 27 February 2020)

Abstract The characteristics of solar resources in South Korea were analyzed by comparing the solar irradiance derived from COMS (Communication, Ocean and Meteorological Satellite) with in-situ ground observation data (Pyranometer). Satellite-derived solar irradiance and in-situ observation showed general coincidence with correlation coefficient higher than 0.9, but the satellite observations tended to overestimate the radiation amount compared to the ground observations. Analysis of hourly and monthly irradiance showed that relatively large discrepancies between the satellite and ground observations exist after sunrise and during July~August period which were mainly attributed to uncertainties in the satellite retrieval such as large atmospheric optical thickness and cloud amount. But differences between the two observations did not show distinct diurnal or seasonal cycles. Analysis of regional characteristics of solar irradiance showed that differences between satellite and in-situ observations are relatively large in metrocity such as Seoul and coastal regions due to air pollution and sea salt aerosols which act to increase the uncertainty in the satellite retrieval. It was concluded that the satellite irradiance data can be used for assessment and prediction of solar energy resources overcoming the limitation of ground observations, although it still has various sources of uncertainty.

Key words: Satellite, solar irradiance, pyranometer, cloud amount, solar energy

1. 서 론

지구-대기 시스템 에너지 순환의 중요한 역할을 하는 태양 복사는 신·재생에너지의 필수 요소 중 하나로 이를 이용한 태양광 발전은 높은 성장률을 보이고 있다. 태양 복사의 시·공간 변화는 에너지 생산 예측 및 발전 시스템의 계획과 운영에 중요한 정보이다. 태양광 에너지의 시·공간적 분포 특성을 보다 정확히 파

악하는 것은 태양광 발전량 산출의 불확실성을 줄이고 발전 지역의 잠재성 평가 등을 통하여 태양광 기상자원을 효율적으로 이용하기 위한 필수 조건이라 할 수 있다. 에너지 선진국에서는 지상 관측뿐만 아니라 광범위한 공간의 자료 확보가 가능한 위성이나 수치모델 자료를 이용하여 태양광 기상자원을 추정하고 예측하는데 많은 노력을 기울여왔다. 특히 관측 범위가 매우 넓고, 고품질의 자료가 지속적으로 수집되는 위성 이미지 기반의 지표 일사량 추정 방법이 보편적으로 사용되고 있다. Kawamura et al. (1998)은 GMS5 (Geostationary Meteorological Satellite 5)에서 제공하는 가시 및 적외 영상을 사용하여 서태평양 해안의 일사량을 추정하였고, 시간과 일 단위 일사량의

*Corresponding Author: Yeon-Hee Kim, Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, 33, Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju-do 63568, Korea.
Phone: +82-64-780-6784, Fax: +82-64-738-6515
E-mail: yeonheekim@korea.kr

관측 대비 상대오차가 약 17%와 8.13% 임을 보였다. Otkin et al. (2005)은 GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) 위성 영상에서 산출되는 일사량을 미국 내 11개 지점에 설치된 일사계 관측 자료와 비교하여 계절과 지형 조건에 따른 일사량 추정 정확도를 파악하였으며, 위성에서 산출되는 일사량이 저지대(고지대)에서는 일사계 관측에 비하여 과대(과소) 추정됨을 보였다. Cristobal and Anderson (2013)은 MSG (Meteosat Second Generation) 위성 자료로부터 산출된 이베리아 반도 북동쪽의 지표 복사량을 지형에 따라 평평한 지역과 산악지역으로 분류하고, 대기 상태에 따라 맑은 경우와 흐린 경우로 분류하여 검증을 수행하였다. MSG 위성 자료는 대부분 유럽과 북아프리카의 여러 관측소에 대해서 검증이 이루어졌기 때문에 Thomas et al. (2016)은 지리적, 기후적 영향을 살펴보기 위해 대상지역을 브라질로 확장하여 지표 복사량 검증을 수행하였다. 또 Osinowo et al. (2015)은 위성 자료로 산출된 장기간 태양복사량의 빈도 분포와 오차, 변동 계수를 분석하였는데, 기후 특성에 따라 5개 지역으로 분류하여 태양복사량의 변동성을 파악하였다. Nottrott and Kleissi (2010)는 NSRDB-SUNY (National Solar Radiation Database-State University of New York)의 수평면 전일사량 자료를 이용하여 지점별 오차를 파악하고 월별, 시간별 오차와 운량 분포와의 비교를 통해 구름의 영향을 확인하였다. 또 통계적 후처리를 이용한 보정 알고리즘을 개발하고 적용하였다. 태양 복사량의 정확한 추정뿐만 아니라 태양광 발전 시스템의 효율적인 계획 및 운용을 위해서는 태양광 자원의 정확한 예측이 중요하다. Lorenz et al. (2004)은 두 개의 연속적인 위성 이미지로 구름운동 벡터를 산출하고 이를 이용하여 복사량을 예측하고 그 오차를 분석하였다. Perez et al. (2010)은 단기 예보(6시간 이내)에는 정지궤도 위성 기반의 구름운동 벡터가, 중기 예보(6일 이내)에는 수치예보모델인 US NDFD (United States National Digital Forecast Database)를 이용한 복사량 예측 방법의 성능이 우수함을 보였다. 최근에는 지상관측, 위성, 모델에서 산출되는 자료를 기반으로 인공지능 기법을 이용한 태양광 예측 연구도 활발히 진행되고 있다(Mazorra Aguiar et al., 2016).

국내에서도 신·재생에너지 발전과 동반하여 태양 복사량 관련 연구가 증가하는 추세에 있다. Jee et al. (2010)은 일사 관측 자료를 이용하여 남한의 태양복사량의 시·공간 분포를 분석하였다. 기상청에서 운용 중인 22개 관측소의 전천 일사 자료를 이용하였고, 분석에 앞서 자동 관측으로 인해 지속적인 품질관리가 이루어지지 않아 자료의 정확도가 낮아지는 것을 고려하여 비교 관측과 복사 모델을 이용한 관측 자료 보정을 수행하였다. Yeom et al. (2012)은 MTSAT-1R (Multi-

function Transport Satellite-1 Replacement) 자료에 한반도에 최적화된 새로운 구름 감쇠 계수 산출 방법을 적용하여 일사량을 추정하였다. 구름 감쇠 계수 계산 시, 알베도와 휘도 온도 특성을 이용한 기존 Kawamura 방법을 사용하는 것보다 알베도와 태양천정각을 이용한 일사량 추정의 정확도가 높음을 보였다(Kawai and Kawamura, 2005). 기상청의 천리안 위성(Communication Ocean and Meteorological Satellite, 이하 COMS)에서도 알베도와 천정각을 이용하여 한반도에 최적화된 구름 감쇠 계수를 적용한 일사량이 산출되고 있다. Baek et al. (2013)은 2011년 4월부터 10월까지 플렉스 타워와 COMS에서 관측된 일사량 자료를 비교, 검증하였다. 표면도달일사량(Insolation, 이하 INS) 산출에 기존 Kawamura 물리 모델식(Kawamura et al., 1998)이 사용되었고, INS가 지상관측 복사량과 경향성은 비슷하지만 과소모의하는 결과를 보였다. Kim et al. (2016)은 2개월의 대상기간 동안 COMS에서 산출되는 INS와 CLAVR-x (The Clouds from AVHRR Extended System) 모델에서 산출되는 태양복사량을 4개 지점의 지상 관측값과 비교하여 맑은 날과 흐린 날에 대해 검증하였다. 이 연구에서 맑은 경우에는 CLAVR-x 모델 산출물의 정확도가 높고, 흐린 경우에는 COMS 기반 INS의 정확도가 높게 나타났지만, 분석 기간이 짧았고 검증 대상 지점이 적어 통계분석의 신뢰도에 한계가 있었다.

태양으로부터의 복사에너지는 구름은 물론 대기 내에 존재하는 다양한 부유입자와의 상호작용에 의해 산란되거나 흡수된다. 특히 가변성을 가진 구름은 산란, 반사, 흡수 과정을 통해 태양에서 방출되어 지표면에 도달하는 복사에너지를 감소시키기 때문에 태양광 발전에 큰 영향을 미칠 수 있다. COMS로부터 산출되는 INS는 구름의 알베도, 태양천정각에 따른 구름 투과 길이, 그리고 운정 온도 등과 같은 구름 특성을 분석하여 그에 따른 감쇠 효과를 적용하여 계산된다. 그리고 시·공간적으로 고해상도의 자료를 제공하므로 일사량의 실측이 가지는 관측 공백과 자료 품질의 한계를 해결할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 고품질의 태양광 기상자원 정보 제공을 위하여 COMS 자료를 이용하여 산출된 INS 정보의 정확도를 실측과 비교하여 그 효용성에 대해 조사해 보았다. 태양광 기상자원은 수증기량, 부유 입자, 구름 등의 영향을 받아 시간과 계절에 의존적이기 때문에 장기간 자료에 대한 분석이 필요하여, 2016년 8월부터 2018년 7월까지의 2년 동안 COMS에서 산출되는 INS를 기상청에서 운용 중인 24개 지점의 일사 관측 자료와 비교하여 남한 지역의 태양광 기상자원 특성 및 오차 분석을 수행하였다. 2장에서는 사용된 자료 및 분석 방법을 서술하고, 3장에서는 일일적 태양복사량을 이용한 위성과 지

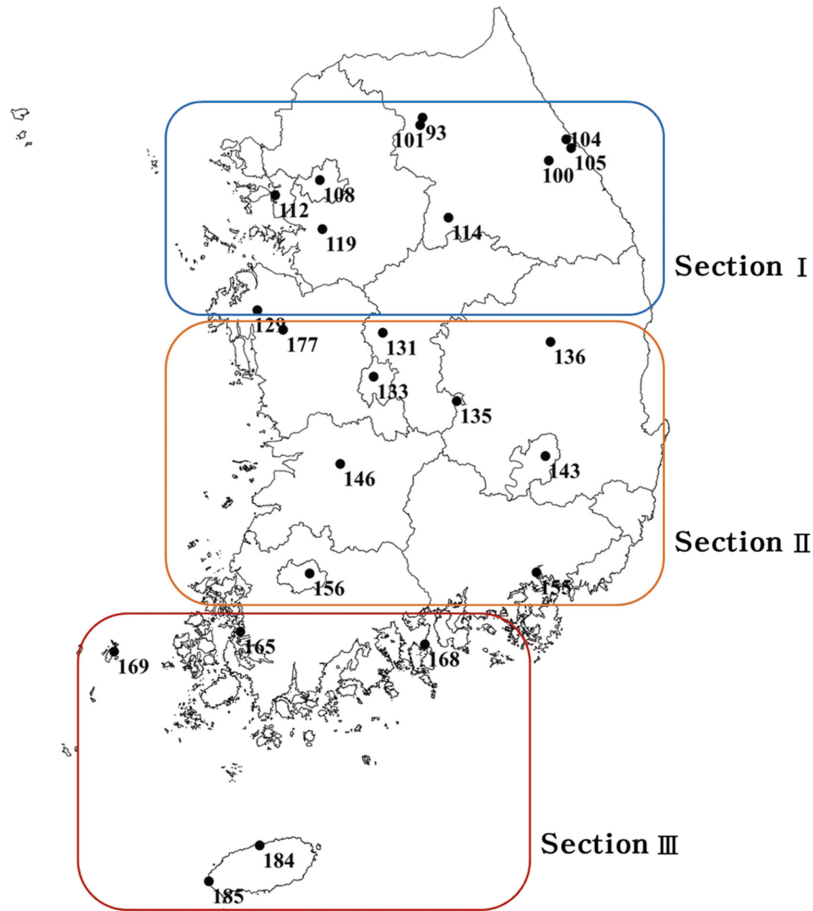


Fig. 1. Distribution of the 24 solar monitoring stations and their classification according to latitude. Section I, II and III include 10 (Bukchuncheon (93), Chuncheon (101), Bukgangneung (104), Gangneung (105), Daegwallyeong (100), Seoul (108), Incheon (112), Wonju (114), Suwon (119), and Seosan (129)), 9 (Hongseong (177), Cheongju (131), Daejeon (133), Chupungnyeong (135), Andong (136), Daegu (143), Jeonju (146), Gwangju (156), and Changwon (155)) and 5 (Mokpo (165), Yeosu (168), Heuksando (169), Jeju (181), and Gosan (185)) stations, respectively.

상관측 기반의 지점별 평균 복사량과 빈도 분포를 비교하였다. 또, 시간단위 태양복사량을 이용한 월별 평균 복사량과 오차의 변동성을 분석하고, 운량에 따른 위성에서 산출되는 일사량의 정확도를 평가하였다. 4 장에서는 본 연구 결과들의 요약 및 결론을 서술하였다.

2. 자료 및 분석 방법

2.1 위성 자료

본 연구에서는 2016년 8월부터 2018년 7월까지 COMS에서 산출된 INS 자료를 사용하였다. INS는 가시 및 적외 영상 이미지를 활용한 일련의 대기 모수화 과정을 거쳐서 생산되고, 15분의 시간 해상도와 4 km의 공간 해상도를 가진다. 즉 오존이나 수증기 등

에 의한 레일리 산란(Rayleigh scattering)과 에어로졸에 의한 미 산란(Mie scattering)을 고려하여 투과율이 계산되고, 각 격자의 구름 유무를 판단하여 구름이 있는 경우에는 구름에 의한 감쇠 계수가 적용된 후 최종적인 일사량 값이 산출된다(KMA/NMSC, 2012). 기존에는 구름 알베도와 휘도 온도 특성을 이용하여 구름 감쇠율을 계산하는 Kawamura LUT (Look Up Table)이 사용되었으나 Yeom et al. (2012)이 한반도에 최적화된 반사도와 태양천정각에 따른 LUT을 산출함에 따라 2013년부터 새로운 LUT을 적용한 INS가 생산되고 있다.

2.2 지상 관측 자료

전천일사계(Pyranometer)는 직달과 산란일사량이 합

Table 1. Location and elevation of meteorological stations.

Station number	Station name	Longitude (°E)	Latitude (°N)	Elevation (m)
93	Bukchuncheon	127.75	37.95	95.61
100	Daegwallyeong	128.72	37.68	772.57
101	Chuncheon	127.74	37.90	76.47
104	Bukgangneung	128.86	37.80	78.90
105	Gangneung	128.89	37.75	26.04
108	Seoul	126.97	37.57	85.67
112	Incheon	126.62	37.48	68.99
114	Wonju	127.95	37.34	148.60
119	Suwon	126.99	37.27	34.84
129	Seosan	126.49	36.78	28.91
131	Cheongju	127.44	36.64	58.70
133	Daejeon	127.37	36.37	68.94
135	Chupungnyeong	127.99	36.22	243.70
136	Andong	128.71	36.57	140.10
143	Daegu	128.65	35.88	53.50
146	Jeonju	127.12	35.84	61.40
155	Changwon	128.57	35.17	37.60
156	Gwangju	126.89	35.17	72.38
165	Mokpo	126.38	34.82	38.00
168	Yeosu	127.74	34.74	64.64
169	Heuksando	125.45	34.69	76.49
177	Hongseong	126.69	36.66	25.60
184	Jeju	126.53	33.51	20.45
185	Gosan	126.16	33.29	71.47

해진 전천일사량(Global Horizontal Irradiance, 이하 GHI)을 1초에 1회씩 관측하여 60회 평균 일사량을 1분 단위로 저장한다. 기상청은 전국에 43개의 전천일사계를 운영하고 있으며, 각 기준 시각 이전 1시간 자료를 평균한 정시 대푯값과 일 누적 일사량을 제공한다. 전천일사계는 기기 자체의 민감도와 온도 임계치, 스펙트럼 효과, 지형, 관측 환경 등에 의해 영향을 받기 때문에 장비의 적절한 관리가 중요하다(Gueymard and Myers, 2008). 하지만 기상대의 무인화 및 자동화로 관측 장비의 검·보정, 정도 검사 등의 유지보수가 원활하게 이루어지지 않은 곳이 생김에 따라 본 연구에서는 2016년 8월부터 2018년 7월까지 지점별 자료 수집율이 40% 이상인 24개 지점의 일사 관측 자료를 사용하였다(Fig. 1; Table 1).

2.3 방법 및 검증지수

위성과 지상 관측으로부터 산출되는 복사량의 시·공간 해상도가 다르기 때문에 이로 인한 오차를 최소화하기 위하여 다음과 같은 시·공간 일치 방법을 사용하였다. 시간 일치를 위하여 15분 단위의 INS를 시간 평균한 자료로 변환하여 1시간 단위의 GHI와 비교하였다. 즉, 기준 시각 이전 1시간 이내의 자료(00

분, 15분 전, 30분 전, 45분 전 자료)를 평균하여 생산한 시간 단위의 INS와 GHI를 비교함으로써 시간 해상도 차이로 인한 오차를 줄였다. 공간 일치를 위해서는 다양한 방법이 사용되고 있다. Oktin et al. (2005)은 지상관측 일사계의 값이 위성보다 훨씬 더 넓은 지역의 일사값을 대표하는 전천일사량임을 고려하여 다중 화소의 단순 평균값을 사용하였고, Nottrott and Kleissi (2010)는 관측소 주변 4개 INS 값들의 거리 가중치 평균법을 사용하였다. Cristobal and Anderson (2013)은 지역적 효과를 확인하기 위해서 최근거리의 INS 값을 이용하는 단일 화소 비교방법으로 공간 일치를 하였다. 본 연구에서도 지상관측 지점을 기준으로 최근거리 위성 좌표의 INS를 사용하는 단일 화소로 복사량 비교, 검정을 수행하였다.

일출과 일몰 시각에는 계절별로 시간별 자료 수집율이 상이하고, GHI와 INS의 상관계수가 0.5 이하로 낮았다. 각 시간별 자료 수집율이 50% 미만인 경우는 수집된 자료가 그 시간의 특성을 대표하기 어렵다고 판단하여 분석에서 제외하였다.

태양복사량은 태양 고도각, 지형, 강수, 구름, 에어로졸 등 다양한 인자의 영향으로 변하며, 맑은 날에는 태양 고도각, 흐린 날에는 구름의 영향이 가장 크

Table 2. Daily total solar irradiance calculated from GHI and INS at each ground observation station, and its categorical frequency.

Station number	Mean irradiance [MJ m ⁻²]		Frequency [%]					
	Total		Low (< 10 MJ m ⁻²)		Intermediate (10~20 MJ m ⁻²)		High (> 20 MJ m ⁻²)	
	GHI	INS	GHI	INS	GHI	INS	GHI	INS
93	14.01	14.45	30.21	32.48	48.04	42.60	21.75	24.92
101	13.59	14.78	33.47	29.61	44.90	44.77	21.63	25.62
104	13.54	14.37	37.90	32.92	38.04	41.36	24.07	25.73
105	14.81	14.35	28.93	33.06	43.11	41.05	27.96	25.90
100	14.12	14.06	31.27	35.40	44.08	39.81	24.66	24.79
108	12.84	14.76	42.21	28.28	38.62	47.59	19.17	24.14
112	12.54	15.51	44.49	26.86	37.05	43.80	18.46	29.34
114	14.29	14.64	30.14	28.61	45.28	45.83	24.58	25.56
119	12.45	15.01	41.32	28.10	43.11	45.32	15.56	26.58
129	12.33	15.39	41.05	27.82	45.18	42.84	13.77	29.34
177	14.56	14.98	29.32	27.94	45.23	45.64	25.45	26.42
131	14.01	14.95	32.55	28.97	44.14	43.59	23.31	27.45
136	15.06	15.08	28.14	25.79	44.14	46.62	27.72	27.59
133	15.63	15.00	29.75	26.58	37.47	47.38	32.78	26.03
135	14.55	14.70	29.48	29.34	43.53	45.59	27.00	25.07
143	14.64	15.09	27.96	25.76	46.28	46.83	25.76	27.41
146	15.24	14.77	27.69	27.69	43.39	47.11	28.93	25.21
156	15.21	14.65	26.10	27.21	44.89	48.20	29.01	24.59
155	16.04	15.31	21.63	22.73	45.18	48.62	33.20	28.65
165	12.86	15.26	40.50	28.37	42.15	41.32	17.36	30.30
168	12.30	15.47	42.43	24.74	41.83	46.18	15.74	29.09
169	14.13	14.83	35.12	33.06	40.22	38.57	24.66	28.37
184	13.91	14.69	37.33	34.99	33.75	35.67	28.93	29.34
185	10.86	14.92	50.55	34.99	39.94	34.57	9.50	30.44
Avg.	13.90	14.88	34.15	29.22	42.48	43.79	23.37	26.99

다. 지상 일사 관측과 전운량 관측이 동시에 수행되는 16개 지점 중 2016년 8월부터 2018년 7월까지 운량 자료의 수집율이 90% 이상인 14개 지점(북강릉, 서울, 인천, 수원, 청주, 대전, 안동, 대구, 전주, 창원, 광주, 목포, 흑산도, 제주)의 전운량 자료를 사용하여 운량에 따른 INS의 정확도를 아래의 식(1)~(7)을 이용하여 분석하였다.

상관계수(correlation coefficient, R)는 식(1)과 같고 GHI에 대한 INS의 상관관계의 정도를 나타낸다. RMSE (Root Mean Square Error)는 식(2)로 계산되며, 추정값과 관측값의 차이를 측정하는데 사용된다. MBE (Mean Bias Error)는 평균 오차의 크기[식(3)], MAE (Mean Absolute Error)는 추정값과 관측값 차이의 절댓값[식(4)]을 의미한다. rRMSE, rMBE, rMAE는 관측 평균값에 대한 오차의 크기를 백분율로 나타낸 것

이며 각각 식(5), (6), (7)과 같다.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (2)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i) \quad (3)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |S_i - O_i| \quad (4)$$

$$rRMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(S_i - O_i)^2}{\bar{O}}} \times 100 \quad (5)$$

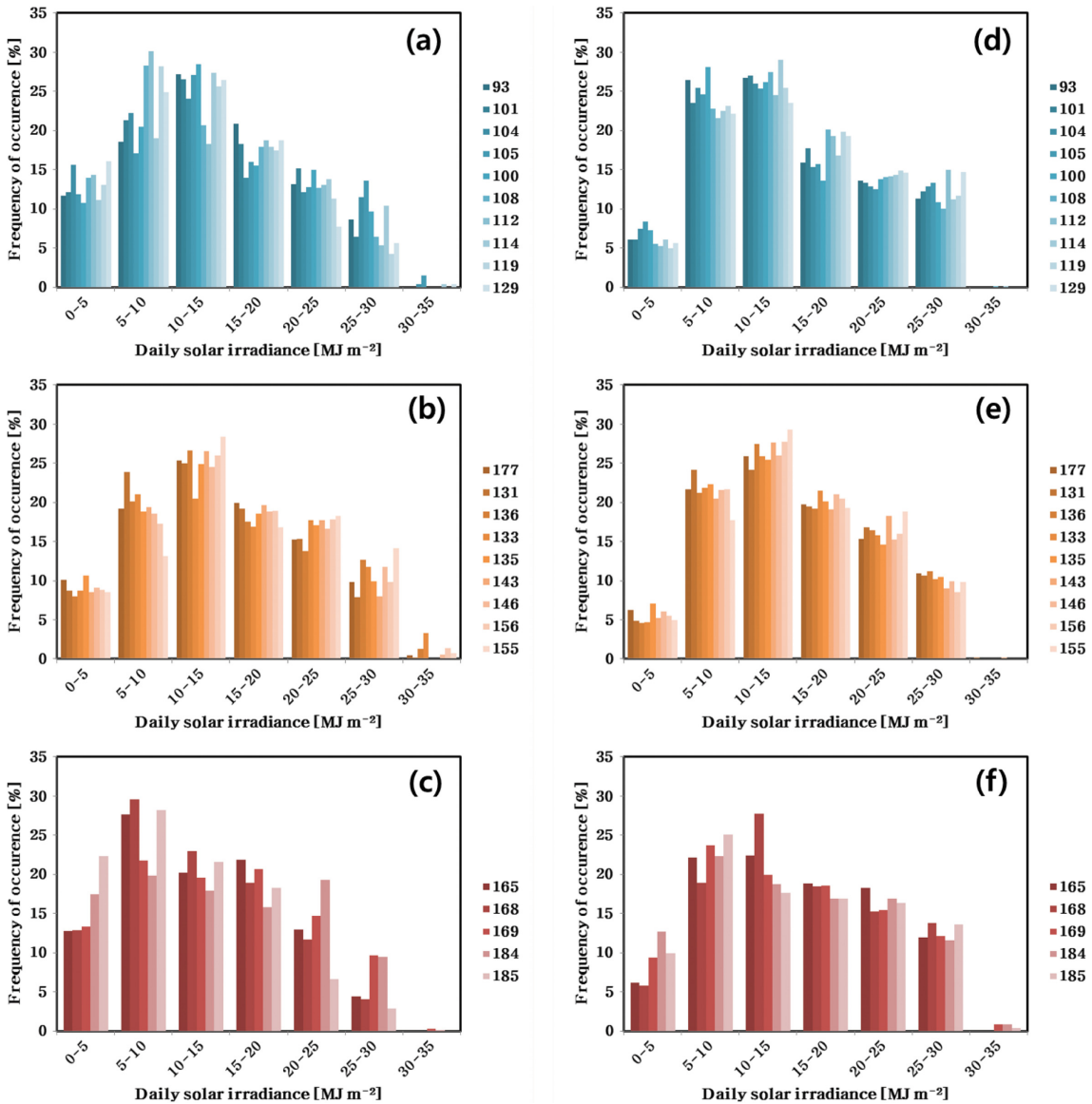


Fig. 2. Frequency distributions of the daily solar irradiance over the 3 latitude sections derived from GHI (left) and INS (right). Upper, middle and bottom panels indicate latitude section I, II and III, respectively.

$$rMBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(S_i - O_i)}{\bar{O}} \times 100 \quad (6)$$

$$rMAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|S_i - O_i|}{\bar{O}} \times 100 \quad (7)$$

여기서, S_i 는 INS, O_i 는 GHI를 나타내고, n 은 자료의 수, \bar{O} 는 GHI의 평균이다. 여름에는 복사량 자체가 크기 때문에 RMSE가 크고, 겨울에는 작다. 하지만 평균 관측값에 대한 상대 오차는 오히려 여름이 더 작

다. 즉, 계절과 시각에 따라 태양복사량의 절대적 크기가 다르기 때문에 본 연구에서는 상대적인 평가가 용이한 rRMSE와 rMAE, rMBE를 위주로 분석을 수행하였다.

3. 결 과

3.1 일누적 태양광 기상자원의 분포 특성

지점별 일누적 GHI와 INS의 평균값과 복사량의 구

간별 빈도 분포를 Table 2에 나타내었다. 전체 지점의 일일적 GHI 평균은 13.90 MJ m^{-2} 이고, 일일적 INS의 평균은 14.88 MJ m^{-2} 로 위성이 전천 일사계 관측에 비하여 복사량을 과대추정한다. 그 중에서도 서울(108), 인천(112), 수원(119), 서산(129), 목포(165), 여수(168), 고산(185)은 일일적 복사량의 차이가 2 MJ m^{-2} 이상 크게 나타났다. Ayash et al. (2008)의 연구에서는 해염 입자가 직접적으로 입사 태양 복사를 산란시키고, 간접적으로 구름 응결핵의 역할을 함으로써 대기 복사 균형에 영향을 미치는 것을 CAM (Canadian Aerosol Module)을 이용하여 정량적으로 조사하였고, 해염의 농도가 최대인 남극해에서 다른 지역 대비 복사량이 크게 감소하는 것을 보였다. Foltescu et al. (2005)은 모델을 이용하여 북유럽에서 지역 규모의 해염 농도를 모의하여 해안에서 육지 쪽으로 해염의 농도가 큰 구배를 보임을 확인하였으며, 이는 내륙 대비 해안 지역에서 해염의 영향을 추측할 수 있게 한다. 본 연구에서도 내륙지역에 비해 해안가에 위치한 지점에서 두 관측 간의 차이가 크게 나타나는데, 특히 한반도 서쪽에 위치한 지역에서 차이가 커 편서풍에 의해 유입된 해염 입자 등에 의한 영향으로 사료된다. 또 대기오염 물질이 많이 배출되는 서울, 인천, 수원과 같은 대도시에서는 대기 중에 존재하는 에어로졸이 두 관측 간의 차이에 기인한 것으로 보인다.

낮은 태양 복사량(10 MJ m^{-2} 이하)에서는 GHI의 빈도가, 20 MJ m^{-2} 이상에서는 INS의 빈도가 더 높다. 태양 복사량의 월별 변동성은 태양 입사각과 일조 시간에 의해 결정되기 때문에 태양 복사량 분포는 위도에 따라 달라진다(Pidwirny, 2006). 평균 일일적 GHI가 북춘천(93)에서 서산(129)까지는 14.01 MJ m^{-2} 에서 12.33 MJ m^{-2} 로 차이는 있지만 위도가 낮아질수록 복사량이 작아지는 반면, 홍성(177)부터 창원(155)까지는 14.56 MJ m^{-2} 에서 16.04 MJ m^{-2} 로 GHI가 증가한다. 저위도 지역인 목포(165)부터 고산(185) 지점은 GHI가 12.86 MJ m^{-2} 에서 10.86 MJ m^{-2} 로 다른 지점에 비해 낮다.

강원도와 수도권 지역을 포함한 10개 지점(북춘천, 춘천, 북강릉, 강릉, 대관령, 서울, 인천, 원주, 수원, 서산)을 영역 I, 중부·남부 일부 지역을 포함한 9개 지점(홍성, 청주, 안동, 대전, 추풍령, 대구, 전주, 광주, 창원)을 영역 II, 남해안과 제주도를 포함한 5개 지점(목포, 여수, 흑산도, 제주, 고산)을 영역 III으로 분류하였다. Figure 2는 5 MJ m^{-2} 간격으로 일일적 태양 복사량의 빈도를 영역별로 나타낸 것이다. Figures 2a-c는 일일적 GHI, Figs. 2d-f는 일일적 INS의 영역 I, 영역 II, 영역 III에 대한 복사량의 빈도이다. 영역 I과 영역 II는 $10\sim 15 \text{ MJ m}^{-2}$ 범위, 영역 III은 $5\sim 10 \text{ MJ m}^{-2}$ 범위에 최대 빈도가 나타난다. $0\sim 5 \text{ MJ m}^{-2}$ 범위는 앞

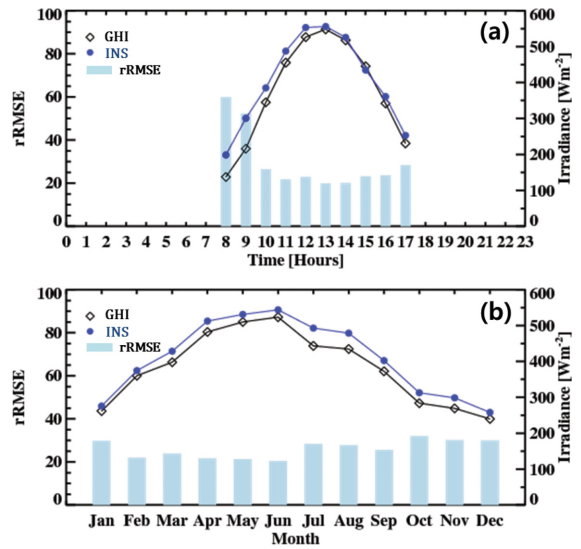


Fig. 3. (a) Hourly and (b) monthly variation of mean solar irradiance and rRMSE. Black line and blue line indicate mean GHI and INS, and the bar means rRMSE.

서 Table 2의 결과와 유사하게 GHI에 비해 INS의 빈도가 낮게 나타나고, $25\sim 30 \text{ MJ m}^{-2}$ 범위에서는 그 빈도가 높게 나타나는 경향이 있다. 특히 저위도인 영역 III에서 이러한 현상이 가장 강하게 나타난다. 영역 I, 영역 II의 $30\sim 35 \text{ MJ m}^{-2}$ 범위에서는 GHI의 빈도가 소량 존재하지만 INS의 빈도는 거의 없다. 영역 III에서 INS의 빈도가 GHI 대비 더 높게 나타났으나 이는 적은 관측 지점의 한계로 판단된다. 2년 간 관측된 전 지점에서의 INS와 GHI의 산포도를 분석한 결과, $900\sim 1000 \text{ W m}^{-2}$ 범위의 INS의 수가 GHI의 수보다 현저히 적음을 확인할 수 있었다. 즉, 위성에서 산출되는 INS는 순간 복사량이 1000 W m^{-2} 의 한계 값을 가지지만 지상관측 기기는 이보다 더 높은 범위의 복사량 탐지가 가능하기 때문에 $30\sim 35 \text{ MJ m}^{-2}$ 범위에서는 지상관측의 민감도가 더 좋은 것으로 판단된다.

3.2 시간단위 태양광 기상자원의 분포 및 오차

3.2.1 평균 일사량 분포 및 오차 변동성

Figure 3은 전 지점 평균 복사량과 오차의 시간 및 월별 변동성이다. 태양 복사량은 일출 시간을 기점으로 증가하다가 태양천정각이 최소인 1200~1300 LST에 최대값을 나타낸 후 다시 감소한다. 맑은 날의 경우 일출, 일몰 시간대는 대기 광학 두께가 두껍기 때문에 오차가 크고, 태양이 남중하는 시간대는 대기 광학 두께가 가장 얇기 때문에 오차가 가장 작다. 복사량의 일변동에 따른 rRMSE는 0800 LST에 59% ($\text{RMSE} = 82.23 \text{ W m}^{-2}$)로 최대이며, 태양이 남중하는 시각 직

Table 3. Annual and seasonal mean hourly solar irradiance, error, and accuracy statistics between the GHI and INS averaged over 24 ground observation stations.

	Mean irradiance [W m ⁻²]		RMSE [W m ⁻²]	rRMSE [%]	MAE [W m ⁻²]	rMAE [%]	MBE [W m ⁻²]	rMBE [%]	R
	GHI	INS							
Total	385.79	413.77	98.73	25.59	73.47	19.05	27.98	7.25	0.93
Spring	463.35	490.60	102.71	22.17	77.59	16.74	27.25	5.88	0.93
Summer	467.16	505.22	118.06	25.27	89.72	19.20	38.05	8.15	0.91
Fall	308.62	337.98	89.35	28.95	66.49	21.54	29.36	9.51	0.92
Winter	284.22	299.68	76.43	26.89	57.30	20.16	15.46	5.44	0.91

Table 4. Annual mean hourly solar irradiance, error, and accuracy statistics between the GHI and INS for each ground observation station.

Station number	Mean irradiance [W m ⁻²]		RMSE [W m ⁻²]	rRMSE [%]	MAE [W m ⁻²]	rMAE [%]	MBE [W m ⁻²]	rMBE [%]	R
	GHI	INS							
93	391.23	405.29	83.62	21.37	60.74	15.53	14.05	3.59	0.94
101	378.02	412.80	85.93	22.73	62.41	16.51	34.78	9.20	0.95
104	391.21	410.72	88.89	22.72	66.36	16.96	19.51	4.99	0.95
105	414.49	402.54	91.52	22.08	68.04	16.41	-11.95	-2.88	0.95
100	393.62	393.38	96.73	24.58	68.70	17.45	-0.25	-0.06	0.92
108	354.93	411.31	99.69	28.09	76.19	21.47	56.39	15.89	0.94
112	337.45	418.35	119.00	35.26	92.97	27.55	80.91	23.98	0.93
114	402.30	408.84	87.54	21.76	63.90	15.88	6.54	1.62	0.94
119	344.64	417.63	106.38	30.87	84.90	24.63	73.00	21.18	0.94
129	331.85	413.22	133.21	40.14	103.40	31.16	81.37	24.52	0.90
177	395.51	402.85	91.91	23.24	66.76	16.88	7.34	1.86	0.94
131	387.37	415.43	85.09	21.97	62.63	16.17	28.06	7.24	0.94
136	418.61	420.69	83.28	19.89	61.07	14.59	2.08	0.50	0.95
133	431.95	416.96	106.60	24.68	82.44	19.08	-14.99	-3.47	0.93
135	403.39	408.59	80.15	19.87	59.06	14.64	5.20	1.29	0.95
143	408.71	421.62	75.33	18.43	55.68	13.62	12.92	3.16	0.96
146	408.64	395.80	93.15	22.79	68.63	16.79	-12.84	-3.14	0.94
156	404.68	391.55	93.00	22.98	67.48	16.68	-13.13	-3.24	0.94
155	440.64	425.09	81.23	18.43	61.26	13.90	-15.55	-3.53	0.96
165	343.12	407.31	104.82	30.55	79.50	23.17	64.20	18.71	0.94
168	345.32	430.75	115.60	33.48	95.69	27.71	85.43	24.74	0.95
169	377.73	394.64	92.47	24.48	68.97	18.26	16.91	4.48	0.94
184	371.94	392.03	77.72	20.90	59.03	15.87	20.09	5.40	0.96
185	293.07	398.81	142.86	48.74	112.71	38.46	105.74	36.08	0.93

후인 1300 LST에 측정값의 절대치는 크고 두 측정값 간의 차이는 작아 rRMSE는 19.8% (RMSE = 108.53 W m⁻²)로 최소값이 나타난다(Fig. 3a). Nottrott and Kleissi (2010)은 일사계에 따라 태양천정각이 80° 보다 큰 경우 복사량 측정 시 오차 발생 확률이 높기 때문에 천정각이 80° 이상인 이른 아침과 늦은 저녁 시간의 자료는 제거하고 연구를 수행한 바 있다. 본 연구에서는 태양천정각이 아닌 지점별 시간별 자료

수집율을 기준으로 분석이 이루어져 이른 봄과 늦은 가을의 태양천정각이 다소 큰 시간대(0800, 0900 LST) 자료가 오차를 높이는 데 기여한 것으로 판단된다. 오전에는 GHI 대비 INS가 높고, 오후에는 그 차이가 매우 작아지며 GHI가 더 높아지는 시간대도 존재한다. Yeom et al. (2008)의 연구에서는 위성 자료는 정시의 순간값이지만 지상 자료는 이전 1시간의 평균값이기 때문에 태양고도각이 시간에 따라 증가하는 오전에는

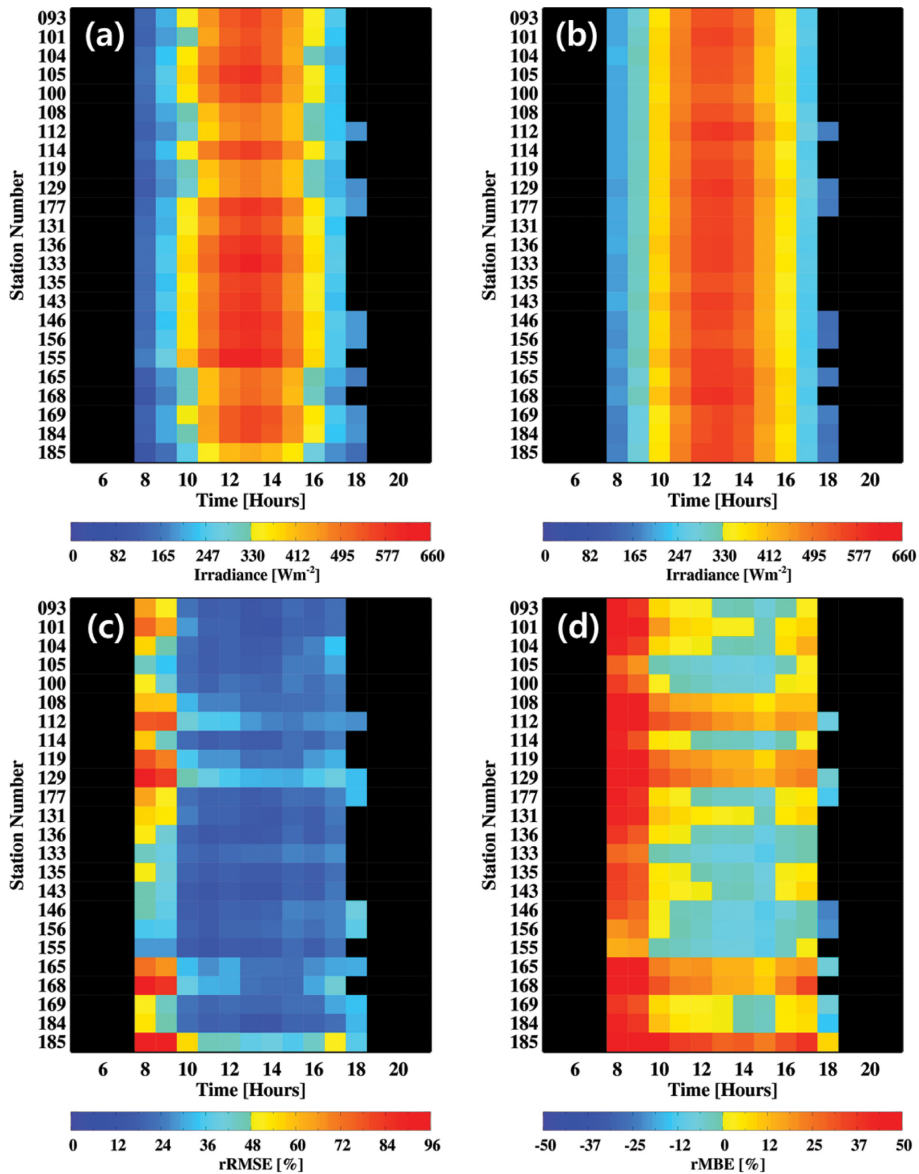


Fig. 4. Hourly variations of mean solar irradiance derived from (a) GHI and (b) INS. Hourly variations of (c) rRMSE and (d) rMBE at 24 ground observation sites.

INS가 높게 나타나고, 오후는 반대로 GHI가 더 높게 나타나는 현상을 설명한 바 있다. 이러한 시간적 불일치를 완화시키기 위해 본 연구에서는 INS를 시간 단위로 평균하여 사용하였지만 완벽하게 시간이 일치하지 않기 때문에 위와 같은 결과가 나온 것으로 판단된다.

Table 3은 시간단위 GHI와 INS의 전체 및 계절별 평균과 오차를 나타낸다. 모든 계절에서 위성이 지상 관측에 비해 과대추정하고, 그 차이(rRMSE)가 가을

(28.95%)에 가장 크고, 봄(22.17%)에 가장 작다. 복사량의 범위는 여름철에 0~1000 W m⁻², 겨울철에 0~800 W m⁻² 정도로 계절별로 차이가 나지만, 전 계절에서 상관계수는 0.9 이상으로 통계적으로 유의하다. 지점 평균 복사량의 월별 변동성은(Fig. 3b) 4월과 5월에 500 W m⁻² 내외의 높은 값이 지속되다가 6월에 최대 값을 보인다. 7, 8, 9월에는 장마, 태풍 등의 영향으로 복사량이 크게 감소한다. 7, 8, 9월의 rRMSE는 28.32%, 27.76%, 25.58%로, 대체적으로 20% 초반이던 2~6월

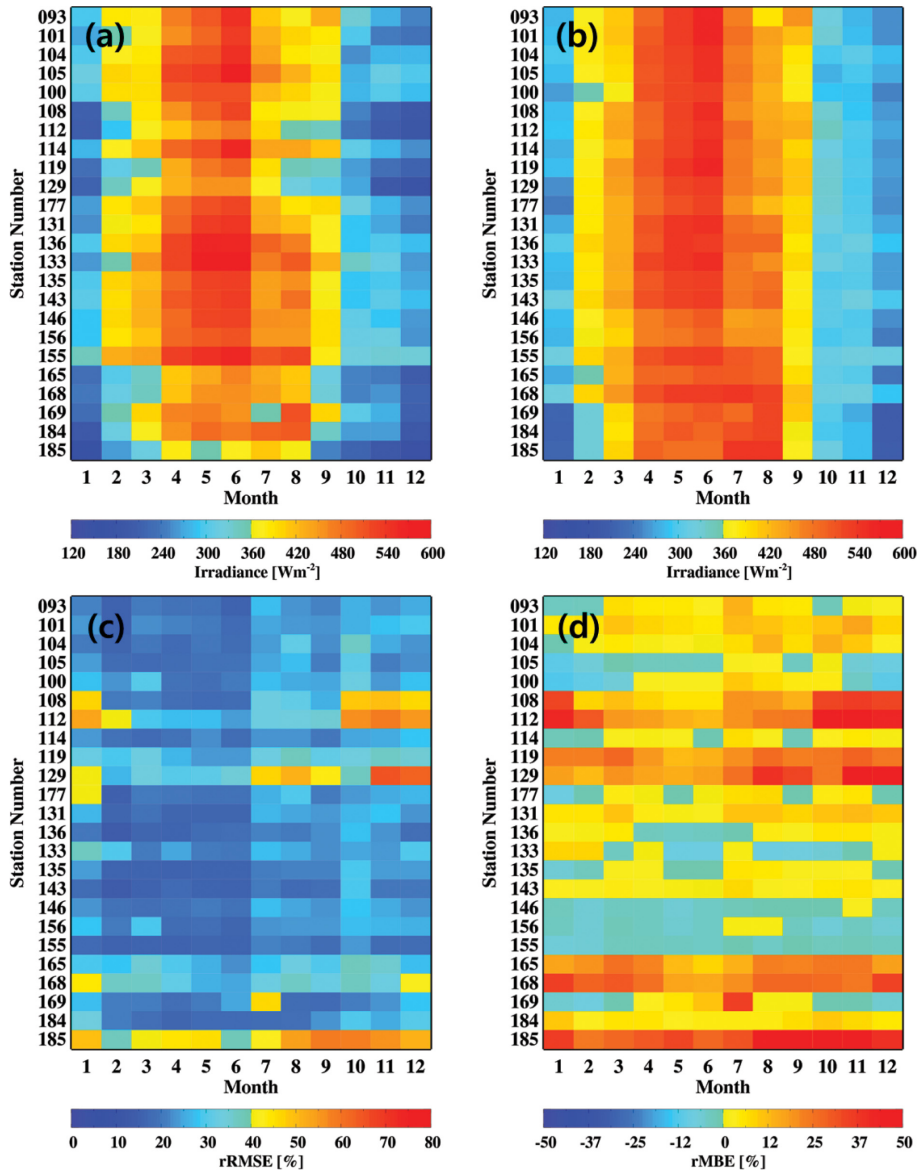


Fig. 5. Same as Fig. 4, but for monthly variations.

에 비해 증가한다. 10월~1월의 rRMSE가 이전 달들에 비해 더 크게 나타나 가을과 겨울에 오차가 큰데, 이는 특정 지점들에서 나타나는 높은 오차에 기인한 것으로 판단되며 다음 절에서 서술하였다.

3.2.2 지점별 일사량 분포 및 오차 변동성

Table 4는 지점별 GHI와 INS의 관측값 간의 차이이다. GHI와 INS의 차이가 가장 많이 나는 지점은 고산(185)으로 rRMSE가 48.74%이며 서산(129), 인천(112), 여수(168), 수원(119), 목포(165) 순으로 30~40%

대의 높은 rRMSE를 보인다. 반면, 안동(136), 추풍령(135), 대구(143), 창원(155) 지점에서 20% 이하의 상대적으로 낮은 rRMSE가, 나머지 14지점에서는 20~30% 범위의 rRMSE가 나타난다. 대체적으로 해안에 인접한 지역과 수도권 지역에서 오차가 크게 나타나는데, 수도권 경우에는 도시 효과로 인한 에어로졸의 영향, 해안지역은 해염의 영향에 의한 것으로 판단된다. Kariuki and Sato (2018)의 연구에서 위성 산출 자료가 격자 평균자료이기 때문에 한 격자 내에 육지와 해양이 모두 포함될 경우 그 격자는 비균질성을 가지

게 되어 복사량 산출 시 불확실성을 증가시킨다고 언급한 바 있는데, 해안지역에서 나타나는 GHI와 INS 관측값 간의 상대적으로 큰 차이에는 이러한 공간적 불일치도 영향을 미친 것으로 사료된다.

각 지점에 대한 GHI와 INS의 시간별 평균 복사량을 Figs. 4a, b에 rRMSE는 Fig. 4c, rMBE는 Fig. 4d에 나타내었다. 시간에 따른 복사량의 증감은 영역 I, II, III에서 유사하게 나타나며, INS는 위도에 따라 연속성 있는 분포를 보이지만 GHI는 각 관측 지점 주변 환경에 따라 다른 특성이 나타난다. 지점별 rRMSE (Fig. 4c)는 일출 시간에 특히 높게 나타나며, 이는 이 시간대의 두꺼운 대기 광학 두께와 낮은 복사량에 대한 INS의 낮은 민감도에 의해 유발되는 오차로 보인다. 북춘천(93), 대관령(100), 춘천(101), 북강릉(104), 강릉(105), 원주(114), 청주(131), 대전(133), 추풍령(135), 안동(136), 대구(143), 전주(146), 창원(155), 광주(156), 흑산도(169), 홍성(177), 제주(184)를 포함하는 17개 지점에서는 rMBE가 오전 시간대에는 양의 값으로 INS가 GHI에 비해 과대 추정, 오후 시간대에는 음의 값으로 INS가 GHI에 비해 과소 추정한다. 이는 앞 절에서 설명한 것처럼 위성 자료와 지상관측 자료의 시간 불일치에 의한 영향으로 사료된다. 서울(108), 인천(112), 수원(119), 서산(129), 목포(165), 여수(168), 고산(185) 지점에서는 평균 rMBE가 ±10% 이내인 다른 지점에 비해 +15% 보다 높은 rMBE를 보이며, 전 시간대에서 INS가 GHI에 비해 복사량을 과대추정한다(Fig. 4d). 현재 위성에 탑재되어 있는 채널만으로는 정확한 에어로졸 특성을 파악하고 모수화 하는데 어려움이 있긴 하나, 수도권 지역의 도시화로 인한 오염과 바다로부터의 해염이 오차를 야기한 것으로 보인다.

Figures 5a, b는 관측 지점에 대한 GHI와 INS의 월별 평균 복사량, 5c와 5d는 월별 rRMSE와 rMBE의 변동성이다. 앞에서 일주적 GHI에 따라 3개 영역으로 분류한 것을 바탕으로 영역별로 태양복사량과 오차의 경향성을 분석하였다. 영역 I은 크게 수도권과 강원도 지역으로 나뉜다. Figure 6a, b는 영역 I의 대표 지점인 원주(114)와 서울(108)의 월평균 복사량 분포와 오차이다. 영역 I에 포함되는 지점들의 월평균 복사량은 6월에 최대값을 보이고 여름철 한반도의 빈번한 국지성 호우 및 장마의 영향으로 7, 8월에 100 W m^{-2} 이상 크게 감소하는 형태로 매우 유사하다. 원주 지점의 최소와 최대 rRMSE는 17.72% (3월)과 28.5% (12월)이고 서울 지점은 17.4% (5월)과 49.85% (11월)로 수도권 지역이 강원도 지역에 비해 두 관측값 간의 차이가 크다. 서울, 인천, 수원, 서산 지점은 여름보다 가을과 겨울의 rRMSE가 유독 높은데(Fig. 5c), 이는 기압계 정체로 인해 대기 중에 부유하는 미세 먼지를

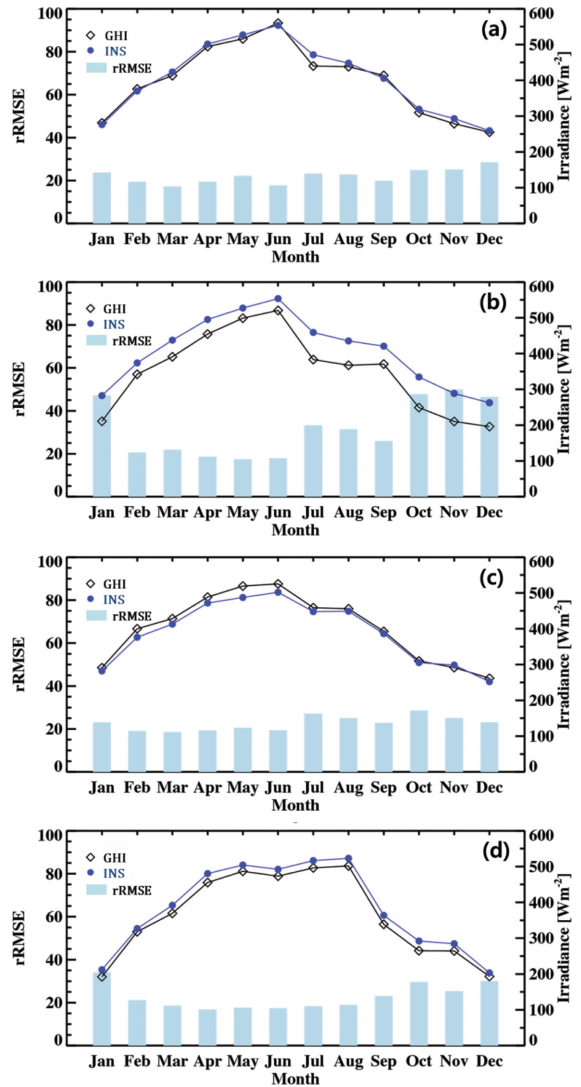


Fig. 6. Monthly variations of GHI (black line), INS (blue line) and rRMSE (bar) at (a) Wonju (114), (b) Seoul (108), (c) Jeonju (146), (d) Jeju (184) stations.

포함한 에어로졸이 영향을 미치는 것으로 사료되며, 실제 관측을 통해 에어로졸이 복사량에 미치는 영향에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

중부 및 남부 일부 지역을 포함하는 영역 II는 4월부터 6월까지 지속적으로 높은 평균 복사량이 나타나다 점차 감소한다. Figure 6c는 이 영역의 대표 지점인 전주(146)의 월평균 복사량 분포 및 오차이다. 이 지점은 6월에 최대 복사량을 보이고 7월에 크게 감소한 영역 I 지점들의 경향성과는 다르게 7월에 소폭 감소한 후 8월까지 평균 복사량이 유지되다가 9월부터

Table 5. Error statistics of hourly solar irradiance according to cloud amount (CA) categories.

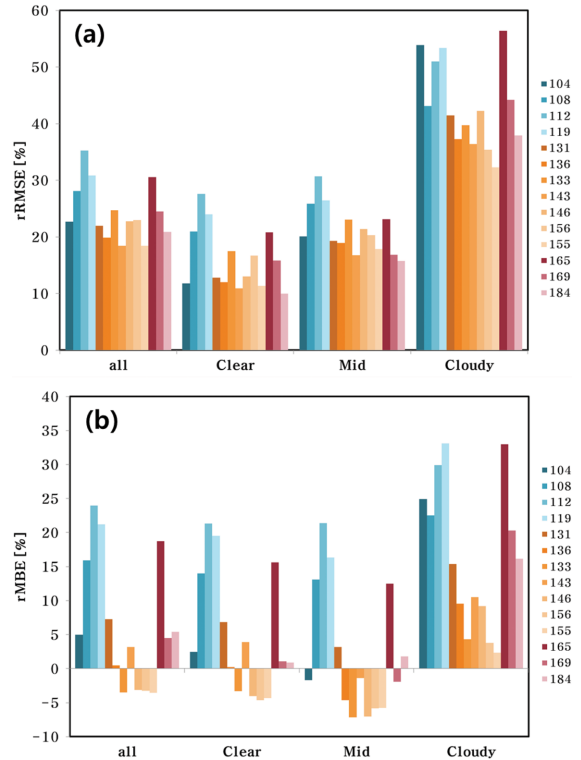
	RMSE [W m ⁻²]	rRMSE [%]	MAE [W m ⁻²]	rMAE [%]	MBE [W m ⁻²]	rMBE [%]	R	Frequency of samples
Total	94.79	24.21	71.02	18.14	23.84	6.09	0.93	95.16
Clear (0 ≤ CA < 2)	82.57	16.24	63.80	12.55	23.37	4.60	0.95	31.60
Mid (3 < CA < 7)	106.50	22.23	81.21	16.95	7.16	1.50	0.89	27.43
Cloudy (CA > 8)	95.35	42.76	69.60	31.22	36.92	16.56	0.87	36.12

10월까지 큰 폭으로 감소하는 경향을 보인다. rRMSE는 3월에 최소값인 18.57% (RMSE = 79.53 W m⁻²), 10월에 최대값인 28.59% (RMSE = 88.64 W m⁻²)로 다른 지점 대비 오차의 변동폭이 크지 않다. 영역 II에 포함되는 9개 지점 모두 월별 rRMSE가 30% 이내로 다른 영역에 비해서 낮다. 대관령(133), 전주(146), 광주(156), 창원(155) 지점은 과소추정하는 달이 많아 rMBE가 약 -3% 대로 나타난다(Fig. 5d).

남해안 지역과 제주도를 포함한 영역 III의 대표 지점인 제주(184)의 월별 평균 복사량과 오차를 Fig. 6d에 나타내었다. 영역 I, II에서 평균 복사량이 6월에 최대값을 보인 후 7월과 8월에 감소한 것과는 상이하게 제주 지점은 4월부터 8월까지 높은 복사량이 지속되는 것을 확인할 수 있다. 특히, 제주도는 한반도에서 장마가 제일 먼저 시작되기 때문에 6월의 평균 복사량이 소폭 감소하는 특징을 보였고, 일사에 의해 지표가 가열되고 대기가 불안정해지며 생성되는 국지성 호우가 내륙지역에 비해 덜하기 때문에 8월까지 복사량이 지속적으로 높게 나타난 것으로 보인다. 또한 9월에 복사량이 큰 폭으로 감소하면서, 오차가 증가하여 가을철의 rRMSE가 다른 계절에 비해 크다. 영역 III 지점 중 고산(185), 목포(165)는 가을과 겨울에 높은 오차를 보인다(Fig. 5c). 앞서 Table 3에서 여름 대비 가을, 겨울에 높은 오차가 나타난 이유도 영역 I의 서울(108), 인천(112), 수원(119), 서산(129)과 영역 III의 고산(185), 목포(165)에서의 높은 rRMSE 영향으로 판단된다.

3.3 운량에 따른 오차 분석

운량에 따른 복사량 추정의 민감도를 분석하기 위해 운량이 0~2일 경우는 맑음(Clear), 3~7일 경우는 약간흐림(Mid), 8~10일 경우는 흐림(Cloudy)으로 분류하였다. Table 5는 전체, 맑음, 약간흐림, 흐림 경우에 대한 전 지점의 평균 오차와 범주별 자료의 빈도이다. 맑음 경우는 31.6%, 약간흐림은 27.43%, 흐림 경우는 36.12%의 빈도로 2년 기간 동안 흐림의 빈도가 가장 높다. 맑음, 약간흐림, 흐림을 모두 포함하는 경우 rRMSE는 24.21% (RMSE = 94.79 W m⁻²)이고, 상관계수는 0.93이다. 맑음 경우는 rRMSE가 16.24%

**Fig. 7.** Bar plots of (a) rRMSE and (b) rMBE according to cloud amount categories.

(RMSE = 82.75 W m⁻²)로 전체 오차에 비해 약 8% 정도 작고, 상관계수는 0.95로 가장 크다. 반면 흐림 경우에는 rRMSE가 42.76%로 맑음 경우에 비해 약 27% 정도 높고, 상관계수는 0.87로 가장 낮다. 즉, 흐림 경우에 위성에서 산출되는 INS의 정확도가 맑음 대비 약 30% 정도 낮아지는데 위성 이미지를 이용한 구름 분류 및 알베도 산출 과정에서 발생하는 오차가 영향을 미치는 것으로 보인다.

Figure 7은 각 지점별 전체, 맑음, 약간흐림, 흐림에 대한 INS의 rRMSE와 rMBE 분포이다. 푸른색 계통은 영역 I, 주황색 계통은 영역 II, 붉은색 계통은 영역 III에 해당하는 지점이다. 맑음 경우는 낮은 상대

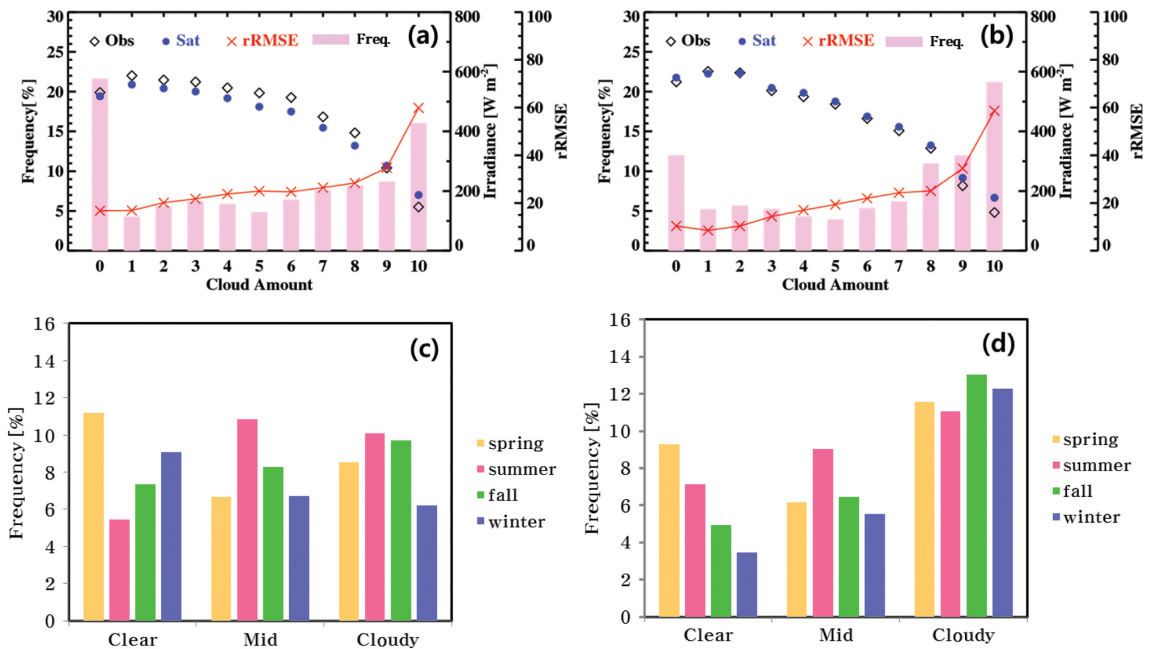


Fig. 8. (Upper) Distributions of mean GHI (\diamond), INS (\bullet), rRMSE(line), and frequency of occurrence for each cloud amount category at (a) Daejeon (133) and (b) Jeju (184). (Lower) Seasonal frequency distribution of 3 cloud amount categories at (c) Daejeon (133) and (d) Jeju (184).

오차를, 흐림 경우는 높은 상대오차를 보이며 전반적인 오차의 경향은 비슷하다. 영역 I에서는 맑음이거나 약간흐림일 때 인천(112)의 rRMSE가 가장 크고 수원(119), 서울(108), 북강릉(104) 순으로 낮아졌지만 흐림일 때는 북강릉(104)의 rRMSE가 가장 크다. 영역 II에서 맑음과 약간흐림의 경우 rMBE는 음의 값이 우세하여 INS가 과소추정하고 흐림 경우에는 반대로 과대추정한다. 영역 III에 해당하는 흑산도와 제주의 rRMSE는 운량 분포에 따라 영역 II와 비슷하며, rMBE의 절대값은 맑음과 약간흐림의 경우 영역 II보다 작지만 흐림의 경우는 높다. 오차가 큰 서울, 인천, 수원, 목포 지점을 제외한 10개 지점의 rMBE는 전체 맑음, 약간흐림의 경우 모두 10% 이내이다.

내륙과 해안 지역을 대표하는 대전과 제주 지점의 운량 구간별 발생빈도와 각 운량별 INS의 오차(Figs. 8a, b) 및 각 계절의 운량 범주별 발생빈도(Figs. 8c, d)를 분석하였다. 두 지점 모두 낮은 운량(0-2)일 경우 상대오차가 20% 내외이지만 운량이 증가함에 따라 상대오차도 증가하여 운량이 10인 경우에는 약 60%에 달한다. 대전은 맑음 경우의 발생빈도가 봄에 가장 높고 겨울, 가을, 여름 순으로 그 빈도가 낮아진다. 제주는 봄, 여름, 가을, 겨울 순으로 맑음 경우의 발생빈도가 낮아지며, 특히 겨울은 그 빈도가 4% 밖

에 되지 않는다. 약간흐림 경우는 두 지역 모두 여름 여름에 발생빈도가 가장 높고, 가을, 봄, 겨울 순으로 비슷한 분포를 보이지만 흐림 경우는 두 지역의 계절 빈도의 분포가 상이하며 전반적으로 제주의 흐림 발생빈도가 대전에 비해 훨씬 높다. 대전은 국지성 호우 및 장마의 영향으로 흐림 경우가 여름철에 우세하지만, 제주는 오히려 가을에 가장 높아 이러한 특성이 태양복사량에 큰 영향을 미치는 것으로 사료된다. 전반적으로 흐림의 경우 정확도 개선이 필요한 것으로 판단되며, 향후 위성의 다양한 채널값을 활용하여 구름의 특성을 세분화시키고 이를 이용한 구름 감쇠 계수가 산출된다면 일사량의 정확도가 향상될 것으로 예상된다. 추가적으로 전운량은 각 지점에서 목측으로 수행하기 때문에 주관적인 판단에 따른 오차가 생길 가능성이 높아 추후 정량적인 운량 관측을 통한 위성 기반 복사량의 정확도 분석이 요구된다(Sutter et al., 2004).

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 2016년 8월부터 2018년 7월까지 천리안 위성에서 산출되는 표면도달일사량(INS)을 지상 일사계 자료(GHI)와 비교하여 태양광 기상자원의 특

성과 오차 분석을 수행하였다. 위성 기반의 INS는 대체로 GHI에 비해 과대추정되는 경향을 보이며, 전 지점 평균 rRMSE는 25.59%이다. 전 지점 평균 시간별 복사량은 일변동성에 따라 INS가 오전에는 과대, 오후에는 과소추정하는 경향을 보이는데 이는 위성과 지상에서 산출되는 자료의 시간 해상도가 달라 INS를 시간 단위 자료로 평균하여 검증하였음에도 불구하고 완벽하게 일치하지 않았기 때문이다. 시간별 상대오차는 1300 LST에 가장 작고, 0800 LST에 가장 크며 일출 시간의 큰 상대오차는 두꺼운 대기 광학 두께와 낮은 복사량 범위에서 발생하는 관측 기기의 민감도에 의한 영향으로 판단된다. 전 지점 평균 월별 복사량 변동성과 오차는 6월에 월평균 복사량이 최대이고 7, 8월에 장마와 집중호우의 영향으로 감소하지만 오차는 오히려 증가한다. 계절별 상대오차는 구름 발생률이 높은 여름 대비 맑은 날이 많은 봄에 가장 작다.

각 지점별로 총, 시간별, 월별 평균 복사량과 오차 분포를 살펴보고, 영역별 특성을 파악하였다. 상대오차가 큰 지점은 고산, 서산, 인천, 여수, 수원, 목포, 서울 순으로 중부~남부인 영역 I, II에 포함된 지점들 중에서 수도권과 해안가에 분포한 지역에서 높은 오차가 나타났다. 이는 오염물질을 포함한 도시 효과와 해염 입자를 포함한 해무, 관측 기기의 정확도 등 다양한 요인에 의한 것으로 판단된다. 상대적으로 안동, 추풍령, 대구, 창원 지점이 포함된 영역 II는 전반적으로 오차가 낮다. 대부분의 지점에서 INS가 오전에는 과대, 오후에는 과소추정하는 경향이 있지만 오차가 높은 7개 지점(서울, 인천, 수원, 서산, 여수, 목포, 고산)에서는 지속적으로 과대추정한다. 월별 복사량과 오차 분포를 살펴본 결과, 영역 I, II는 6월에 최대 복사량을 보인 후 장마 및 호우의 영향으로 7, 8월에 감소하는 추세를 보이지만 남해안과 제주도 포함하는 영역 III은 4~8월까지 높은 복사량이 지속되었다. 이는 여름철 내륙지방에서 발생하는 빈번한 국지성 호우와 장마가 주로 영역 I, II의 태양복사량을 감소시켰기 때문인 것으로 판단된다. 운량 분석 시 내륙인 대전은 여름에 흐림의 빈도가 우세하지만 해안인 제주는 가을에 흐림의 빈도가 우세하다. 흐림 경우에 맑음 경우 대비 INS의 상대오차가 약 30% 증가하기 때문에 지역별로 상이한 기상 환경이 영역 I, II, III의 태양 복사량 월별 변동성과 오차에 영향을 준 것으로 판단된다.

반면, 일사계의 계통 오차는 GHI 정확도에 영향을 미치는 주요한 원인일 수 있다. 정확한 일사 관측 자료를 확보하기 위해서는 관측 장비의 정기적인 점검이 필수적이며, 수시로 품질관리를 실시해야 한다. 또 장비 노화에 따른 민감도를 보정해 주지 않으면 시간

에 따라 자료의 불확실성이 발생하여 자료 신뢰성이 떨어지게 된다. 오차가 높은 7개 지점에 대해서는 이러한 문제점들을 확인하고, 보완할 경우 좀 더 신뢰도 있는 결과가 도출될 것이다.

위성 산출물은 지상관측이 불가능한 지점을 포함하여 광범위한 지역의 자료가 제공되기 때문에 다양한 분야에서 활용이 가능하다. 태양광 발전기의 높은 초기 설치비와 발전단가, 기상 및 대기 조건에 따른 발전량의 변화로 인해 효율적인 태양광 에너지 생산을 위해서는 복사량 분포를 활용한 체계적인 입지 선정이 필요하다. 위성 기반 복사량은 태양광 자원에 대한 평가뿐만 아니라 발전량 산출, 태양광 발전시스템의 운영계획을 위한 태양 복사량 예측에 사용되기도 한다(Lorenz et al., 2004; Perez et al., 2010). 본 연구는 시간이 지남에 따라 변화하는 지상일사계의 감도 변화에 따른 불확실성을 보정하지 못한 점과 오차의 원인을 추정할 것이 한계로 남아있지만 우리나라 최초 정지궤도 위성인 천리안 위성에서 산출되는 장기간 자료를 사용하여 한반도에 분포하는 24개 관측 지점의 복사량 분포 특성과 그 정확도를 검증한 것에 의의가 있다. 또 급격히 성장하고 있는 태양광에너지 분야에서 위성 기반 복사량을 활용한 태양광 기상자원 산정 및 예측에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「생명·산업기상 기술개발」(1365003004)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Ayash, T., S. Gong, and C. Q. Jia, 2008: Direct and indirect shortwave radiative effects of sea salt aerosols. *J. Climate*, **21**, 3207-3220.
- Baek, J., K. Byun, D. Kim, and M. Choi, 2013: Assessment of solar insolation from COMS: Sulma and Cheongmi watersheds. *Korean J. Remote Sens.*, **29**, 137-149 (in Korean with English abstract).
- Cristobal, J., and M. C. Anderson, 2013: Validation of a Meteosat Second Generation solar radiation dataset over the northeastern Iberian Peninsula. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **17**, 163-175, doi:10.5194/hess-17-163-2013.
- Foltescu, V. L., S. C. Pryor, and C. Bennet, 2005: Sea salt generation, dispersion and removal on the regional scale. *Atmos. Environ.*, **39**, 2123-2133.
- Gueymard, C. A., and D. R. Myers, 2008: Solar Radiation Measurement: Progress in Radiometry for Improved Modeling. In V. Badescu, Ed., *Modeling Solar Radia-*

- tion at the Earth Surface*. Springer, 1-27.
- Jee, J. B., Y. D. Kim, W. H. Lee, and K. T. Lee, 2010: Temporal and spatial distributions of solar radiation with surface pyranometer data in South Korea. *J. Kor. Earth Sci. Soc.*, **31**, 720-737 (in Korean with English abstract).
- Kariuki, B. W., and T. Sato, 2018: Interannual and spatial variability of solar radiation energy potential in Kenya using Meteosat satellite. *Renew. Energy*, **116**, 88-96, doi:10.1016/j.renene.2017.09.069.
- Kawai, Y., and H. Kawamura, 2005: Validation and improvement of satellite-derived surface solar radiation over the Northwestern Pacific Ocean. *J. Oceanogr.*, **61**, 79-89.
- Kawamura, H., S. Tanahashi, and T. Takahashi, 1998: Estimation of insolation over the Pacific Ocean off the Sanriku Coast. *J. Oceanogr.*, **54**, 457-464.
- Kim, C. K., H.-G. Kim, Y.-H. Kang, C.-Y. Yun, and S.-N. Lee, 2016: Evaluation of global horizontal irradiance derived from CLAVR-x model and COMS imagery over the Korean Peninsula. *New and Renewable Energy*, **12**, 13-20.
- KMA/NMSC, 2012: INS: Insolation Algorithm Theoretical Basis Document (INS-v5.0). NMSC/SCI/ATBD/INS, Issue 1, rev. 0, 1-33 (in Korean).
- Lorenz, E., A. Hammer, and D. Heinemann, 2004: Short term forecasting of solar radiation based on satellite data. EUROSUN2004 (ISES Europe Solar Congress), Freiburg, Germany, 8 pp.
- Mazorra Aguiar, L., B. Pereira, P. Lauret, F. Diaz, and M. David, 2016: Combining solar irradiance measurements, satellite-derived data and a numerical weather prediction model to improve intra-day solar forecasting. *Renew. Energy*, **97**, 599-610, doi:10.1016/j.renene.2016.06.018.
- Nottrott, A., and J. Kleissi, 2010: Validation of the NSRDB-SUNY global horizontal irradiance in California. *Sol. Energy*, **84**, 1816-1827, doi:10.1016/j.solener.2010.07.006.
- Otkin, J. A., M. C. Anderson, J. R. Mecikalski, and G. R. Diak, 2005: Validation of GOES-based insolation estimates using data from the U.S. Climate Reference Network. *J. Hydrometeor.*, **6**, 460-475.
- Osinowo, A. A., E. C. Okogbue, S. B. Ogungbenro, and O. Fashanu, 2015: Analysis of global solar irradiance over climatic zones in Nigeria for solar energy applications. *J. Sol. Energy*, **9**, 819307, doi:10.1155/2015/819307.
- Perez, R., S. Kivalov, J. Schlemmer, K. Hemker Jr., D. Renné, and T. E. Hoff, 2010: Validation of short and medium term operational solar radiation forecasts in the US. *Sol. Energy*, **84**, 2161-2172, doi:10.1016/j.solener.2010.08.014.
- Pidwirny, M., 2006: *Fundamentals of Physical Geography, 2nd edition*. University of British Columbia, Okanagan [Available online at <http://www.physical-geography.net/fundamentals/6i.html>].
- Sutter, M., B. Dürr, and R. Philipona, 2004: Comparison of two radiation algorithms for surface-based cloud-free sky detection. *J. Geophys. Res.*, **109**, D17202, doi:10.1029/2004JD004582.
- Thomas, C., E. Wey, P. Blanc, and L. Wald, 2016: Validation of three satellite-derived databases of surface solar radiation using measurements performed at 42 stations in Brazil. *Adv. Sci. Res.*, **13**, 81-86, doi:10.5194/asr-13-81-2016.
- Yeom, J.-M., K.-S. Han, C.-S. Lee, and D.-Y. Kim, 2008: An improved validation technique for the temporal discrepancy when estimated solar surface insolation compare with ground-based pyranometer: MTSAT-1R data use. *Korean J. Remote Sens.*, **24**, 605-612 (in Korean with English abstract).
- _____, _____, and J.-J. Kim, 2012: Evaluation on penetration rate of cloud for incoming solar radiation using geostationary satellite data. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **48**, 115-123, doi:10.1007/s13143-012-0011-9.