

태양광 발전 예보를 위한 UM-LDAPS 예보 모형 성능평가

김창기** · 김현구** · 강용혁** · 윤창열*

*한국에너지기술연구원 신재생에너지자원·정책센터, 선임연구원
**한국에너지기술연구원 신재생에너지자원·정책센터, 책임연구원

Evaluation of UM-LDAPS Prediction Model for Daily Ahead Forecast of Solar Power Generation

Kim Chang Ki** · 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, Principal Researcher

†Corresponding author: cckim@kier.re.kr

Abstract

Daily ahead forecast is necessary for the electricity balance between load and supply due to the variability renewable energy. Numerical weather prediction is usually employed to produce the solar irradiance as well as electric power forecast for more than 12 hours forecast horizon. UM-LDAPS model is the numerical weather prediction operated by Korea Meteorological Administration and it generates the 36 hours forecast of hourly total irradiance 4 times a day. This study attempts to evaluate the model performance against the in situ measurements at 37 ground stations from January to May, 2013. Relative mean bias error, mean absolute error and root mean square error of hourly total irradiance are averaged over all ground stations as being 8.2%, 21.2% and 29.6%, respectively. The behavior of mean bias error appears to be different; positively largest in Chupoongnyeong station but negatively largest in Daegu station. The distinct contrast might be attributed to the limitation of microphysics parameterization for thick and thin clouds in the model.

Keywords: 수치기상예측(Numerical weather prediction), UM-LDAPS(Unified Model-Local Data Assimilation and Prediction System), 관측 기반 일사량(*In-situ* measured solar irradiance)

기호설명

COD : Cloud Optical Depth

KIER : Korea Institute of Energy Research

LST : Local Standard Time

rMAE : relative Mean Absolute Error

rMBE : relative Mean Bias Error



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.39, No.2, pp.71-80, April 2019
<https://doi.org/10.7836/kjes.2019.39.2.071>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 05 March 2019

Revised: 24 April 2019

Accepted: 26 April 2019

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.

rRMSE : relative Root Mean Square Error

UASIBS : University of Arizona Solar Irradiance Based on Satellite

UM-LDAPS : Unified Model-Local Data Assimilation and Prediction System

UM-GDAPS : Unified Model-Global Data Assimilation and Prediction System

UTC : Universal Time Coordinate

1. 서론

신재생에너지의 간헐적 특성이 전력 계통에 영향을 미침에 따라 신재생에너지 예보에 대한 중요성이 증가하고 있다¹⁾. 일반적으로 예보 목적에 따라 예보 시간(Forecast horizon) 및 그에 따른 예보 기법이 다르다. 예를 들어, 신재생에너지 증발감(Ramp Rate)에 의한 주파수 변동을 제어하기 위해서는 1시간 예보가 필요하며 시계열 분석, 머신러닝 분석 등 통계적 기법이 사용된다²⁾. 보다 긴 시간규모에서의 안정적인 에너지 수요-공급 계획은 익일예보(Daily Ahead Forecast)를 통해 구현된다. 이를 위해서는 통계적 기법보다는 대기의 흐름 및 강수현상을 물리적으로 모사하는 수치기상예측(Numerical Weather Prediction)을 이용한다.

국내에서는 지난 2018년 12월 소규모 전력중개사업을 위한 시행규칙이 발표되었는데, 중개거래를 위해서 거래일 전일 오전 10시까지 발전예측량을 제출하도록 되어있어 실질적으로 48시간 신재생 발전 예보시스템이 필요하므로 수치모사에 의한 예보 기법을 개발해야 한다. 현재 기상청에서는 수치기상예측을 통해 일기예보 업무를 수행하고 있지만, 일반적으로 강수량 예보에 초점이 맞추어져 있고, 태양광 발전에 핵심인 수평면 전일사량에 대한 예보 성능 평가가 이루어지지 않았다. 다만, Lee et al.(2013)³⁾에 의한 선행연구에서 제주 지역의 일사량 예보 성능 개선을 위해 기상청 현업 수치기상예측 모델에 대한 머신러닝 기법을 적용한바 있다. 그들 연구에서 오차율은 랜덤 포레스트(Random Forest)기법에 의해서 33.2%에서 17.0%로 감소하였다. 하지만 모델 성능에 대한 평가가 제주 지역에만 국한되어 대한민국 전역에 대한 성능 평가를 시도하지 않았다.

따라서 본 연구는 기상청 현업 수치기상예측의 수평면 전일사량에 대한 예보 성능 평가를 전국 37개 일사량 관측지점에 대해서 수행하여 예보 성능에 대한 지역적 특성을 검증하고, 수치기상예측에서 수평면 전일사량에 대한 오차는 모델 내 구름 및 강수과정 계산부분에서 기인하기 때문에 예보 오차와 구름간의 관계를 추가적으로 분석하고자 한다.

2. 모델소개 및 관측자료

2.1 UM-LDAPS

본 연구에서는 기상청에서 현업 운용중인 수치기상예측인 UM-LDAPS (Unified Model-Local Data Assimilation and Prediction System)를 일사량 예보 모델로 사용하였다. 이 모델은 Fig. 1과 같이 한반도의 국지

적 기상현상을 예보하기 위해 개발된 것으로 수평 공간해상도는 1.5 km로 설정되어있고, 연직 격자는 지면부터 약 40 km 고도까지 70개층으로 구성되어 있다⁴⁾. 즉, 1.5 km × 1.5 km 공간에 대한 평균 동서, 남북 및 연직 방향 속도와 온도 그리고 수증기량을 Navier-Stokes 방정식에 의해서 계산하는 모델로 지면에 대한 경계조건이 지형뿐만 아니라 토양 성분에 따른 토양 온도 및 수분량까지 포함되므로 조밀한 영역에 대한 자세한 지역적 특성이 반영된 모델이라고 할 수 있다. 수치예보 모형의 특성상 초기 및 경계조건이 필요한데, UM-LDAPS는 같은 UM 모형의 전지구모형인 UM-GDAPS (UM-Global Data Assimilation and Prediction System)을 이용한다. 예보 과정은 Fig. 2에 나타내었는데, 36시간 예보는 하루에 4번 (00, 06, 12, 18 UTC = LST - 9)에 수행된다. 만약 예보 결과에 대한 예보 오차가 실시간으로 계산된다면, 다음 예보에 대한 오차를 줄일 수 있다. 예를 들어 00 UTC에 수행된 예보 결과와 관측 결과로부터 계산된 예보 오차가 산정되고, 이를 06 UTC에 수행될 예보 모형에 반영하면 06 UTC에서 시작되어 36시간 예보에 대한 오차를 줄일 수 있다. 이러한 방법을 3차원 변분자료동화 기법이라고 하는데, 현재 기상청에서는 이 기법을 적용하여 자체 분석-예측 순환체계로 예보 오차를 최소화하고 있다.

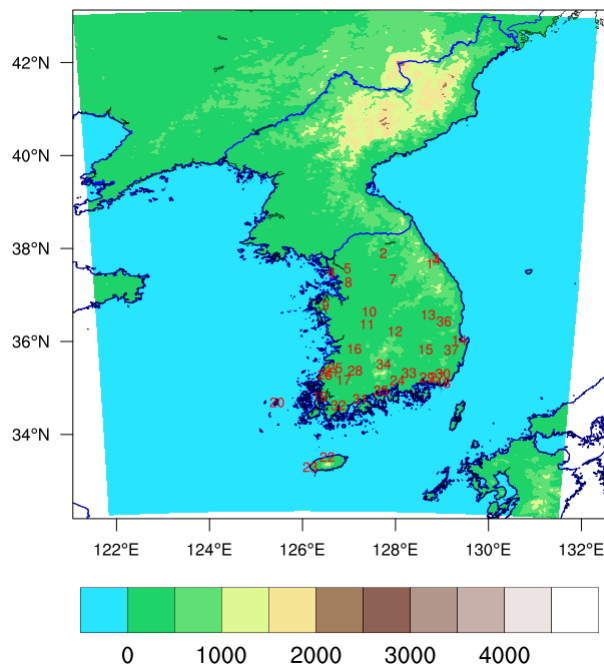


Fig. 1 Domain for UM-LDAPS model and locations of 37 ground observing stations

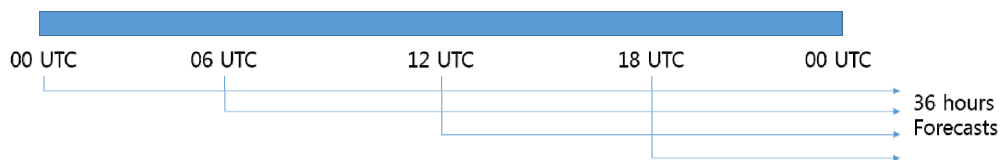


Fig. 2 Operational Time Schedule for UM-LDAPS model

2.2 관측자료

UM-LDAPS 모델의 수평면 전일사량에 대한 예보 성능을 평가하는 것이 본 연구의 주된 목적이므로 기상청에서 관리하는 전국 37개 관측지점에서 관측된 수평면 전일사량을 사용하였다. 본 연구에 사용된 관측지점에 대한 정보는 Table 1에 나타내었다. 이 관측 자료는 1시간 누적 일사량으로 단위는 MJ m^{-2} 이다. 관측지점에 대한 지리적 분포는 Fig. 1에 제시하였다. 또한 구름에 따른 UM-LDAPS 모델의 예보성능을 분석하기 위해서 본 연구에서는 Kim et al.(2017)⁵⁾이 개발한 UASIBS-KIER (University of Arizona Solar Irradiance Based on Satellite-Korea Institute of Energy Research) 모델을 활용하여 천리안 위성영상으로부터 격자별 구름의 공간적 분포, 광학 깊이(Cloud Optical Depth) 그리고 운형 정보를 추출하였다.

3. 검증방법

3.1 Error Metrics

수치예보 모델의 오차를 정량적으로 파악하기 위하여 관측값에 대해서 정규화된 상대오차(MBE), 절대오차(MAE) 그리고 제곱근오차(RMSE)를 각각 식(1), (2) 그리고 (3)과 같이 정의하여 계산하였다. 여기서 F, O, N은 각각 수평면 전일사량에 대한 예보치, 관측치 그리고 샘플수를 의미한다. MBE는 모델이 나타내는 오차를 직접적으로 나타내는 지표이지만 rMBE는 이 오차가 관측값에 대해서 몇 % 정도인지를 보여주는 척도이다.

$$rMBE = \frac{\sum_{i=1}^N (F_i - O_i)}{\sum_{i=1}^N O_i} \quad (1)$$

$$rMAE = \frac{\sum_{i=1}^N |F_i - O_i|}{\sum_{i=1}^N O_i} \quad (2)$$

$$rRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_i} \quad (3)$$

3.2 데이터 선정

본 연구에서는 2013년 1월부터 5월까지 12 UTC (21 LST)에 생산된 UM-LDAPS 모델의 36시간 수평면 전

일사량 예보자료를 사용하였는데, 이에 대한 변수명은 VAR0-4-192_FROM_40-11-1_surface_1_Hour_Average로 1시간 평균치이며, 단위는 $W m^{-2}$ 이다. 이것을 관측치와 비교하기 위해서 3600 s를 곱하여 단위를 보정한다. 관측치에 대한 검증은 위해서 관측 지점 및 시점에 대한 대기권밖 일사량(Extraterrestrial Solar Irradiance)과 비교하여 관측치가 이 값보다 큰 경우 검증에서 제외하였고, 또한 태양고도각이 낮을 경우 지표 반사 또는 주변 지형 및 건물에 의한 반사에 의해서 일사량이 왜곡될 수 있으므로 태양고도각이 10° 보다 낮은 경우 검증에서 제외하였다.

4. 결과

수평면 전일사량에 대한 UM-LDAPS 모형의 정량적 오차를 Table 1에 나타내었다. 평균적으로 rMBE는 8.2%를 기록하여 UM-LDAPS 모형이 수평면 전일사량을 과대모의하는 것을 알 수 있다. 전국 평균 rMAE와 rRMSE는 각각 21.2%와 29.6%를 보이는데, 이 두 지표가 차이가 나는 것은 수평면 전일사량이 높았을 때 UM-LDAPS 모형의 예측 성능이 낮음을 의미한다. Fig. 3은 2013년 1월부터 5월까지 UM-LDAPS 모형의 수평면 전일사량에 대한 rMBE의 평균값의 지역적 분포이다. rMBE가 대부분 지역에서 양의 값을 보인다. 특히 청주 (10)와 추풍령 (12) 지점에서 양의 Bias가 40% 이상을 기록하여 UM-LDAPS 모형이 수평면 전일사량을 관측값에 비해 과도하게 예보하고 있음을 알 수 있다. 반면 강릉 (4)과 대구 (15) 지점은 rMBE가 각각 -3.1% 와 -6.9% 를 보여, UM-LDAPS 모형의 전체적인 예보 특성과는 차이가 있음을 짐작할 수 있다.

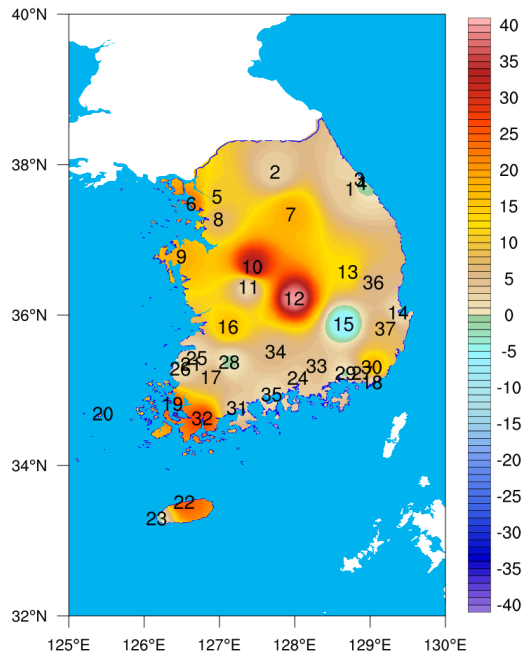


Fig. 3 Horizontal distribution of rMBE averages (%) between forecasted and observed hourly total irradiance from January to May, 2013

Table 1 Station Information and Error statistics for hourly total irradiance forecasted by UM-LDAPS at 12 UTC from January to May, 2013. The meaning of rMBE, rMAE and rRMSE are explained in the main text.

Station Information		Error Statistics		
ID	Station Name	rMBE (%)	rMAE (%)	rRMSE (%)
1	Daegwallyeong	3.9	19.5	28.6
2	Chun Cheon	2.9	20.5	29.0
3	North Gangneung	3.6	18.6	27.5
4	Gangneung	-3.1	19.6	27.4
5	Seoul	10.1	18.9	27.4
6	Incheon	22.8	26.1	32.9
7	Wonju	18.3	25.6	34.9
8	Suwon	7.3	18.4	27.0
9	Seosan	17.6	24.1	33.3
10	Cheongju	34.6	38.0	46.1
11	Daejeon	1.8	19.3	27.4
12	Chupoonyeong	39.3	43.7	51.7
13	Andong	12.8	20.5	27.6
14	Pohang	2.0	17.4	24.2
15	Daegu	-6.9	18.4	23.9
16	Jeonju	15.7	24.0	34.2
17	Gwangju	6.2	17.9	26.6
18	Busan	2.0	16.3	23.6
19	Mokpo	24.2	28.9	37.6
20	Heuksando	8.2	23.0	32.0
21	Gochang	3.1	18.5	27.2
22	Jeju	24.7	32.2	43.3
23	Gosan	-0.1	24.6	33.1
24	Jinju	3.5	16.1	22.7
25	Gochang	1.4	19.7	28.6
26	Yeonggwang	0.6	20.2	28.3
27	Gimhae	5.9	17.0	24.1
28	Sunchang	-0.5	19.0	26.5
29	North Changwon	-0.1	15.4	21.6
30	Yongsan	18.5	25.7	33.1
31	Boseong	3.1	16.3	24.6
32	Gangjin	26.9	33.9	44.4
33	Uilyeong	4.5	16.1	23.0
34	Hamyang	5.2	18.5	27.3
35	Gwangyang	1.4	14.3	20.9
36	Cheongsong	5.8	18.9	26.2
37	Gyeongju	7.9	18.2	25.9
Average	-	8.2	21.2	29.6

Fig. 4는 추풍령과 대구 지점의 시간에 따른 수평면 전일사량의 관측치와 예보치에 대한 2013년 1월부터 5월 까지의 평균치를 시계열의 형태로 나타낸 것이다. 여기서, X축은 예보 시간으로 표시하여 F010은 10시간 예보를 의미한다. 즉, 21 LST에 예보가 시작되었으므로 F010은 10시간 후인 다음날 오전 7시를 나타낸다. 추풍령 지점에서 UM-LDAPS 모델은 모든 예보 시간에 대해서 양의 Bias를 보이고 있다. 특히, 일반적으로 일사량이 강할 때 그 오차는 더욱 커짐을 알 수 있다. 반면 대구 지점에서는 음의 Bias를 보이는데, 주로 낮 시간대에 UM-LDAPS 모델이 수평면 전일사량을 과소모의하고 있다. 태양고도각이 낮은 이른 오전 및 늦은 오후 시간대에는 rMBE는 거의 없다. 다만, 이것은 UM-LDAPS 모델의 오차가 한쪽으로 치우침이 없음을 의미하는 것이지 모델의 성능이 우수함을 의미하지 않는다(이 시간대의 rMAE는 약 20%이다).

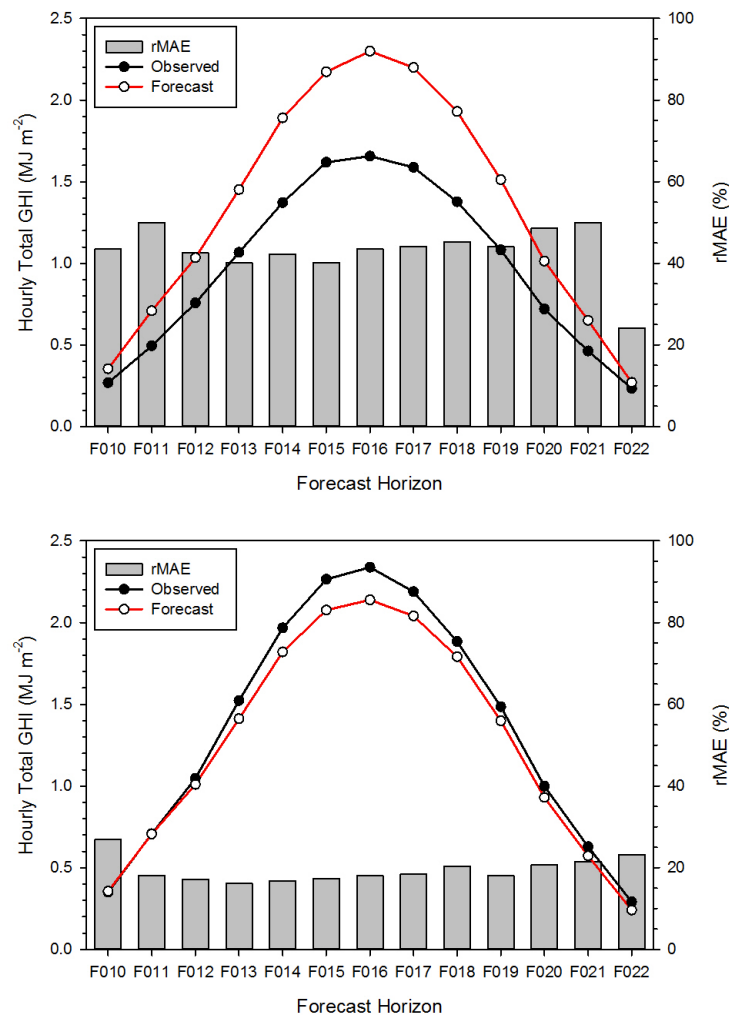


Fig. 4 Averages of hourly total irradiance from observation (black solid line) and forecast (red solid line) and rMAE (% , histogram) as a function of forecast horizon from January to May, 2013 at Chupoonyeong (upper panel) and Daegu (lower panel) station.

5. 토 의

앞서 추풍령 지점과 대구 지점의 서로 다른 오차 특성에 대해서 분석하였다. UM-LDAPS 모델과 같은 수치 예보 모델에서 수평면 전일사량은 구름 및 강수과정에 대한 모수화에 영향을 받으므로 관측된 구름 정보를 통해 구름 특성과 오차와의 관계를 파악할 필요가 있다. 직접 관측된 구름 정보가 없으므로 2.2절에서 기술한대로 UASIBS-KIER 모델에서 생산된 운형과 구름물 광학깊이를 활용하여 2013년 1월부터 5월까지 추풍령 지점과 대구 지점에서 발생한 운형별 상대 빈도수를 Fig. 5에 나타내었다. 두 지점 모두 40% 이상 구름이 없는 맑은 하늘을 보였고, 구름이 있는 경우 가장 많은 빈도수는 중층운이 존재할 때였다. 상층운 또는 하층운이 유입되는 경우는 두 지점 모두 상대적으로 적었다. 두 지점의 운형별 특성이 유사함에도 불구하고 구름물 광학깊이에 따른 오차 특성은 다르다. 추풍령 지점에서는 구름물 광학깊이가 감소함에 따라 rMBE의 크기가 감소한다(Fig. 6). 즉, 구름물 광학깊이가 두꺼운 적은 계열의 구름이 유입될 때 UM-LDAPS 모델은 구름물 광학깊이를 얇게 모의하거나 구름을 생산하지 못함으로써 수평면 전일사량을 과도모의하는 것을 의미한다. 하지만 대구 지점에서는 구름물 광학깊이가 감소함에 따라 rMBE의 크기는 증가한다(Fig. 6). 이것은 UM-LDAPS 모델이 권운 계열의 얇은 구름을 모의하지 못하고 상대적으로 두껍게 모의함으로써 지표로 도달하는 수평면 전일사량이 관측값에 비해 작아짐을 나타낸다.

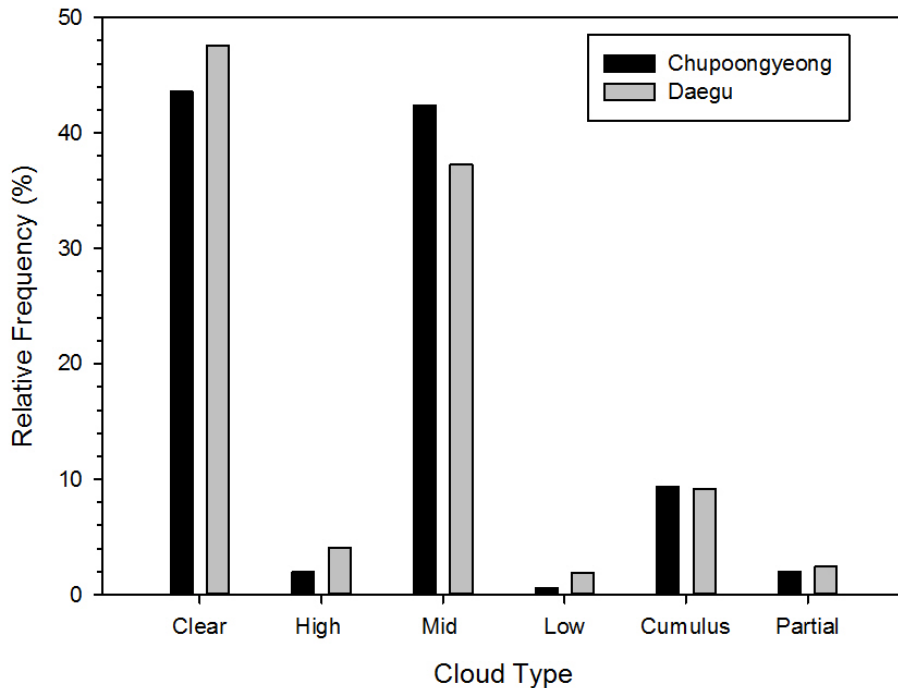


Fig. 5 Relative Frequency of cloud class from the satellite imagery at Chupoongyeong (Black) and Daegu (Grey) station from January to May, 2013. Partial indicates that cloud fraction is lower than 1.

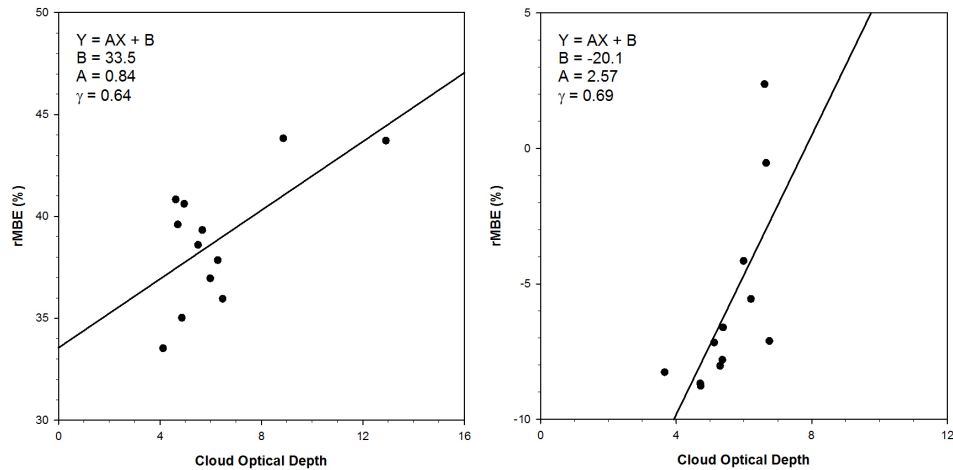


Fig. 6 Scatter plot of hourly mean rMBE and Cloud Optical Depth from January to May, 2013 at Chupoongyeong (Left panel) and Daegu (Right panel) station.

6. 결론

지금까지 UM-LDAPS 모델의 수평면 전일사량에 대한 예보 성능을 평가하였다. 전국적으로 몇몇 지점을 제외하고 rMBE는 양의 값을 나타내어 UM-LDAPS 모델이 수평면 전일사량을 과대모의함을 알 수 있었다. rMBE가 가장 큰 추풍령 지점과 가장 낮은 대구 지점에 대해서 시계열 분석을 하였다. 추풍령 지점에서 UM-LDAPS 모델의 오차는 일사량이 강할 때 더욱 커졌지만, 대구 지점에서는 주로 낮 시간 때 UM-LDAPS 모델의 수평면 전일사량이 관측값에 비해 낮았다. 한편, rMAE는 광양 지점이 14.3%로 가장 낮았고, 추풍령 지점이 43.7%로 가장 높았다. 태양광 발전예보에 UM-LDAPS 모델을 적용하기 위해서는 20%가 넘는 rMAE 또는 rRMSE를 10% 이내로 낮춰야만 한다. rMBE가 큰 지점의 경우 오차의 경향성을 파악하기 용이하기 때문에 향후 Mathiesen and Kleissl (2013)⁶⁾이 제시한 후처리 보정방법을 적용하면 오차를 줄일 수 있을 것으로 기대한다. 따라서 기상청에서 현업 모델로서 매일 주기적으로 생산되는 UM-LDAPS 모델의 결과를 활용하여 신재생에너지 변동성 예측과 같은 분야에 적용하여 전력 계통 안정에 기여할 것으로 사료된다.

후기

본 연구는 한국에너지기술연구원 주요사업(B9-2414)으로 수행한 결과입니다.

REFERENCES

1. Kleissl, J., Solar Energy Forecasting and Resource Assessment, Academic Press, 1st Ed., pp. 416.
2. Diagne, M., David, M., Lauret, P., Boland, J., and Schmutz, N., Review of Solar Irradiance Forecasting Methods and a Proposition for Small-scale Insular Grids, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 27, pp. 65-76, 2013.

3. Lee, Y.-M., J.-H. Bae, and Park, J.-K., A Study on Prediction Techniques through Machine Learning of Real-time Solar Radiation in Jeju, *Journal of Environmental Science International*, Vol. 26, No. 4, pp. 521-527.
4. Korea Meteorological Administration, Evaluation of Numerical Weather Prediction System (2016), TR11-1360709-000001-10, pp. 198, 2016
5. 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.
6. Mathiesen, P. and Kleissl, J., Evaluation of Numerical Weather Prediction for Intra-day Solar Forecasting in the Continental United States, *Solar Energy*, Vol. 85, pp. 967-977, 2011.