



[2019-12-ST-003]

수평면전일사량 상관식을 이용한 2014년까지의 10년 국내 수평면전일사량 계산 정확성 평가

조민철¹⁾ · 김정배^{2)*}

Correlation to Predict Global Solar Radiation and Accuracy Evaluation of that Correlation for Korea during 10 Years to 2014

Min-cheol Cho¹⁾ · Jeongbae Kim^{2)*}

Received 12 June 2019 Revised 3 September 2019 Accepted 4 October 2019

ABSTRACT Several studies have been performed to show how well the horizontal global solar radiation in Korea can be predicted using the Zhang-Huang model proposed in 2002 for China. A previous study proposed a new correlation with a new term for the duration of sunshine, which was proven to be closely related to the hourly solar radiation in Korea, into the Zhang-Huang model. Therefore, this study performed a validation and accuracy estimation of the model for all regions for 2005-2014. Another modified correlation for the regions without measuring the cloud cover was proposed and the accuracy and validity were evaluated. Finally, this study proposed a new correlation that could well predict the hourly and daily total solar radiation for all regions, seasons, and weather conditions, including overcast and clear, with greater accuracy and smaller error than other models proposed previously in Korea.

Key words Hourly horizontal global radiation(시간 수평면전일사량), Prediction of solar radiation(일사량 예측), Meteorological data(기상 데이터), Accuracy(정확도), Error evaluation(오차 평가)

Nomenclature

I_{cal} : calculated solar irradiance, W/m^2
 I_{meas} : measured solar irradiance, W/m^2
 $I_{cal,peak}$: calculated solar irradiance during the peak
time, W/m^2

$I_{meas,peak}$: measured solar irradiance during the peak
time, W/m^2
 I_o : solar constant, $1355 W/m^2$
 h : solar altitude angle, degree
 CC : cloud cover, 0-10
 $T_{db,n}, T_{db,n-3}$: dry-bulb temperature at n & $n-3$ hours, $^{\circ}C$
 RH : relative humidity, %
 V_w : wind speed, m/s
 t_{ds} : duration of sunshine, 0-1
 d, k : locality coefficient
 n : number of data

1) Bachelor Candidate, Department of Automotive Engineering,
Korea National University of Transportation

2) Professor, Department of Automotive Engineering, Korea
National University of Transportation

*Corresponding author: jeongbae_kim@ut.ac.kr

Tel: +82-43-841-5282 Fax: +82-43-841-5280

1. 서론

우리나라의 신재생에너지 자원의 부존량의 평가와 평가 결과를 활용하는 예측 상관식을 제시하는 것은 매우 중요하다. 특히 신재생에너지의 대표 분야 중의 하나인 태양에너지 분야는 태양에너지 자원량의 정확한 예측이 매우 필요하고 또한 중요하다.

Jo and Kang은 1982~2008년까지의 전국 16개 지역에서의 측정된 수평면전일사량을 기준으로 온도, 습도, 일조 시간과 운량 중에서 운량을 선택하여 월평균 1일 대기권 밖 일사량과 수평면전일사량과의 비를 지역별로 제시하였다^[1].

Jo *et al.*은 1982~2010년까지의 전국 16개 지역에서의 수평면전일사량 측정값을 이론적으로 예측하는 식과 비교하고, 이를 보정하기 위하여 16개 지역에서 측정하고 있는 건구 온도, 상대 습도, 일조시간과 운량 중에서 운량과 일조시간을 선택하여 월평균 1일 대기권 밖 일사량과 수평면 전일사량과의 비를 지역별로 제시하였다. 또한, 논문의 결론에서 제시하는 것과 같이 현재 기상청에서 측정하고 있는 일조, 운량, 건구 온도, 상대습도 전체를 고려하는 일사량과의 관계 규명 이후에 기상관측 변수를 포함하는 일사량 예측식의 필요성을 강조하였다^[2].

기상 측정 데이터를 이용하여 중국의 시간별 수평면전일사량을 예측하기 위해 Zhang&Hwang은 운량, 건구온도, 상대습도, 및 풍속을 포함하는 식 (1)을 제안하였고 중국 전역(북경에서 광주까지)에 대해 일정한 계수로서 높은 정확도를 얻을 수 있음을 보여주었다^[3].

$$I = [I_o \sin(h) \left\{ \begin{array}{l} \beta_0 + \beta_1(CC) + \\ \beta_2(CC)^2 + \\ \beta_3(T_{db,n} - T_{db,n-3}) + \\ \beta_4RH + \beta_5V_w \end{array} \right\} + d]/k \quad (1)$$

$$d = -17.853, k = 0.843, \\ \beta_0 = 0.5598, \beta_1 = 0.4982, \beta_2 = -0.6762, \\ \beta_3 = 0.02842, \beta_4 = -0.00317, \beta_5 = 0.014$$

또한 Zhang&Hwang 모델(Z&H 모델)을 기본으로 하여 미국의 텍사스주에 대하여 새로운 계수를 찾고, 새롭게 얻어진 계수를 이용하여 텍사스주의 대부분의 지역에 대하여 수평면전일사량의 예측이 정확할 수 있음을 확인하였다^[4].

특히, Kim and Kim은 수평면전일사량의 측정지역은 전국적으로 15개 지역(춘천, 강릉, 서울, 원주, 서산, 청주, 대전, 포항, 대구, 전주, 광주, 진주, 부산, 목포, 제주)뿐이지만, 건구온도 등을 포함하는 기상 관측데이터의 측정 개소는 300개 이상이므로, 태양에너지 분야의 보급사업의 수행지역이 확대됨에 따라 태양광 및 태양열 시스템의 설계를 위한 기초 자료로서 해당지역에 대한 정확한 일사량 예측자료가 필요함을 제시하였다^[5].

Kim and Kim은 시간에 따른 정확한 일사량의 예측을 위한 다양한 기존의 연구결과들을 평가하여 건구온도, 상대습도, 일조시간 및 운량의 기상 관측 변수를 포함하는 예측식이 필요하고, 수평면전일사량을 예측하기 위하여 전국 혹은 위도별로 적용 가능한 한국형 모델식이 필요함을 제안하였다^[5,6].

이를 통해, [7]에서 2012년 국내에서 운량을 측정하고 있는 15개 지역에 대하여 저자들이 제안한 식 (2)(이하, 운량 일사량 모델식)의 수평면전일사량 예측 상관식을 활용하여 정확성과 적용 가능성을 평가하였다.

$$I = I_o \sin(h) \left\{ \begin{array}{l} \beta_0 + \beta_1(CC) + \beta_2(CC)^2 + \\ \beta_3(T_{db,n} - T_{db,n-3}) + \beta_4RH + \\ \beta_5V_w + \beta_6t_{ds} \end{array} \right\} \quad (2)$$

$$\beta_0 = 0.3248, \beta_1 = 0.128, \beta_2 = -0.210, \beta_3 = -0.00581, \\ \beta_4 = -0.131, \beta_5 = 0.00736, \beta_6 = 0.388$$

이어 [8]에서 국내 93개 기상 관측 지역 중에서 운량을 측정하고 있지 않는 54개 지역을 위해 제안되었던 식 (2)를 수정한 예측 상관식 식 (3)(이하, 비운량 일사량 모델식)을 제시하고, 동일한 방법으로 일사량은 측정하지만 운량을 측정하지 않는 14개 지역(강릉, 강진, 경주, 고창군, 광양, 김해, 보성, 북창원, 순창, 양산, 영광, 의령, 청송, 함양)에 대하여 적용 가능성과 정확도를 평가하였다.

$$I = I_o \sin(h) \left\{ \begin{array}{l} \beta_0 + \beta_1(T_{db,n} - T_{db,n-3}) + \\ \beta_2RH + \beta_3V_w + \beta_4t_{ds} \end{array} \right\} \quad (3)$$

$$\beta_0 = 0.44645, \beta_1 = -0.0147, \beta_2 = -0.327, \\ \beta_3 = 0.00362, \beta_4 = 0.391$$

이에, 본 연구에서는 이미 제안된 시간에 따른 수평면전일사량 예측 상관식(KKP 모델) 식 (2)를 활용하여 일사량과 운량을 동시에 측정하고 있는 21개 지역(강릉, 고창, 고창군, 광주, 대구, 대전, 목포, 부산, 북강릉, 서산, 서울, 수원, 안동, 원주, 인천, 전주, 제주, 진주, 청주, 춘천, 포항)에 대하여 2005~2014년의 각 365일에 대하여 계산하고 식 (2)의 예측 정확도를 평가하였다.

아울러 일사량은 측정하지만 운량을 측정하지 않고 있는 13개 지역(강진, 경주, 고창군, 광양, 김해, 보성, 북창원, 순창, 양산, 영광, 의령, 청송, 함양)에 대하여 비운량 일사량 모델식 식 (3)을 수정한 모델식 식 (10)을 이용하여 2009~2014년의 각 365일에 대하여 계산하고 식 (10)의 예측 정확도를 평가하였다. 또한 본 연구에서 이용한 모든 기상 데이터들은 기상청이 운영하는 “기상자료개방포털”의 시간별 데이터이다.

2. 운량 일사량 모델의 예측 정확도 및 오차 평가

2005~2014년 각 12개월 동안 총 21개 지역에서 측정된 1일 총 수평면전일사량 측정값과 식 (2)를 이용하여 계산된 예측값을 비교하여 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1~4에 표시된 붉은 선은 100% 선이며, 위쪽 푸른 선은 +20%, 아래쪽은 -20%의 오차선을 나타낸다.

그림에서와 같이 1일 총 수평면전일사량에 대한 일치율

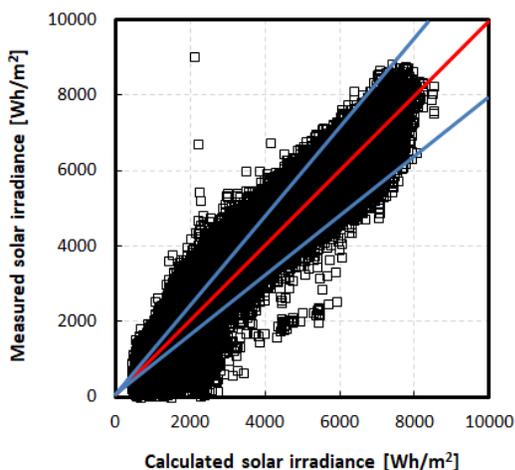


Fig. 1. Solar radiation comparison for 2005~2014 yr. using KKP model ($R^2=92.1\%$)

(D_{total} , 식 (4) 참조)로 평가된 KKP 모델의 예측 정확도는 평균 약 97.7%이었으며, 10년의 21개 지역에 대한 76,650개의 1일 총 수평면전일사량 데이터 중에서 일부 누락된 데이터를 제외한 67,777개의 데이터에 대하여 약 77.9%의 데이터들이 $\pm 20\%$ 수준 이내인 것으로 확인되었다.

기상청에서 측정한 1일 24시간 동안의 시간별 수평면전일사량 중에서 가장 높은 값인 피크 측정값과 그 시간에 해당하는 기상데이터로 식 (2)에서 계산된 피크 예측값을 비교하여 Fig. 2에 나타내었다. 또한, 수평면전일사량 피크 일치율(D_{peak} , 식 (5) 참조)로 평가된 KKP 모델의 일사량 피크 예측 정확도는 평균 약 92.1%이었으며, 1일 총 수평면전일사량에 대한 경향과 유사하게 약 76.8%의 데이터들이 $\pm 20\%$ 이내인 것으로 평가되었다.

KKP 모델에 대한 수평면전일사량의 예측 정확도와 오차 특성을 평가하기 위하여 식 (4)와 같이 1일 총 수평면전일사량 일치율(D_{total}), 식 (5)와 같이 일일 일사량 피크 일치율(D_{peak}), 식 (6)과 같이 MBE(Mean bias error) 그리고 식 (7)과 같이 RMSE(Root mean square error)를 고려하였다. 여기서, ΣL_{cal} 는 측정 1일 총 수평면전일사량이며, ΣL_{meas} 는 예측 1일 총 수평면전일사량을 나타낸다.

특히, 식 (5), (8), (9)와 같이 다른 일사량 예측 모델 연구에서 고려하지 않았던 일일 24시간 내에서 수평면전일사량의 최댓값과 동일 시간에서의 계산값을 추가로 비교하여 평가하였다.

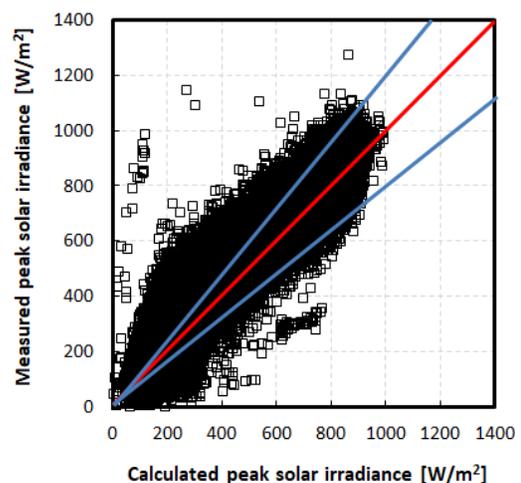


Fig. 2. Solar radiation peak comparison for 2005~2014 yr. using KKP model ($R^2=87.7\%$)

$$D_{total} = \frac{\sum I_{cal}}{\sum I_{meas}} \times 100 \quad (4)$$

$$D_{peak} = \frac{I_{cal,peak}}{I_{meas,peak}} \times 100 \quad (5)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (\sum I_{cal} - \sum I_{meas})}{n} \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sum I_{cal} - \sum I_{meas})^2}{n}} \quad (7)$$

$$Peak\ MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (I_{cal,peak} - I_{meas,peak})}{n} \quad (8)$$

$$Peak\ RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_{cal,peak} - I_{meas,peak})^2}{n}} \quad (9)$$

KKP 모델을 식 (4)에서 식 (9)까지의 정확도와 오차 평가식에 대하여 평가한 결과를 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Prediction accuracies and errors for KKP model to calculate solar radiation

Model	D _{total} [%]	D _{peak} [%]	MBE [Wh/m ²]	RMSE [Wh/m ²]	Peak MBE [W/m ²]	Peak RMSE [W/m ²]
KKP	97.7	92.1	-11.1	77.8	-59.64	94.03

3. 비운량 일사량 모델의 예측 정확도 및 오차 평가

현재 기상청에서 제시하고 있는 기상 관측 자료를 확인 해 본 결과, 기상 데이터를 측정하고 있는 93개 지역 중 54개 지역이 운량을 측정하지 않음을 확인할 수 있었다. 이러한 54개 지역에 대하여 수평면전일사량을 예측하기 위해 제안하였던 KKP 비운량 모델인 식 (3)의 계수들은 KKP 모델인 식 (2)를 기준식으로 하여 운량 변수를 제외하고, 기상청에서 일사량은 측정하지만 운량은 측정하지 않는 14개 지역의 2012년 12개월 기상 관측 자료로부터 회귀분석을 통하여 얻어진 것이었다. 이 식 (3)의 정확도를 높이기 위하여 동일한 방법으로 2009~2014년 비운량 측정 지역 전체의 데이터들을 활용하여 식 (10)의 계수들로 수정하였

다. 2009년 이후의 데이터의 추가에 의한 식 (10)의 예측 결과는 식 (3)의 식 (4)에 의한 예측 정확도인 95.0%에서 98.9%로 정확도가 3.9% 정도 높아졌다.

$$I = I_o \sin(h) \left\{ \beta_0 + \beta_1 (T_{db,n} - T_{db,n-3}) + \beta_2 RH + \beta_3 V_w + \beta_4 t_{ds} \right\} \quad (10)$$

$$\beta_0 = 0.36891, \beta_1 = -0.0039313, \beta_2 = -0.258003, \beta_3 = 0.00370125, \beta_4 = 0.444241$$

2009~2014년 동안 평균 11개 지역에서 측정된 1일 총 수평면전일사량 측정값과 식 (10)을 이용하여 계산된 예측값을 비교하여 Fig. 3에 나타내었다.

평균 11개 지역의 1일 총 수평면전일사량에 대한 일치율(D_{total}, 식 (4) 참조)로 평가된 KKP 비운량 모델의 예측 정확도는 평균 약 98.9%이었으며, 25,023개의 데이터에 대하여 약 72.2%의 데이터들이 ±20% 수준 이내인 것으로 평가되었다.

2009~2014년 12개월 전체와 13개 지역의 측정된 1일 동안의 수평면전일사량 피크 측정값과 식 (10)을 이용하여 계산된 피크 예측값을 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. 또한, 수평면전일사량 피크 일치율(D_{peak}, 식 (5) 참조)로 평가된 KKP 비운량 모델의 예측 정확도는 평균 약 93.0%이었으며, 1일 총 수평면전일사량에 대한 경향과 유사하게 약 74.4%의 데이터들이 ±20% 수준 이내인 것으로 평가되었다.

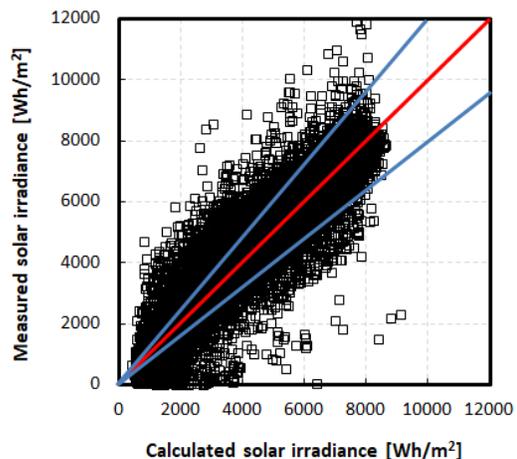


Fig. 3. Solar radiation comparison for 2009~2014 yr. using modified KKP model (R²=86.7%)

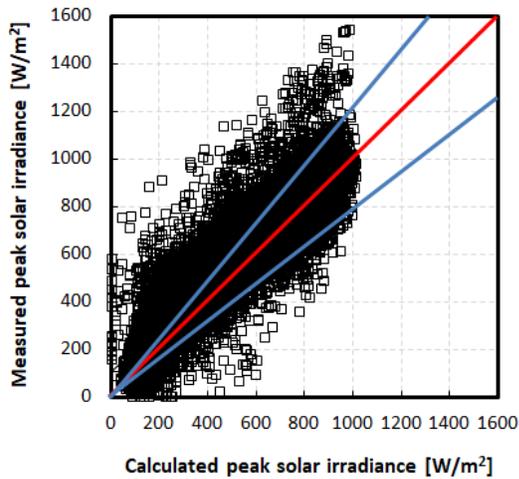


Fig. 4. Solar radiation peak comparison for 2009~2014 yr. using modified KKP model ($R^2=82.8\%$)

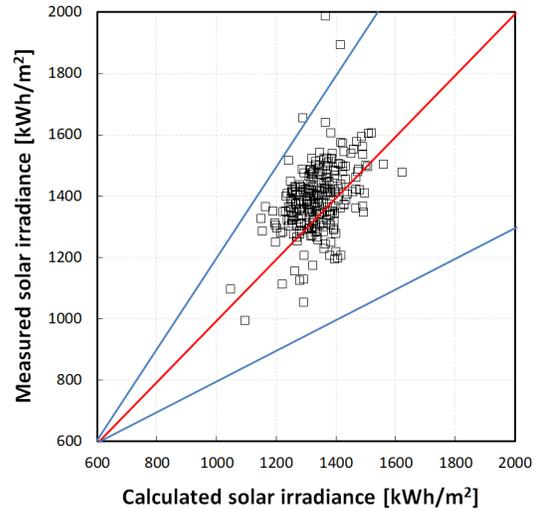


Fig. 5. Annual solar radiation comparison for 2009~2014 yrs

Table 2. Prediction accuracies and errors for modified KKP model to calculate solar radiation

Model	D_{total} [%]	D_{peak} [%]	MBE [Wh/m^2]	RMSE [Wh/m^2]	Peak MBE [W/m^2]	Peak RMSE [W/m^2]
KKP	98.9	93.0	-13.9	88.9	-60.93	98.47

KKP 비운량 모델도 마찬가지로 식 (4)에서 식 (9)까지의 정확도와 오차 평가식에 대하여 평가한 결과를 Table 2에 나타내었다.

4. 모델식의 연간 계산 결과의 정확성

2005년부터 2014년까지 Table 3과 같이 고려된 각 지역에서 측정된 각 시간별 수평면전일사량을 일년 전체로 더한 1년 총 수평면전일사량 측정값에 대하여 식 (2)와 식

(10)을 이용하여 계산 예측값의 연도별 정확도를 식 (4)의 개념으로 평가하여 Table 4에 나타내었다. 연도별 정확도는 특정 년도의 각 지역에 대하여 정확도를 계산하고, 이를 이용하여 전체 지역에 대한 평균과 표준편차를 구하는 방식으로 얻어졌다.

Table 3에서와 같이, 평균적으로 96.7%의 정확도를 나타내었다. 이와 함께, 지역별 연도별 일년 총 수평면전일사량의 측정값과 계산값의 경향을 Fig. 5에 나타내었다. 계산값이 측정값에 비하여 약간 낮게 예측하고 있음을 확인할 수 있다.

특히, 일년 총 수평면전일사량 계산값의 정확도가 가장 높은 2006년(99.6%)과 가장 낮은 2010년(92.9%)에 측정된 기상 데이터를 이용하여 일조시간(0~1)과 운량(0~10) 사이의 Error data(시간에 따라 일조시간과 운량의 변화는 물리적으로 반비례의 측정 결과로 나타나야 하는데, 실

Table 3. Number of region considered for calculating yearly accuracy

Year	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
# for eq.(2)	18	18	18	18	19	19	19	19	19	20
# for eq.(10)	-	-	-	-	6	7	13	13	13	13

Table 4. Annual mean prediction accuracy and standard deviation for KKP models to calculate solar radiation

Items	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Accuracy [%]	98.5	99.6	98.3	93.7	94.7	92.9	93.2	97.4	99.6	98.6
Stdev. [%]	4.9	7.1	6.3	4.6	6.1	6.7	6.7	8.2	7.2	8.8

제 시간별로 일조시간과 운량의 데이터가 비례하는 경향을 가지는 데이터) 개수를 평가한 결과 전 지역의 일년 평균 Error data 개수가 2006년과 2010년에 각각 156개와 367개로 확인되었다. 즉, 측정된 일조시간과 운량의 데이터들 간의 비례 상관성이 높으면 계산 정확도가 높아지고, 비례 상관성이 낮으면 정확도가 낮아짐을 알 수 있었다.

따라서 일반적으로 관측자의 목적에 의해 행하여지는 운량 관측에 있어서 합리적인 정보를 제공할 수 있는 운량 측정 방법에 대한 보완이 필요한 것으로 판단된다.

5. 결론

전국의 2005~2014년 약 18개 지역의 측정 수평면전일사량과 기상데이터의 측정 결과를 이용하여 본 연구에서 제안한 계산 모델을 활용한 계산을 통해 아래와 같은 결론을 도출하였다.

- 1) KKP 모델의 1일 총 수평면전일사량의 예측 정확도는 평균적으로 약 97.7% 수준이었으며, 1일 피크 시간에서의 예측 정확도는 약 92.1%, MBE(-11.1 Wh/m²), RMSE(77.8 Wh/m²), Peak MBE(-59.64 W/m²), Peak RMSE(94.03 W/m²)을 나타내어 전국적으로 위치 및 기상 조건에 관계없이 적용 가능성이 매우 높음을 알 수 있었다. KKP 모델식은 고도각, 운량, 건구온도, 상대습도, 풍속 및 일조시간을 고려하는 비선형 식으로 아래와 같다.

$$I = I_0 \sin(h) \left\{ \beta_0 + \beta_1(CC) + \beta_2(CC)^2 + \beta_3(T_{db,n} - T_{db,n-3}) + \beta_4 RH + \beta_5 V_w + \beta_6 t_{ds} \right\}$$

$$\beta_0 = 0.3248, \beta_1 = 0.128, \beta_2 = -0.210, \beta_3 = -0.00581, \beta_4 = -0.131, \beta_5 = 0.00736, \beta_6 = 0.388$$

- 2) 현재 국내의 다수 지역의 운량 측정 결과가 없는 상황을 고려하여 기존에 제안되었던 KKP 모델을 수정한 비운량 모델을 아래와 같이 제시하였다.

$$I = I_0 \sin(h) \left\{ \beta_0 + \beta_1(T_{db,n} - T_{db,n-3}) + \beta_2 RH + \beta_3 V_w + \beta_4 t_{ds} \right\}$$

$$\beta_0 = 0.36891, \beta_1 = -0.0039313, \beta_2 = -0.258003, \beta_3 = 0.00370125, \beta_4 = 0.444241$$

수정된 KKP 비운량 모델의 1일 총 수평면전일사량 예측 정확도는 KKP 모델과 유사하게 98.9%이었고, 1일 피크 시간에서의 예측 정확도 93.0%, MBE(-13.9 Wh/m²), RMSE(88.9 Wh/m²), Peak MBE(-60.93 W/m²), Peak RMSE(98.47 W/m²)이었다.

- 3) 향후 2004년 이전의 각 지역별 일사량을 포함한 기상 관측 데이터 확보와 함께 제안된 상관식들의 정확도 평가가 추가적으로 필요하며, 일별, 월별, 연도별 수평면전일사량 특성 및 기상데이터와의 관계를 분석하고자 한다.

Kim and Kim은 건구온도, 풍속, 상대습도, 일조시간, 운량 등의 기상 데이터 중에서 특히, 일조시간과 운량이 일사량과 높은 상관성을 보인다고 강조하였다^[1]. 보다 높은 정확도를 확보하기 위해서는 기상청에서 제공하고 있는 일조시간과 운량데이터의 정확성 혹은 신뢰성을 평가하는 것은 매우 중요하다.

References

- [1] Jo, D.K. and Kang, Y.H., 2010, "A Study on the Solar Radiation Estimation of 16 Areas in Korea Using Cloud Cover", J. Korean Solar Energy, **30**(4), 15-21.
- [2] Jo, D.K., Yun, C.Y., Kim K.D. and Kang, Y.H., 2012, "A Study on the Estimating Solar Radiation in Korea Using Cloud Cover and Hours of Bright Sunshine", J. Korean Solar Energy, **32**(2), 28-34.
- [3] Zhang, Q., Joe, H., and Lang, S., 2002, "Development of Typical Year Weather Files for Chinese locations", ASHRAE Transactions, **108**(2), 1063-1075.
- [4] Kim, K.H., Baltazar, J.C. and Haberl, J.S., 2014, "Evaluation of Meteorological Base Models for Estimating Hourly Global Solar Radiation in Texas", Energy Procedia, **57**, 1189-1198.

- [5] Kim, H.Y. and Kim, J., 2016, "Prediction Correlation of Solar Insolation using Relationships between Meteorological Data and Solar Insolation in 2012(I)", J. Korean Solar Energy, **36**(1), 1-9.
- [6] Kim, H.Y. and Kim, J., 2016, "Correlation to Predict Global Solar Insolation and Evaluation of that Correlation for Korea(I)", New. Renew. Energy, **12**(S2), 30-35.
- [7] Park, S. M. and Kim, J., 2016, "Correlation to Predict Global Solar Insolation and Evaluation of that Correlation for Korea(II)", New. Renew. Energy, **12**(4), 24-29.
- [8] Park, S.M. and Kim, J., 2016, "The Time Variant Prediction of Solar Irradiation using Meteorological Observation Data(II)", Spring Conference Proceedings of KSES, **38**.