



[2016-10-PV-005]

표준기상년 데이터의 법선면 직달일사량 불확도에 대한 고찰

김신영¹⁾ · 이현진²⁾ · 김현구^{1)*} · 장길수³⁾ · 윤창열¹⁾ · 강용혁¹⁾ · 강주식⁴⁾ · 최종오⁴⁾

A Study on Uncertainty to Direct Normal Irradiance of Typical Meteorological Year Data

Shinyoung Kim¹⁾ · Hyunjin Lee²⁾ · Hyungoo Kim^{1)*} · Gilsoo Jang³⁾ · Changyeol Yun¹⁾ · Yongheack Kang¹⁾ · Chushik Kang⁴⁾ · Jongoh Choi⁴⁾

Received 31 May 2016 Revised 3 August 2016 Accepted 3 August 2016

ABSTRACT Typical meteorological year (TMY) data consist of hourly values of solar radiation and meteorological elements over a 1 year period. This reflects the long term meteorological characteristics because it is derived from a long term meteorological database. The data were produced by applying the Sandia method and weighting factor of National Renewable Energy Laboratory (NREL) by new and renewable energy resource center in Korea Institute of Energy Research (KIER), and it was registered as the qualified reference standards in 2015. The reliability of the solar radiation is important as weighting factor of the solar radiation in the TMY data is 50%. The hourly global horizontal irradiance (GHI) among the solar radiation was provided by Korea Meteorological Administration (KMA), and direct normal irradiance (DNI) was predicted by applying Reindl-2 model.^[3] The uncertainty of the DNI is higher than the experimental value as it is a predicted value. The GHI, extra-terrestrial radiation, and zenith angle were surmised as the principal factors of uncertainty. The uncertainty on the zenith angle was highest among the 3 factors. The procedure of the uncertainty evaluation obeyed the guide to the expression of uncertainty in the measurement (GUM).^[8] The uncertainty on the DNI of TMY data in Daejeon was calculated and analyzed in this paper.

Key words Typical Meteorological Year Data(표준기상년 데이터), Direct Normal Irradiance(법선면 직달일사량), Zenith Angle(천정각), Uncertainty(불확도), Reference Standards(참조표준)

Nomenclature

c_i : correlation coefficient

FS_i : finkelstein-schafer statistic for index

I_d : total diffuse irradiance on a horizontal surface, W/m^2

I_n : direct normal irradiance, W/m^2

I_o : extraterrestrial radiation, W/m^2

I_{sc} : solar constant, $1367 W/m^2$

I_t : global solar irradiance, W/m^2

k_d : diffuse fraction, dimensionless

k_t : clearness index, dimensionless

n_{FS} : the number of daily readings in a month

1) Korea Institute of Energy Research E-mail: hyungoo@kier.re.kr
Tel: +82-42-860-3376 Fax: +82-42-860-3543

2) Kookmin University

3) Korea University

4) Korea Research Institute of Standards and Science

- n : day of the year
 U : uncertainty
 w_i : weighting for index
 x_i : i th ordered sample value
 δ_i : absolute difference between the long-term CDF and the candidate month CDF at x_i
 δ : declination, degrees
 ϕ : latitude, degrees
 θ_z : zenith angle, degrees
 ω : hour angle, degrees
 sp : spring
 su : summer
 f : fall
 w : winter

subscript

- CDF : cumulative distribution function
 DNI : direct normal irradiance
 FS : finkelstein-schafer
 GHI : global horizontal irradiance
 GUM : guide to the expression of uncertainty in measurement
 KIER : korea institute of energy research
 KMA : korea meteorological administration
 NREL : national renewable energy laboratory
 TMY : typical meteorological year
 WS : weighted sum

1. 서론

신재생에너지를 활용한 시스템의 발전량 및 효율에 대한 사전 평가를 하기 위해서는 기본적으로 신뢰성 있는 표준 기상년 데이터가 필요하다. 표준기상년 데이터는 장기간 축적된 기상데이터베이스를 바탕으로 각 월마다 기상의 장기 특성을 반영하는 대표월을 선정하여 제작한 시간 간격의 연간 기상데이터이다. 기본적으로 일사량과 건구온도,

습구온도, 풍속 등 다양한 기상요소를 포함한다. 본 논문에서 쓰인 표준기상년 데이터는 한국에너지기술연구원의 데이터^[1]로, 2015년 유효참조표준데이터로 등록된 데이터이다. 1991년 1월 1일로부터 2010년 12월 31일까지 20년간의 장기 기상 데이터베이스를 바탕으로, Sandia method (1978)^[2]를 이용하고, NREL의 가중치^[2]를 적용하여 제작되었다. Table 1의 기상 요소별 가중치를 보면 일사량의 가중치가 50%로 다른 요소들에 비해 비중이 높음을 알 수 있다. 일사량은 기상요소들 중에서 차지하는 비중이 가장 크므로 표준기상년 데이터가 신재생에너지 중 일사량의 영향을 많이 받는 태양광, 태양열 등 태양에너지 분석에 적합한 데이터임을 유추할 수 있다. 수평면 전일사량 및 건구온도, 습구온도 등의 데이터는 기상청으로부터 제공받은 측정 데이터를 이용하였으며, 법선면 직달일사량의 경우, Reindl-2 model(1990)^[3]를 이용하여 예측하였다. Liu & Jordan (1960)^[4]을 비롯한 다양한 성분별 관계식이 있지만^[5] 한국에너지기술연구원에서 2007~2009년 측정된 대전의 수평면 전일사량 데이터를 이용한 검증 결과 Reindl-2 model^[3]의 RMSE가 70.29W/m²로 가장 정확한 것으로 밝혀졌다.^[6] Reindl-2 model^[3]에서는 k_t 의 구간에 따른 k_t 와 k_d 의 관계식을 통해 I_d 를 구하고, 이를 이용하여 법선면 직달일사량을 구하기 때문에 k_t 와 k_d 의 상관관계가 중요하다. [3]에 의하면 미국과 유럽 내 총 6개 지점의 각각 1년 이상의 측정 기간 동안 수평면 전일사량, 산란 일사량 혹은 법선면 직달일사량, 주위온도, 습구온도 혹은 이슬점 온도의 실측 데이터를 바탕으로 k_d 에 영향을 미치는 주요 변수를 선별

Table 1. Weighting values for FS statistics^[2]

기상 요소	Sandia Method	NREL TMY
수평면 전일사량	12/24	5/20
법선면 직달일사량	0	5/20
건구온도 최대값	1/24	1/20
건구온도 최소값	1/24	1/20
건구온도 평균값	2/24	2/20
습구온도 최대값	1/24	1/20
습구온도 최소값	1/24	1/20
습구온도 평균값	2/24	2/20
풍속 최대값	2/24	1/20
풍속 평균값	2/24	1/20

하기 위해 단계적 회귀분석을 했다. 이를 통해 회귀식의 변곡점이 생기는 지점을 기준으로 k_t 의 구간을 세 구간으로 나누었으며, k_d 에 영향을 미치는 주요 변수가 k_t 와 태양 고도임을 밝혀냈다. 또한 본 모델식은 지역적, 계절적인 영향을 받을 수 있지만 이러한 요인들은 k_d 와 k_t , 그리고 태양 고도의 상관성에 매우 낮은 영향을 미칠 것이라고 밝히고 있다. 이에 본 논문의 대상 지점인 우리나라 대전 지점에도 동일한 세 구간으로 나누어 Reindl-2 model을 적용했으며, 법선면 직달일사량 실측 데이터와 예측 데이터의 비교를 통해 회귀식의 설명력 R^2 가 0.937로 그 상관성이 매우 높음을 확인했다.

법선면 직달일사량은 예측한 값이기에 실측값보다 더 많은 불확실성이 존재한다. 특히 태양열을 활용한 건물 냉난방 설비의 성능을 평가하기 위해 표준기상년 데이터를 활용할 때 태양열 시스템에 영향을 미치는 주요소는 법선면 직달일사량이기 때문에 이에 대해 신뢰할 수 있는 범위를 예측하는 것은 필수적인 일이다. 하지만 국내에서 배포하고 있는 표준기상년 데이터 중 대표적인 태양에너지학회의 대한민국의 표준기상년 데이터^[7]를 보면 데이터를 신뢰할 수 있는 범위가 기재되어 있지 않다. 또한, 한국에너지기술연구원의 표준기상년 데이터^[1]의 법선면 직달일사량과 비교를 해보면 태양에너지학회의 법선면 직달일사량은 한국에너지기술연구원의 법선면 직달일사량에 비해 전반적으로 낮은 경향을 보이며, RMSE 196.76W/m²의 차이가 있다. 이에 본 논문에서는 한국에너지기술연구원 표준기상년 데이터^[1]의 법선면 직달일사량에 대한 신뢰성을 검증하고 신뢰할 수 있는 범위를 알고자 불확도의 요인을 분석, 산출하고 그 결과를 분석했다. 불확도 평가 절차는 GUM^[8]을 준수하였으며, 국내에서 일사량이 비교적 높은 대전 지점(위도: 36°37', 경도: 127°37')을^[9] 대상 지점으로 선정하였다. 불확도 평가 결과를 다양한 관점에서 해석해보기 위해, 법선면 직달일사량의 증가에 따른 불확도와 불확도 비의 변화, 그리고 k_t 의 구간에 따른 k_d 와 법선면 직달일사량, 불확도의 변화 양상을 분석했다. 또한 이러한 변화 양상에 대하여 계절적 차이를 알아보기 위해 계절에 따른 결과를 비교, 분석했다.

2. 방법론

2.1 표준기상년 데이터

2.1.1 Sandia Method^[2]

1) Sandia method 제작 단계

① FS 통계(1971)^[10]를 이용하여 각 기상요소 별로 장, 단기 누적분포함수를 계산한다. 가중치 w_i 를 고려한 10개 기상요소의 FS 합 기준으로 가장 낮은 값을 갖는 5개 후보월을 선정한다.

$$FS = \frac{1}{n_{FSi=1}} \sum_{i=1}^{n_{FS}} \delta_i \quad (1)$$

$$WS = \sum w_i FS_i \quad (2)$$

② 장기 평균값과 중앙값에 대한 근접성을 기준으로 5개 후보월에 등급을 부여한다.

③ 평균 건구온도와 수평면 전일사량의 장기 데이터를 바탕으로 지속성이 없는 후보월은 제외하고 2단계의 높은 등급을 가진 월을 대표월로 선정한다.

④ 선택한 12개 대표 월을 연결하여 표준기상년 데이터를 제작한다. 연결 시에, 월간 접점에서 발생하는 불연속성을 제거하기 위해 6시간 데이터는 선형 보간 하여 사용한다.

2.1.2 Reindl-2 model^[3,5,11]

시간별 법선면 직달일사량 I_n 을 구하기 위해 먼저 실측한 시간별 수평면 전일사량 I_t 를 이용하여 k_t 를 구한다.^[5]

$$k_t = \frac{I_t}{I_o} \quad (3)$$

여기서 수평면 대기권 밖 일사량 I_o 는 다음과 같다.^[11]

$$I_o = I_{om} \cos \theta_z \\ = I_{sc} (1.00011 + 0.034221 \cos B + 0.00128 \sin B + 0.000719 \cos 2B + 0.000077 \sin 2B) \cos \theta_z \quad (4)$$

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (5)$$

$$B = (n-1) \frac{360}{365} \quad (6)$$

k_t 의 구간에 따른 k_d 는 다음과 같다.^[3,5]

$$k_d = \frac{I_d}{I_t} \quad (7)$$

$$\frac{I_d}{I_t} = 1.02 - 0.254k_t + 0.0123\cos\theta_z \quad (k_t \leq 0.3) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{I_d}{I_t} &= 1.4 - 1.749k_t + 0.177\cos\theta_z \quad (0.3 < k_t < 0.78) \\ &= 0.486k_t - 0.182\cos\theta_z \quad (k_t \geq 0.78) \end{aligned}$$

최종적으로 시간별 법선면 직달일사량 I_n 은 다음과 같다.

$$I_n = I_t(1 - k_d)/\cos\theta_z \quad (9)$$

2.2 불확도 평가 절차^[3,5,8]

법선면 직달일사량을 구하는 수식 (9)에서 측정값은 시간별 수평면 전일사량 I_t 이며, 계산값은 직달성분의 대기권 밖 일사량 I_{on} , 코사인 천정각 $\cos\theta_z$ 이다. 이 세 가지 요소는 법선면 직달일사량의 주요한 불확도 요인으로 추정된다. 이에 시간별 법선면 직달일사량 I_n 에 대한 불확도 평가 절차는 다음과 같다.

2.2.1 모델식 수립

시간별 법선면 직달일사량의 모델식은 다음과 같이 k_t 의 범위에 따른 세 구간의 모델식으로 나뉘어진다.

1) $k_t \leq 0.3$ 인 경우

$$y = I_n = \frac{0.254}{I_{on}\cos^2\theta_z} I_t^2 - (0.0123 + \frac{0.02}{\cos\theta_z}) I_t \quad (10)$$

2) $0.3 < k_t < 0.78$ 인 경우

$$y = I_n = \frac{1.749}{I_{on}\cos^2\theta_z} I_t^2 - (0.177 + \frac{0.4}{\cos\theta_z}) I_t \quad (11)$$

3) $k_t \geq 0.78$ 인 경우

$$y = I_n = -\frac{0.486}{I_{on}\cos^2\theta_z} I_t^2 + (0.182 + \frac{1}{\cos\theta_z}) I_t \quad (12)$$

2.2.2 표준불확도

법선면 직달일사량 모델식의 변수이며 주요 불확도 요인인 수평면 전일사량, 직달성분의 대기권 밖 일사량, 그리고 코사인 천정각에 대한 표준불확도를 구한다. 시간별 수평면 전일사량은 기상청에서 1분마다 수신된 누적 일사량이며, 측정값의 통계적인 분석 즉 우연효과에 의한 불확도와 일사량의 교정불확도가 존재한다. 직달성분의 대기권 밖 일사량은 수식 자체의 불확도^[11]를 반영한다. 태양의 위치를 예측할 때 천정각을 구하게 되는데, 예측 방법은 Astronomical Almanac algorithm(1988)^[12]을 이용했으며, 코사인 천정각에 의한 표준불확도는 이 algorithm의 정확도를 반영한다.

1) I_t 에 대한 표준불확도

$$\begin{aligned} u^2(I_t) &= u^2(I_{t,\varphi}) + u^2(I_{t,\alpha}) \quad (13) \\ &= \left(\frac{s}{\sqrt{n}}\right)^2 + \left(\frac{U_{I_t}}{2}\right)^2 \\ &= \left(\frac{s}{\sqrt{n}}\right)^2 + \left(\frac{0.03 \cdot I_t}{2}\right)^2 \end{aligned}$$

2) I_{on} 에 대한 표준불확도

$$u(I_{on}) = \frac{U_{I_{on}}}{\sqrt{3}} = \frac{0.0001 \cdot I_{on}}{\sqrt{3}} \quad (14)$$

3) $\cos\theta_z$ 에 대한 불확도 기여량 : [13]에 의해 $\theta_z = 87^\circ$ 일 때, $\cos\theta_z$ 로 인해 발생하는 I_n 의 불확도가 0.35%라고 가정하였다.

$$u(\cos\theta_z) = \frac{U_{\cos\theta_z}}{\sqrt{3}} = \frac{0.0035 \cdot I_n}{\sqrt{3}} \quad (15)$$

2.2.3 합성표준불확도^[3,5,8]

합성표준불확도는 앞서 구한 표준불확도에 각 불확도 요

인에 대한 감도계수 c_i 를 곱하여 구한다.

$$u_c^2(I_n) = c_1^2 u^2(I_t) + c_2^2 u^2(I_{on}) + u^2(\cos\theta_z) \quad (16)$$

$$= c_1^2 (u^2(I_{t,\varphi}) + u^2(I_{t,\alpha})) + c_2^2 u^2(I_{on}) + u_{\cos\theta_z}^2$$

1) $k_t \leq 0.3$ 인 경우

$$c_1 = \frac{\partial f}{\partial I_t} = \frac{0.508}{I_{on} \cos^2 \theta_z} I_t - (0.0123 + \frac{0.02}{\cos \theta_z}) \quad (17)$$

$$c_2 = \frac{\partial f}{\partial I_{on}} = -\frac{0.254 I_t^2}{\cos^2 \theta_z I_{on}^2} \quad (18)$$

2) $0.3 < k_t < 0.78$ 인 경우

$$c_1 = \frac{\partial f}{\partial I_t} = \frac{3.498}{I_{on} \cos^2 \theta_z} I_t - (0.177 + \frac{0.4}{\cos \theta_z}) \quad (19)$$

$$c_2 = \frac{\partial f}{\partial I_{on}} = -\frac{1.749 I_t^2}{\cos^2 \theta_z I_{on}^2} \quad (20)$$

3) $k_t \geq 0.78$ 인 경우

$$c_1 = \frac{\partial f}{\partial I_t} = -\frac{0.972}{I_{on} \cos^2 \theta_z} I_t + (0.182 + \frac{1}{\cos \theta_z}) \quad (21)$$

$$c_2 = \frac{\partial f}{\partial I_{on}} = \frac{0.486 I_t^2}{\cos^2 \theta_z I_{on}^2} \quad (22)$$

따라서 합성표준불확도는 다음과 같다.

$$u_c(I_n) = \sqrt{c_1^2 (u^2(I_{t,\varphi}) + u^2(I_{t,\alpha})) + c_2^2 u^2(I_{on}) + u_{\cos\theta_z}^2} \quad (23)$$

2.2.4 확장불확도^[8]

확장불확도 U 는 합성표준불확도 $u_c(I_n)$ 에 포함인자 k 를 곱하여 구한다. 포함인자 k 의 값은 $y - U$ 에서 $y + U$ 의 구간에서 요구되는 신뢰의 수준에 따라 결정되는데, 본 논문에서는 신뢰수준이 약 95%일 때를 가정하여 $k=2$ 의 값을 선택했다.

$$U = 2 \cdot u_c \quad (24)$$

따라서 측정결과는 $Y = y \pm U$ 로 표현된다.

3. 연구 결과

표준기상년 데이터의 시간별 법선면 직달일사량에 대한 불확도 평가 결과와 k_t 구간에 따른 k_d , 법선면 직달일사량, 불확도의 변화 그리고 계절별로 비교한 결과는 다음과 같다.

3.1 불확도 평가 결과

표준기상년 데이터의 시간별 법선면 직달일사량에 대한 불확도 평가 결과는 Figure 1과 같다. 시간별 불확도의 평균은 11.15W/m^2 , 표준오차는 0.2W/m^2 이며, 시간별 법선

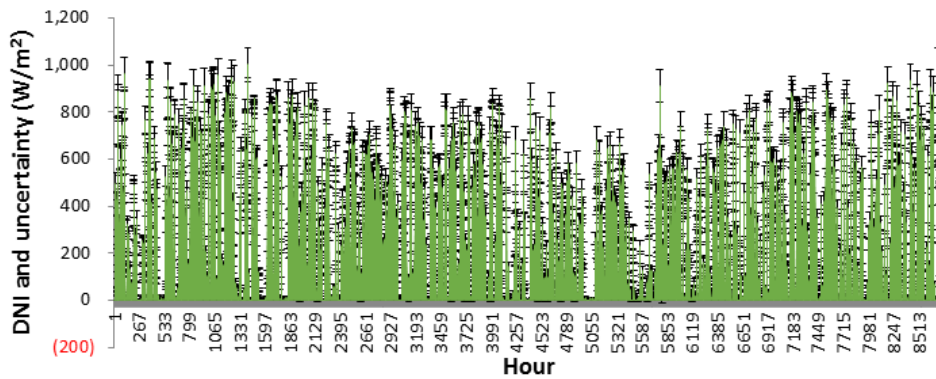


Fig. 1. Hourly DNI of TMY data and uncertainty

면 직달일사량에 대한 불확도의 비는 평균 0.07, 이 비의 표준오차는 0.01이다. 시간별 법선면 직달일사량의 평균이 127.17W/m^2 이고, 표준오차가 2.44W/m^2 인 것에 비하면 불확도는 법선면 직달일사량에 비해 매우 낮음을 알 수 있다.

Figure 2에서는 법선면 직달일사량에 따른 불확도 비의 변화를 보여준다. 법선면 직달일사량이 0W/m^2 에 가까울수록 법선면 직달일사량에 대한 불확도의 비가 커지는 경향을 보인다. 이는 낮은 일사량에 대한 불확실성이 크며, 그만큼 신뢰할 수 있는 수준이 낮음을 보여준다.

법선면 직달일사량에 따른 불확도의 변화 양상은 Figure 3과 같다. 대체적으로 법선면 직달일사량이 증가할수록 불확도도 증가하는 경향을 보인다. 하지만 법선면 직달일사량이 800W/m^2 내외에서 불확도가 10W/m^2 인 경우들도 있다.

이 원인을 찾아보기 위해 k_t 의 구간에 따른 k_d , 법선면 직달일사량 그리고 불확도의 관계를 보니 Figure 4와 같았다. 법선면 직달일사량의 주요 변수 중 하나인 k_d 는 k_t 가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다. 이는 하늘이 청명할수록 산란되는 일사량의 양이 줄어들음을 의미한다. k_t 가 증가함에 따라 법선면 직달일사량은 증가하는 경향을 보인

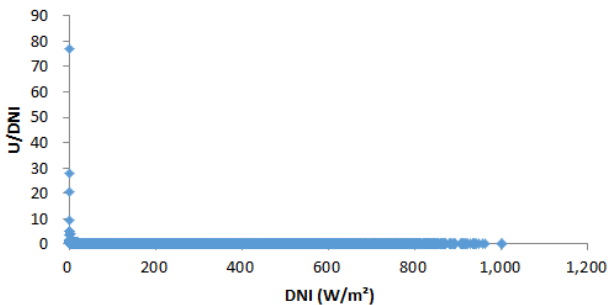


Fig. 2. Relation between DNI and ratio uncertainty to DNI

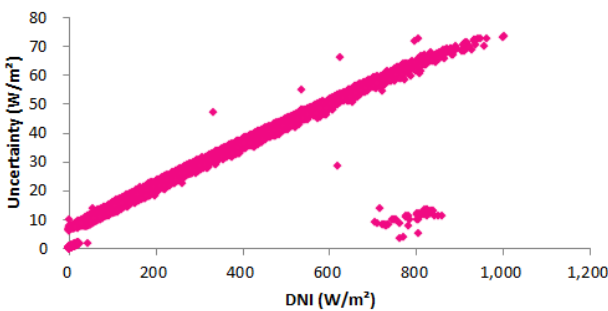


Fig. 3. Relation between DNI and uncertainty

다. 하지만 k_t 가 0.78 이상일 때부터 k_d 는 불규칙하게 흩어지는데, 이에 따라 법선면 직달일사량도 산만하게 흩어짐을 볼 수 있다. 불확도도 $k_t=0.78$ 을 기준으로 끊어지는 현상을 볼 수 있다.

특히 하늘이 청명한 조건에서 태양 고도가 낮아짐에 따라 태양복사에너지가 대기권을 투과하는 거리가 길어지고 이에 따라 산란되는 일사량이 많아지기 때문에 k_d 의 값이 커진다. 태양 고도가 낮아질 때 천정각은 커지게 되는데 천정각의 경우 Figure 5와 같이 1년 동안 $10^\circ < \theta_z < 170^\circ$ 범위 내에서 연속적으로 변화한다. 하지만 불확도 평가 시 범위를 $0^\circ < \theta_z < 85^\circ$ 로 제한함으로써 불확도의 연속성이 끊어진 것으로 보인다. 천정각이 90° 에 가까운 경우는 해가 뜨거나 지는 시점으로 이 때 태양빛은 낮보다 상대적으로 두꺼운 대기를 통과하게 되어 빛이 굴절되는 정도가 커지게 된다. 이에 불확도 또한 비선형적으로 커지는 현상이 발생하여 범위를 제한했다. k_t 가 0.78 이상인 비율은 전체의 0.57%로 흩어지는 구간이 전체에서 차지하는 비중은 매우 낮다.

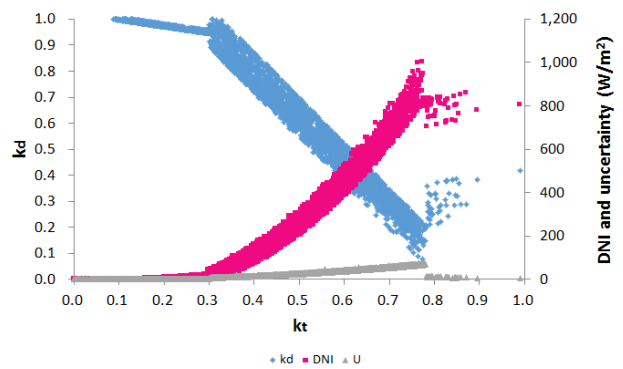


Fig. 4. Relation of k_t to k_d and DNI and to uncertainty

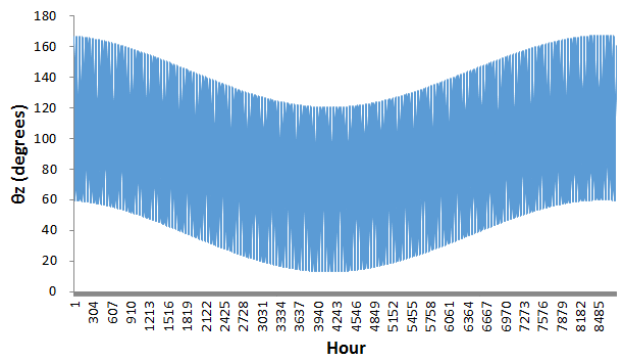


Fig. 5. Variation of θ_z according to hours

3.2 계절별 변화 비교

계절별 k_t 의 변화에 따른 k_d , 법선면 직달일사량, 그리고 불확도의 변화는 Figure 6~Figure 8과 같다. 전체적으로 서로 비슷한 변화 추이를 보인다. 공통적으로 $k_t \geq 0.78$ 에 흩어지는 경향을 보이는데, 특히 겨울에 그러한 경향이 가장 많이 보인다. 이는 사계절 중 겨울에 태양 고도가 가장 낮고, 천정각이 가장 크므로 생기는 결과로 보인다. Figure 9에서 보는 바와 같이 겨울은 천정각의 범위가 $50^\circ < \theta_z < 165^\circ$

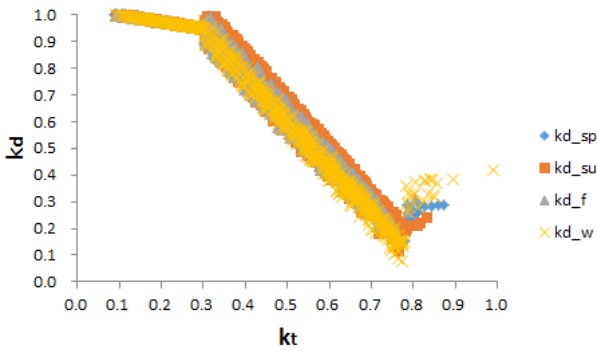


Fig. 6. Relation between k_t and k_d in four seasons

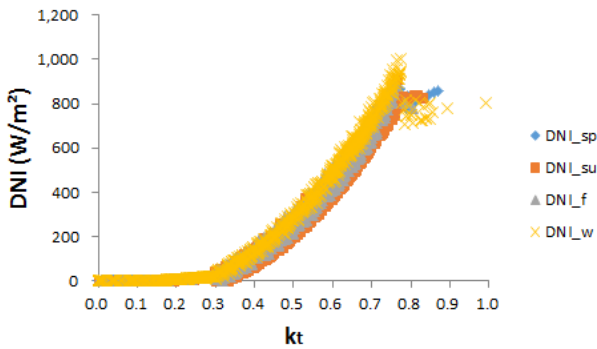


Fig. 7. Relation between k_t and DNI in four seasons

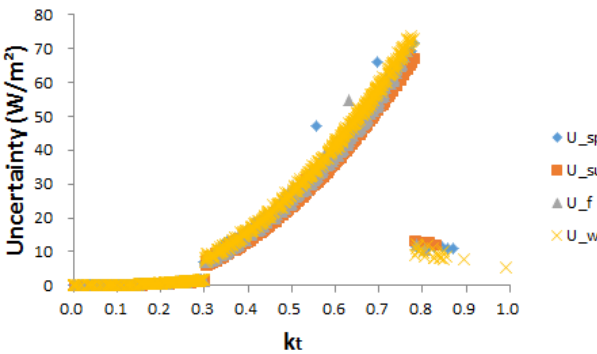


Fig. 8. Relation between k_t and uncertainty in four seasons

로, 불확도를 예측할 수 있는 범위가 적다. 반대로 여름은 사계절 중 태양 고도가 가장 높고, 천정각은 가장 낮음으로 $k_t \geq 0.78$ 구간에서 비선형적인 경향이 가장 적게 나타난다.

4. 결론

표준기상년 데이터의 법선면 직달일사량에 대한 불확도는 평균 11.15W/m^2 , 표준오차 0.2W/m^2 로 평균적으로 낮은 수치였다. 1년 중 k_t 가 0.3 이하인 날은 66.95%, $0.3 < k_t < 0.78$ 인 경우는 32.48%로 이 두 구간에서 k_t 가 증가함에 따라 k_d 는 감소했고, 법선면 직달일사량은 증가하는 경향을 보였다. $0.3 < k_t < 0.78$ 일 때가 $k_t \leq 0.3$ 일 때보다 기울기의 절대값은 더 컸다. 불확도는 법선면 직달일사량이 증가할수록 증가하는 경향을 보였다. k_t 가 0.78 이상인 구간은 전체의 0.57%에 불과했지만 이 구간에서는 k_d 와 법선면 직달일사량, 그리고 불확도는 산만하게 흩어지는 경향을 보였다. 이는 천정각이 90° 에 가까울수록 태양빛의 굴절률이 커지므로 천정각의 범위를 85° 이하로 제한함으로써 얻어진 결과들로 유추된다.

계절별로 k_t 의 변화에 따른 k_d , 법선면 직달일사량, 그리고 불확도의 변화를 보면 전체적인 양상은 서로 비슷한 경향을 보인다. 특히 겨울에는 태양의 고도가 사계절 중 가장 낮음으로 인해, 천정각이 가장 크므로 불확실성이 존재하는 범위가 넓어짐에 따라 k_t 가 0.78 이상인 구간에서 k_d 와 법선면 직달일사량, 그리고 불확도가 사계절 중 가장 많이 흩어지는 양상을 보였다.

따라서 천정각이 90° 에 가까울 때, 즉 태양이 지표면 부

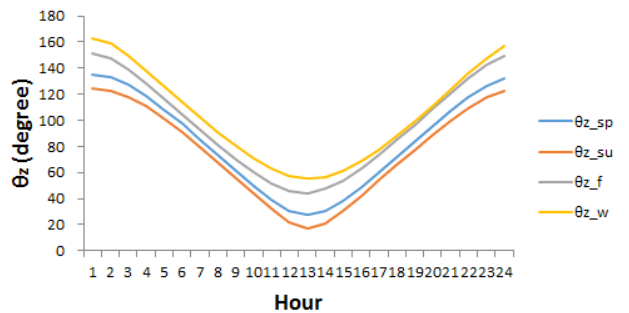


Fig. 9. Variation of θ_z according to hours in four seasons

근에 근접해있을 때, 법선면 직달일사량의 불확도에 빛의 굴절률이 미치는 영향과 더불어 본 논문에서는 법선면 직달일사량의 변수에 의한 불확도 요인만 고려했지만 앞으로 Reindl-2 model의 불확도를 반영한 불확도에 대한 연구가 추후 더 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업(B6-2427) 및 산업통상자원부의 표준화기술개발사업(B6-7601)을 재원으로 수행한 연구과제의 결과입니다.

References

- [1] Korea Institute of Energy Research, 2015, "Typical meteorological data", <http://www.srd.re.kr/db/srdDataInfoView.do?scid=S06001003&sdid=3>.
- [2] S. Wilcox and W. Marion, 2008, "Users manual for TMY3 data sets", NREL, The United States of America.
- [3] D. T. Reindl, W. A. Beckman and J. A. Duffie, 1990, "Diffuse fraction correlations", *Solar Energy*, **45**(1), 1-7.
- [4] Benjamin Y. H. Liu, Richard C. Jordan, 1960, "The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation", *Solar Energy*, **4**(3), 1-19.
- [5] L.T. Wong, W.K. Chow, 2001, "Solar radiation model", *Applied Energy*, **69**, 191-224.
- [6] Hyun Jin Lee, Shin Young Kim, Yong Heack Kang, Hyun Goo Kim, and Chang Yeol Yun, 2015, "Comparison of global horizontal and direct normal insulations in Daejeon, Korea", *ISES Solar World Congress 2015*, P2-5-2.
- [7] The Korean solar energy society, Korean institute of architectural sustainable environment and bulding systems, 2015, "Typical whether data of the Republic of Korea", http://kses.re.kr/data_06/list_hi.php.
- [8] Uncertainty committee of Korea research institute of standards and science, 2010, "ISO/IEC Guide 98-3: 2008, Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM: 1995)", Korea research institute of standards and science, Republic of Korea.
- [9] Yong Heack Kang, Hyun Goo Kim, Deok Gi Cho, Chang Yeol Yun, Wan Soon Park, Chul Hyung Lee, Joon Pyo Lee, Hyoung Chan Kim, Euy Jun Lee, Eun Cheol Kang, 2015, "Korea renewable energy resource atlas", Ministry of Science, ICT and Future Planning, Korea Institute of Energy Research, Republic of Korea.
- [10] J. M. Finkelstein, R. E. Schafer, 1971, "Improved goodness-of-fit tests", *Biometrika*, **58**(3), 641-645.
- [11] John A. Duffie, William A. Beckman, 2013, "Solar engineering of thermal processes", 4th ed., Wiley, The United States of America.
- [12] Joseph J. Michalsky, 1988, "The Astronomical Almanac's algorithm for approximate solar position (1950-2050)", *Solar Energy*, **40**(3), 227-235.
- [13] Ibrahim Reda and Afshin Andreas, 2008, "Solar position algorithm for solar radiation applications", National renewable energy laboratory(NREL), The United States of America.
- [14] Joon Bum Jee, Seung Woo Lee, Young Jean Choi and Kyu Tae Lee, 2012, "The Generation of Typical Meteorological Year for Research of the Solar Energy on the Korean Peninsula", *New & Renewable Energy*, **8**(2), 14-23.
- [15] Shin Young Kim, Hyun Jin Lee, Chang Yeol Yun, Jong Kyu Kim, Yong Heack Kang and Dok ki Jo, 2014, "Generation of Typical Solar Radiation Year for Daejeon", *Journal of the Korean Society for New and Renewable Energy*, p. 129.
- [16] Hyun Goo Kim, Ji Hwee Choi, Moon Seok Jang and Wan Ho Jeon, 2010, "Uncertainty Analysis on Vertical Wind Profile Measurement of LIDAR for Wind Resource Assessment", *Journal of the Korean Society for New and Renewable Energy*, p. 185.
- [17] Hyun Goo Kim, Yu Mi Kim, Shin Young Kim, Yong Heack Kang and Chang Yeol Yun, 2015, "Calculation of Wind Shear Exponents in Jeju and Uncertainty Evaluation", *Journal of the Korean Society for New and Renewable Energy*, p. 82.