

천리안 위성 영상 기반 태양자원지도를 활용한 다양한 정의에서의 청천지수 특성 분석

김창기* · 김현구** · 강용혁** · 윤창열*

*한국에너지기술연구원 신재생에너지자원·정책센터, 선임연구원

**한국에너지기술연구원 신재생에너지자원·정책센터, 책임연구원

Analysis of Clear Sky Index Defined by Various Ways Using Solar Resource Map Based on Chollian Satellite Imagery

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: ckkim@kier.re.kr

Abstract

Clear sky indices were estimated by various ways based on *in-situ* observation and satellite-derived solar irradiance. In principle, clear sky index defined by clear sky solar irradiance indicates the impacts of cloud on the incoming solar irradiance. However, clear sky index widely used in energy sciences is formulated by extraterrestrial irradiance, which implies the extinction of solar irradiance due to mainly aerosol, water vapor and clouds drops. This study examined the relative difference of clear sky indices and then major characteristics of clear sky irradiance when sky is clear are investigated. Clear sky is defined when clear sky index based on clear sky irradiance is higher than 0.9. In contrast, clear sky index defined by extraterrestrial irradiance is distributed between 0.4 and 0.8. When aerosol optical depth and air mass coefficient are relative larger, solar irradiance is lower due to enhanced extinction, which leads to the lower value of clear sky index defined by extraterrestrial irradiance.

Keywords: 청천지수(Clear sky index), 기상학(Meteorology), 에너지 공학(Energy Engineering), 천리안 위성 영상 기반 일사량(Chollian Satellite-derived solar irradiance), 관측 기반 일사량(*In-situ* measured solar irradiance)

기호설명

AERONET : Aerosol Robotic Network

DHI : Diffuse Horizontal Irradiance

GHI : Global Horizontal Irradiance



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.39, No.3, pp.47-57, June 2019
<https://doi.org/10.7836/kjes.2019.39.3.047>

pISSN : 1598-6411
eISSN : 2508-3562

Received: 03 June 2019

Accepted: 16 June 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.

S_0 : Solar constant (=1370 W m⁻²)

UASIBS – KIER : University of Arizona Solar Irradiance Based on Satellite – Korea Institute of Energy Research

그리스 문자

θ : 태양천정각

γ^2 : 결정계수

1. 서론

태양에너지 관련 연구에 있어 청천지수는 해당지역의 일사량의 분포를 나타내는 정량화된 인자이다. 그 동안 청천지수를 활용하여 하늘의 상태를 추정하는 연구가 수행된 바 있다¹⁻⁵⁾. 일례로 Marty and Philipona(2000)¹⁾은 알프스 지역에서의 구름 효과를 파악하기 위해 Clear Sky Irradiance 모델과 수평면 전일사량을 기반으로 청천지수를 계산하였다. Li and Lam(2001)²⁾은 청천지수, Cloud Cover 및 일조시간을 이용하여 하늘 상태를 판별하는 알고리즘을 제시하였다. 이 둘 연구 모두 하늘의 상태를 파악하는 주요인자로 청천지수를 이용하였지만 정의는 달랐다. Li and Lam(2001)²⁾은 수평면 전일사량을 시간 및 지역에 따라 정규화하는 방안으로 대기권 밖 일사량을 Marty and Philipona(2000)¹⁾은 청천일사량을 사용하였다. 한편 Engerer and Mills(2014)³⁾는 태양광 발전 시스템에 직접적으로 적용가능한 청천지수를 개발하기 위해 실제 발전량을 발전용량에 대해 정규화하도록 설계한 바 있다.

이와 같이 청천지수의 정의에 따라 그 물리적 의미가 달라지므로 본 연구에서는 한국에너지기술연구원에서 개발한 천리안 위성 영상 기반 태양자원지도에서 생산된 청천일사량과 직접 관측 기반 수평면 전일사량을 통해 기상학과 에너지 공학에서 주로 사용되는 청천지수를 산정하여 두 지수간의 상대적인 차이를 분석하고, 나아가 청천(Clear Sky)을 규정할 수 있는 보다 나은 지수를 판별하고 최종적으로 그 기준을 제시하고자 한다.

2. 연구자료

2.1 천리안 위성 영상 기반 태양자원지도

한국에너지기술연구원은 Kim et al.(2017)⁶⁾이 개발한 UASIBS-KIER(University of Arizona Solar Irradiance Based on Satellite-Korea Institute of Energy Research) 모델에서 생산된 1 km 공간해상도에 대한 수평면 전일사량을 천리안 위성 영상 기반 태양자원지도의 형태로 제공한다. UASIBS-KIER 모델은 가시채널 및 적외채널을 활용하여 구름의 유무를 판별하고 구름이 없는 경우 청천에 대한 일사량을 산정하는 모듈과 구름이 존재하는 경우 운천(Cloudy Sky)에 대한 일사량을 산정하는 모듈로 구성되어 있다. 따라서 1 km² 격자별 일사량뿐

만 아니라 청천일사량, 운형 정보 등을 실시간으로 생산할 수 있다. 위성 영상 이미징 시간(15분) 마다 수신되는 천리안 위성 영상 자료를 UASIBS-KIER 모델을 통해 수평면 전일사량으로 변환하고 일정 기간 이후 시간 평균 일사량에 대해서 보정작업한 이후 연간 누적 일사량을 제공하고 있다. 본 연구에서는 천리안 위성영상 기반 태양자원지도를 구성하는 요소 중에서 2016년부터 2017년까지 순간(Instantaneous) 수평면 전일사량, 수평면 산란일사량 및 청천일사량을 사용하였다. Fig. 1은 천리안 위성 영상 기반 태양자원지도를 나타낸 것으로 일일 누적 일사량(Daily Total Irradiance)에 대한 2016년부터 2017년까지 연평균 값의 공간분포를 나타낸 것이다.

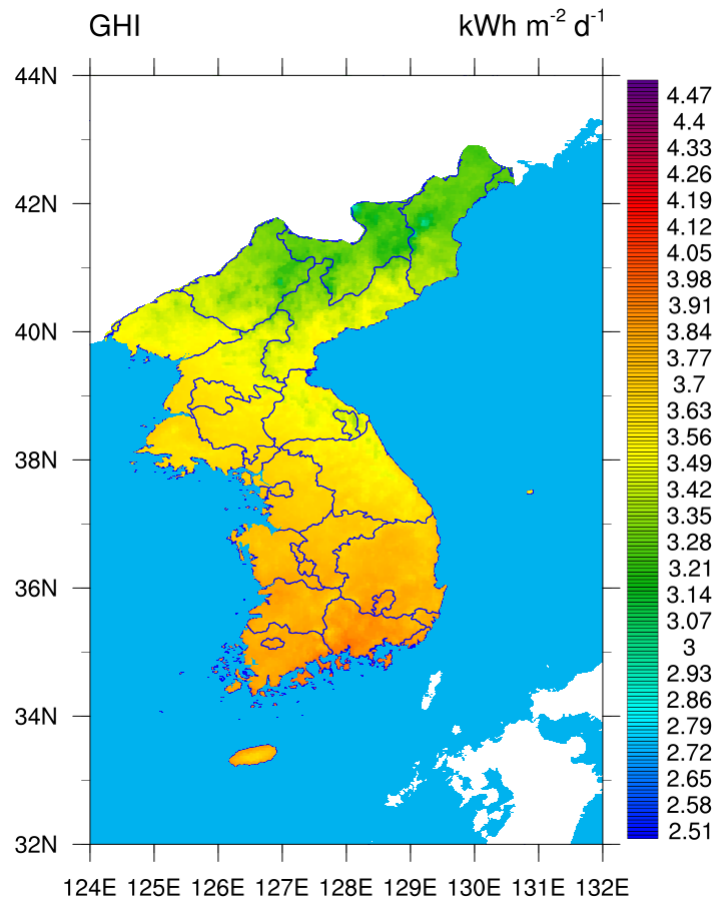


Fig. 1 Solar resource map derived by UASIBS-KIER model with Chollian Satellite imagery from 2016 to 2017

2.2 관측자료

본 연구에서는 미국 NASA에서 운영하는 AERONET(Aerosol Robotic Network) 지점의 하나인 서울 연세대학교 이과대학 과학관(37.564°N, 126.935°E)에서 관측된 1분 평균 수평면 전일사량을 사용하였는데, 천리안 위성 영상 이미징 시간에 해당하는 시간대에서만 청천지수를 계산하여 이후 분석을 수행하였다. 또한 추가 분석을 위하여 AERONET에서 관측한 에어로졸 광학깊이(Aerosol Optical Depth)를 사용하였다.

3. 연구방법

3.1 청천지수 및 산란계수 정의

앞서 서론에서 지적하였듯이 기상학 및 에너지 공학 분야에서 활용되는 청천지수의 정의가 다르다. 식(1)과 (2)는 각각 기상학 및 에너지 공학 분야에서 사용되는 청천지수를 나타낸 것인데, 두 청천지수 모두 0과 1사이에서 분포하도록 수평면 전일사량을 정규화하는데 그 목적이 있다. 기상학의 청천지수인 k_{tm} 은 청천일사량에 대한 수평면 전일사량의 비를 나타낸 것으로 태양복사에너지의 구름 입자에 의한 감쇄효과를 수식적으로 표현한 것이다. 반면, k_{te} 는 에너지 공학에서 주로 사용되는 정의로서 대기권 밖 일사량에 대한 수평면 전일사량을 나타낸 것으로 대기 상단에서 유입된 태양복사에너지가 대기를 통과하면서 대기 중 수증기 입자, 구름 입자 및 에어로졸 입자에 의한 감쇄효과를 모두 고려한 것을 의미한다. 따라서 k_{tm} 은 구름의 유무를 직접적으로 판단할 수 있는 인자이지만 k_{te} 는 일사량의 감쇄가 구름에 의한 것인지 에어로졸에 의한 것인지 구분하기 어려우므로 구름의 유무를 판단할 수는 없고 단순히 대기의 혼탁 정도를 판단할 수 있는 근거로 사용된다. 식(3)에서 정의된 k_{tc} 는 청천일사량을 대기권 밖 일사량에 대해 나타낸 것으로 대기 중 수증기 및 에어로졸 입자에 의한 감쇄효과를 나타낸 인자라고 할 수 있다. 마지막으로 식(4)는 산란계수(k_d)로서 수평면 전일사량에 대한 수평면 산란 일사량의 비를 나타낸다. AERONET 관측 프로그램에서는 수평면 산란 일사량을 직접 관측 자료(*in-situ measurement*)로 제공하지 않으므로 천리안 위성 영상 기반 태양자원지도로부터 추정된 자료를 사용하였다. k_{tm} 이 구름의 유무를 판단할 수 있는 직접적인 인자임에도 불구하고 에너지 공학 분야에서 k_{te} 가 광범위하게 사용되는 이유는 k_{tm} 을 계산할 때 청천일사량을 산정하는 모델이 필요하기 때문이다. 즉, 청천일사량에 영향을 주는 수증기 및 에어로졸 광학깊이의 지역별 시간별 연직분포 등 기상 정보에 대한 이해가 필수적이기 때문이다.

$$k_{tm} = \frac{GHI}{Clear\ Sky\ GHI} \quad (1)$$

$$k_{te} = \frac{GHI}{S_0 \times \cos\theta} \quad (2)$$

$$k_{tc} = \frac{Clear\ Sky\ GHI}{S_0 \times \cos\theta} \quad (3)$$

$$k_d = \frac{DHI}{GHI} \quad (4)$$

3.2 연구자료 분석 체계

천리안 위성 영상 기반 수평면 전일사량을 검증하기 위하여 관측 지점 및 시점에 대한 대기권 밖 일사량과 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. 이 기준에 따라 2016년 1월부터 2017년 12월까지 총 9471개의 연구자료가 사용되었다. Fig. 2는 연구자료 분석을 위한 체계도로서 첫 단계에서 위성 이미징 시간마다 k_{tm} , k_{te} , k_{tc} , k_d 를 계산한다. Mathiesen and Kleissl(2011)⁷⁾은 k_{tm} 이 0.9보다 크면 청천으로 간주하였는데, 본 연구에서도 같은 기준을 사용하여 k_{tm} 이 0.9보다 크면 Clear Sky로 그렇지 않으면 Cloudy Sky로 구분한다. 이후 Clear Sky인 사례에 대해서 k_{te} , k_{tc} 및 k_d 의 특성을 추가적으로 분석한다.

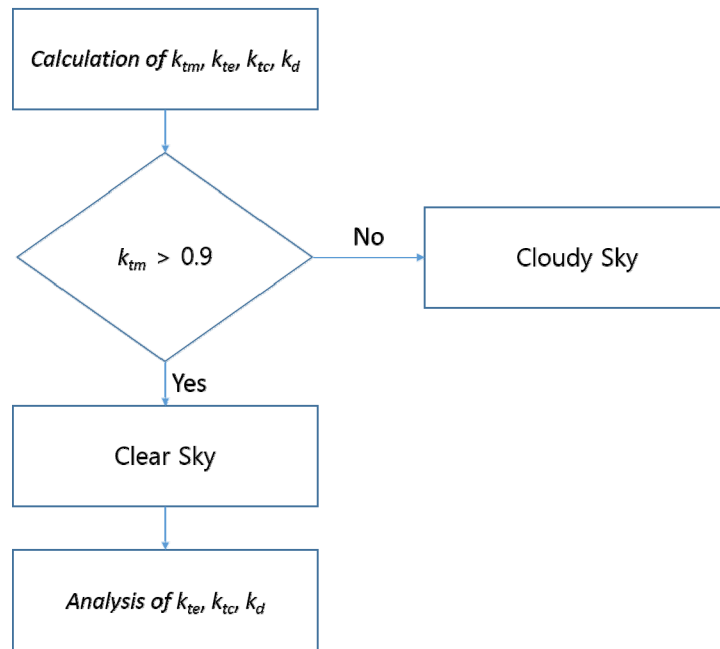


Fig. 2 Flowchart of data analysis

4. 결과

2016년 1월부터 2017년 12월까지 k_{tm} 과 k_{te} 를 계산하여 상대빈도분포를 Fig. 3에 나타내었다. 우선 k_{tm} 의 분포를 살펴보면, k_{tm} 이 0.9보다 큰 구간이 전체의 24%로 가장 비중이 높다. k_{tm} 이 0.9보다 높을 때 Clear Sky를 나타내는 경우가 대부분이므로 이에 대한 확인을 할 필요가 있다. Total Sky Imager와 같은 장비가 설치되어 있지 않아 천리안 위성 영상 기반 수평면 전일사량과 관측된 수평면 전일사량을 비교하였다. Fig. 4에서 확인할 수 있듯이 위성 영상을 통해 추정된 일사량과 직접 관측된 일사량간의 결정계수가 0.99이고 선형회귀선의 기울기가 1.02이며, 이상치가 나타나지 않아 위성 영상에서도 k_{tm} 이 0.9보다 큰 경우 모두 하늘의 상태가 Clear Sky였

다. 따라서 본 연구에서 k_{tm} 이 0.9보다 높을 때 Clear Sky로 구분한 기준은 합당하다고 할 수 있다. k_{tm} (0.8 - 0.9) 구간에서 빈도수가 두 번째로 높게 나타난다. 결정론적으로 k_{tm} 이 0.9보다 낮은 경우 모두 구름이 존재한다고 할 수 없으므로 이 구간에서 일부는 구름이 없는 Clear Sky일 수도 있다. 이러한 사례들이 포함되어 빈도수가 두 번째로 높게 나타난 것으로 사료된다. k_{te} 의 경우 가장 높은 빈도수는 k_{te} (0.6 - 0.7) 구간에 나타난다. k_{te} 가 0.7이상일 때 빈도수는 전체의 8.5%로 이들 모두가 Clear Sky라 가정하더라도 전체의 15.5%(=24% - 8.5%)는 k_{te} 가 0.7보다 낮을 때에도 Clear Sky 사례가 존재함을 유추할 수 있다. 따라서 k_{te} 의 분포를 통해 Clear Sky인지 아닌지를 판단하는데 무리가 있다.

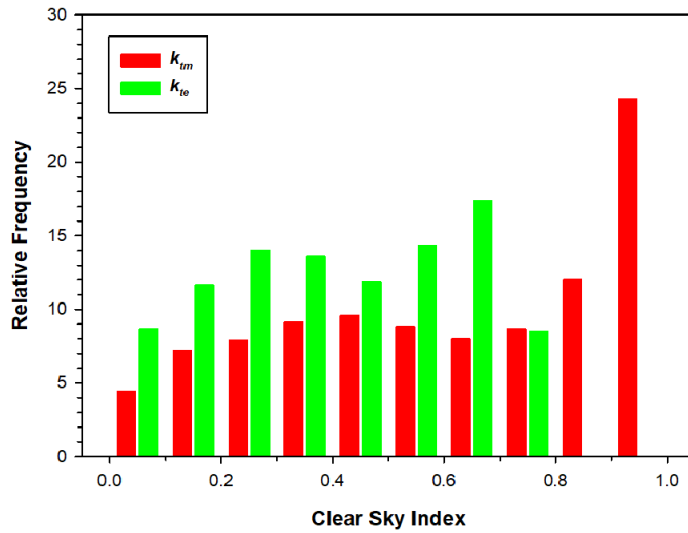


Fig. 3 Relative Frequency of k_{tm} (red bar) and k_{te} (green bar) from January, 2016 to December, 2017

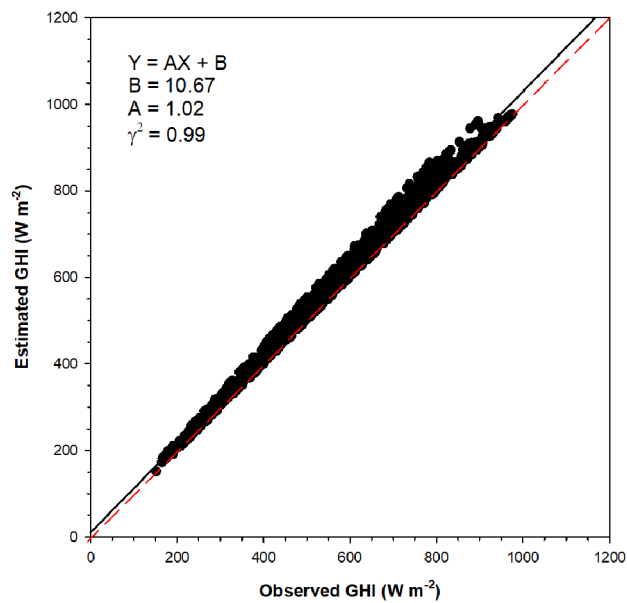


Fig. 4 Scatter plot of global horizontal irradiance between *in-situ* observation and satellite derivation when k_{tm} is higher than 0.9

Fig. 5는 Clear Sky($k_{tm} > 0.9$)일 때 k_{te} 의 상대빈도분포이다. k_{tm} 과 달리 Clear Sky임에도 불구하고 k_{te} 는 0.4 부터 0.8까지 왼쪽으로 긴 꼬리를 가진 분포를 보인다. k_{te} 가 0.4와 가까울 때, 즉 대기권 밖 일사량에 대해서 40%정도 낮은 일사량이 유입될 때도 실제로 구름이 없는 맑은 하늘이라는 의미이다. 물론 이러한 사례는 극히 드문 사례로 전체 k_{te} 가 0.4부터 0.5사이에 분포할 때 약 2%만이 Clear Sky이고 나머지 98%는 Cloudy Sky였다 (Fig. 6). 반면, k_{te} (0.7 - 0.8) 구간에서는 약 70%가 Clear Sky이고 나머지 30%는 Cloudy Sky로 보였다. 전체 적으로 k_{te} 가 증가하면서 Clear Sky의 상대적인 비율이 증가하지만 모든 사례가 Clear Sky가 아니므로 여전히 k_{te} 만을 가지고 Clear Sky임을 판단할 수는 없다.

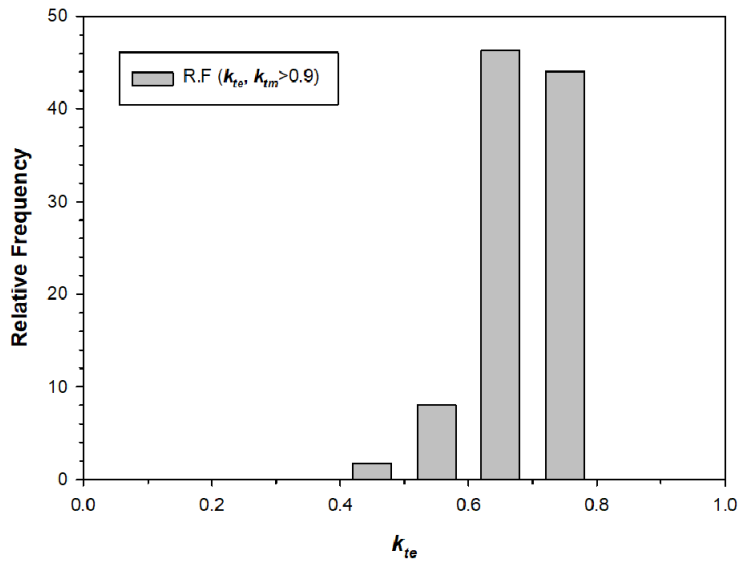


Fig. 5 Relative Frequency of k_{te} when k_{tm} is higher than 0.9 (sky is clear)

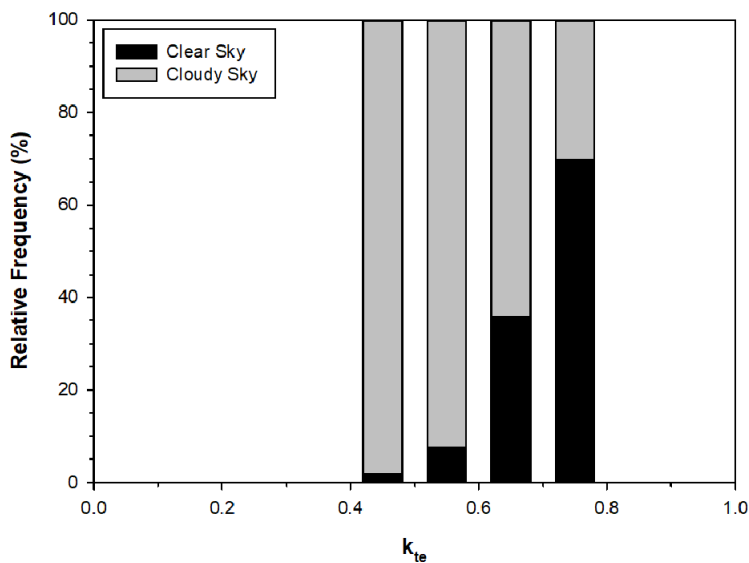


Fig. 6 Relative Frequency of k_{te} when k_{tm} is higher than 0.9 (black bar) and otherwise (grey bar)

5. 토의

앞서 k_{tm} 과 k_{tc} 의 상대빈도분포의 분석 결과, Clear Sky일 때 k_{tc} 는 0.4부터 0.8까지 분포하였다. Fig. 6에서 확인하였듯이 $k_{tc}(0.4 - 0.5)$ 구간에서 2%는 Clear Sky로 분류되었는데 이러한 사례는 어떤 경우에 발생하는지 보다 면밀히 살펴볼 필요가 있다. 우선 Clear Sky이므로 관측된 수평면 전일사량과 천리안 위성 영상 기반 태양 자원지도에서 산출된 청천일사량은 거의 동일하다고 가정할 수 있다. 실제로 Clear Sky일 때 평균 k_{tm} 은 0.9619로 관측된 수평면 전일사량은 청천일사량의 96%정도이다. 따라서 Clear Sky에서 k_{tc} 를 사용하면 구름에 의한 감소효과를 배제할 수 있다. Clear Sky일 때 k_{tc} 와 k_d 의 산포도를 Fig. 7에 나타내었다.

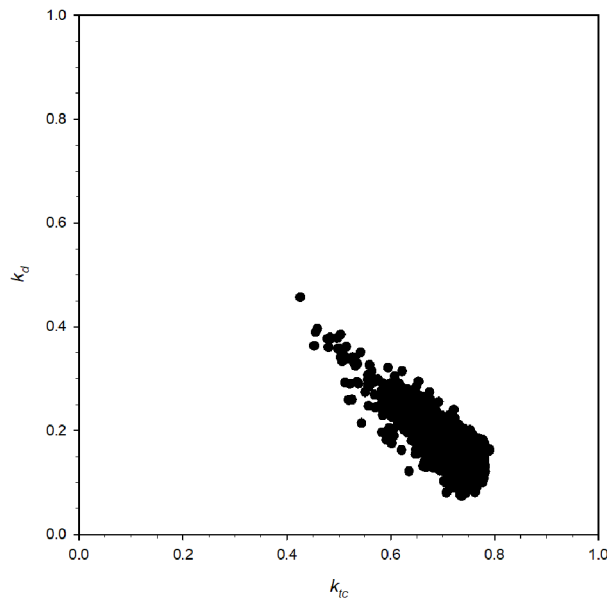


Fig. 7 Scatter plot of k_{tc} and k_d when k_{tm} is higher than 0.9

k_{tc} 가 낮아질수록 k_d 는 증가한다. 이것은 대기권 밖 일사량에 비해 청천일사량이 낮아질수록 수평면 산란일사량의 비율이 증가함을 의미하는데, Clear Sky이므로 산란의 원인은 수증기 또는 에어로졸이 대부분이다. 수증기 또는 에어로졸이 산란효과를 유발하는 직접적인 요인이라면 산란효과를 보다 가중시키는 요인으로 태양 경로가 있다. 에어로졸 광학깊이는 에어로졸 농도와 기하학적 길이의 곱으로 표현되므로 기하학적 길이, 즉 태양 경로가 길수록 산란효과는 커진다. 일반적으로 태양 경로는 Air Mass 계수로 정량화되는데 이것은 식(5)로 표현된다. 식(5)의 물리적 의미는 태양천정각(태양고도각)이 클수록(작을수록) Air Mass 계수가 증가하여, 태양 광선이 대기 상단에서 지표까지 도달하는데 거리가 길어짐을 의미한다. 현재 American Solar for Testing and Materials(ASTM) G173-03⁸⁾에서는 Air Mass 계수를 1.5로 설정하였는데, 이때 태양천정각은 48° 정도 된다.

$$\text{Air Mass Coefficient} \approx \frac{1}{\cos\theta} \tag{5}$$

Fig. 8에 $\cos\theta$ 과 k_d 의 상관관계를 제시하였다. 선형적인 상관관계는 보이지 않지만 $\cos\theta$ 가 낮아질수록 k_d 가 증가한다. 특히, $\cos\theta$ 가 0.4보다 낮을 때 k_d 는 0.15에서 0.5사이에 나타난다. 반면, $\cos\theta$ 가 0.4보다 높을 때는 k_d 가 0.05에서 0.3사이에 주로 분포한다. Kim and Clarkson (2016)⁹⁾도 관측자료를 활용한 법선면 직달일사량에 대한 모수화 연구에서 법선면 직달일사량에 영향을 주는 주요인자로 Air Mass 계수임을 밝힌바 있다.

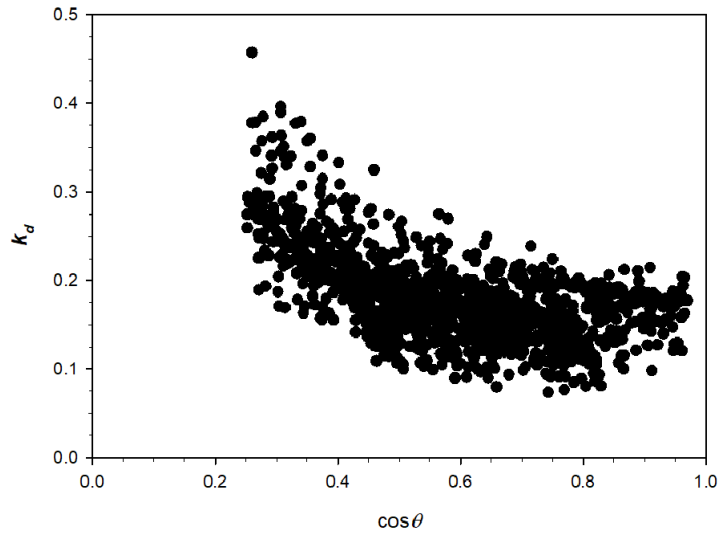


Fig. 8 Scatter plot of k_d and $\cos\theta$ when k_{tm} is higher than 0.9

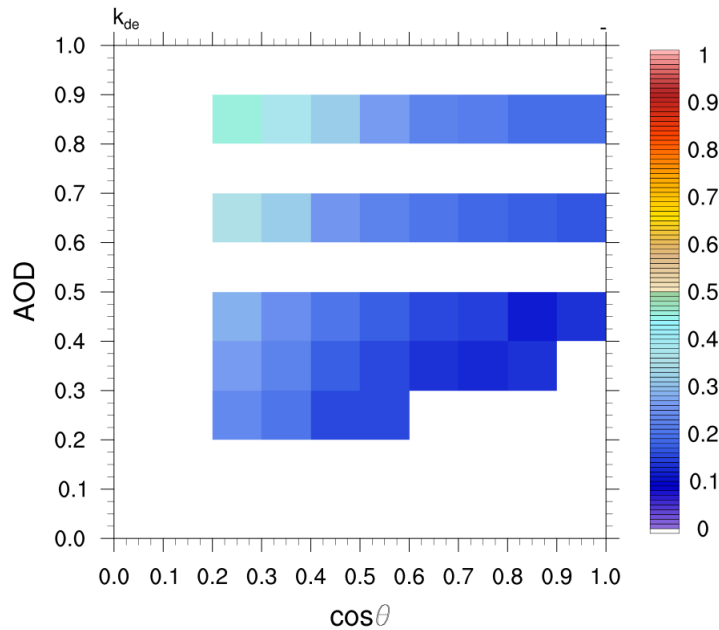


Fig. 9 2-dimensional histogram of k_d for aerosol optical depth and $\cos\theta$ when k_{tm} is higher than 0.9

산란효과에 직접적인 영향을 주는 에어로졸 광학깊이와 간접적인 영향을 주는 Air Mass 계수(태양천정각)에 대한 상관관계를 규명하기 위하여 k_d 를 2차원 히스토그램의 형태로 Fig. 9에 나타내었다. 앞서 설명하였듯이 에어로졸 광학깊이는 AERONET 지점(서울 연세대학교 과학관)에서 직접 관측된 자료를 사용하였고, 이는 UASIBS-KIER 모델에도 적용되었다. Clear Sky인 사례에서 태양천정각이 크고 에어로졸 광학깊이가 클 때 k_d 가 증가하였다. 즉, 하늘이 맑을 때 에어로졸 농도가 높고 태양천정각이 클 때는 대기 상단에서 지표로 도달하는 태양광선이 긴 경로를 거치면서 산란에 의한 감쇄효과가 상대적으로 에어로졸 농도가 낮고 경로가 짧을 때보다 증가하여 구름이 없어도 불구하고 수평면 전일사량은 낮아진다. 그러므로 대기권 밖 일사량에 비해 수평면 전일사량은 현저히 낮아 k_{te} 는 0.4에서 0.5사이인 구간에도 분포하는 것으로 사료된다.

6. 결론

지금까지 k_{tm} 과 k_{te} 의 상대적인 분포를 분석하여 k_{tm} 이 0.9보다 클 때 가장 높은 상대빈도수임을 확인하였다. 이 때 모든 사례에서 천리안 위성 영상 기반 일사량은 청천일사량과 동일하여 구름이 없는 사례로 판별되었고, 향후 연구에서 k_{tm} 을 이용하여 k_{tm} 이 0.9보다 클 때 Clear Sky로 규정할 수 있는 근거를 마련할 수 있었다. Clear Sky에 대해서 k_{te} 는 0.4부터 0.8까지 보다 넓은 분포를 보여 k_{te} 를 이용하여 Clear Sky를 한정하는데 무리가 있음을 알 수 있었다. 특히 Clear Sky일 때 k_{te} 는 0.5부터 0.6사이에서 가장 높은 상대빈도수가 나타나는데, 이 경우 전체 35%만이 Clear Sky로 구분되었고, 나머지 65%가 Cloudy Sky로 구분되었다. 그러므로 k_{te} 는 하늘의 상태를 판별하는 좋은 인자는 아님을 유추할 수 있었다. k_{te} (0.4 - 0.5)인 구간에서도 Clear Sky인 사례가 낮은 비율이지만 존재하였는데, 이것은 에어로졸의 농도가 다른 사례일보다 높고, 태양천정각이 커서 상대적으로 산란 효과가 직·간접적으로 커져서 대기권 밖 일사량에 비해 수평면 전일사량이 낮아졌기 때문으로 분석되었다.

향후 연구에서는 k_{tm} 이 0.9보다 클 때 즉, Clear Sky일 때 k_{te} 의 분포를 고려하여 확률론적 예측인자로서 k_{te} 의 활용성을 파악하는 것이 필요하고, 보다 많은 지점에 대해서 이와 같은 분석을 시도해볼 필요가 있다.

후기

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

REFERENCES

1. Marty, C. and R. Philipona, The Clear-sky Index to Separate Clear-sky from Cloudy-sky Situations in Climate Research, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 27, pp. 2649-2652, 2000.
2. Li, D. H. W. and J. C. Lam, An Analysis of Climatic Parameters and Sky Condition Classification, *Building and Environment*, Vol. 36, pp. 435-445, 2001.
3. Engerer, N. A. and F. P. Mills, KPVI: A Clear-sky Index for Photovoltaics, *Solar Energy*, Vol. 105, pp. 679-693, 2014.

4. Calbó, J., J.-A. González, and D. Pagès, A Method for Sky-Condition Classification from Ground-Based Solar Radiation Measurements. *J. Appl. Meteor.*, Vol. 40, pp. 2193-2199, 2001.
5. Assunção, H. F., J. F. Escobedo, and A. P. Oliveira, A New Algorithm to Estimate Sky Condition based on 5 minutes-averaged Values of Clearness Index and Relative Optical Air Mass, *Theor. and Appl. Climato.*, Vol. 90, pp. 235-248, 2007.
6. 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.
7. Mathiesen, P. and J. Kleissl, Evaluation of Numerical Weather Prediction for Intra-day Solar Forecasting in the Continental United States, *Solar Energy*, Vol. 85, pp. 967-977, 2011.
8. ASTM G173-03 (2012), Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org.
9. Kim, C. K. and M. Clarkson, Toward Improved Solar Irradiance Forecasts: Introduction of Post-Processing to Correct the Direct Normal Irradiance from the Weather Research and Forecasting Model. *Pure Appl. Geophys.*, Vol. 173, pp. 1751-1763, 2016.