

# 미세먼지 농도가 직산분리 모델의 신뢰성에 미치는 영향에 관한 연구

이상혁\* · 이경수\*\*\*

\*한국산업기술대학교 에너지·전기공학과, 석사과정

\*\*한국산업기술대학교 에너지·전기공학과, 조교수

## A Study on the Effect of Particulate Matter Concentration on the Reliability of Decomposition Model

Lee Sang-Hyuk\* · Lee Kyung-Soo\*\*\*

\*Department of Energy & Electrical Engineering, Korea Polytechnic University, Master Course Student

\*\*Department of Energy & Electrical Engineering, Korea Polytechnic University, Assistant Professor

†Corresponding author: kyungsoolee@kpu.ac.kr

### Abstract

Recently, as the amount of particulate matter blowing from China increases, the domestic air environment is rapidly deteriorating. This pollution of the atmosphere greatly affects the light energy reaching the ground. Particularly, since the light enters the solar cell module in various forms, the amount of input energy of the solar power generation system may be changed depending on the ratio of direct beam irradiation and diffused horizontal irradiation. In this paper, we analyze how the ratio of direct beam component and diffused component on global horizontal irradiation varies with the atmospheric conditions. In addition, the reliability of the regression equation, designed to decompose the global horizontal irradiation into horizontal direct beam irradiation and diffused horizontal irradiation, was verified according to the level of air pollution. So, we derive the most suitable decomposition model for use in domestic climatic conditions in Korea by comparing the ratio of direct and diffuse component on the horizontal which is calculated with Perez model and Watanabe model using the meteorological weather data observed for 14 months. Finally, to reduce the error of the transposition result, we verified the reliability of the decomposition which depends on the atmospheric environment.

**Keywords:** 직산분리(Decomposition), 미세먼지(Particulate matter), 경사면 일조량 변환(Transposition), 수평면 일조량(Global horizontal irradiation)

### 기호설명

$I_g$  : 전 수평면 일조량

$I_o$  : 외기 일조량

$k_i$  : 청명 계수(0~1)

OPEN ACCESS



Journal of the Korean Solar Energy Society  
Vol.39, No.4, pp.55-67, August 2019  
<https://doi.org/10.7836/kses.2019.39.4.055>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 30 May 2019

Revised: 25 July 2019

Accepted: 13 August 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.

$k_d$  : 산란 계수(0~1)

$I_{BH}$  : 수평면 직달 일조량

## 그리스 문자

$\beta$  : 태양 고도각(Degree)

$\theta_z$  : 태양 천정각(Degree)

$\delta$  : 적위

## 1. 서론

중국으로부터 불어오는 미세먼지는 인체뿐만 아니라 실외에 설치되어 있는 기기 혹은 장비들에 악영향을 미칠 수 있다. 또한 대기 중에 잔류하는 미세먼지는 시정을 감소시키며 빛의 산란과 흡수 작용을 유발한다. 최근 이러한 문제점들의 진위를 확인하기 위하여 대기오염도와 전 수평면 일조량의 상관관계를 분석한 연구가 활발히 진행되고 있다. 계절별 대기오염물질의 농도에 따라 지면으로 입사하는 전 수평면 일조량과의 상관성을 분석하여 전천 일사량<sup>1)</sup>을 예측하는 모델을 개발하는 기초연구<sup>1)</sup>와 미세먼지 농도에 따라 수원지역에서 실측한 일사량의 변동성을 토대로 수평면 직달 일조량과 전 수평면 일조량과의 상관성을 예측한 연구<sup>2)</sup>는 대기 중의 에어로졸이 지면에 입사하는 빛 에너지의 크기에 미치는 영향만을 분석하였을 뿐 경사면 일조량을 구하기 위해 기본적으로 필요한 전 수평면 일조량의 산란 비 혹은 전 수평면 일조량 직산분리<sup>2)</sup> 모델의 신뢰성에 미치는 영향을 분석한 내용은 아직 부재하다. 또한 미세먼지가 태양광발전시스템의 발전량 출력에 미치는 영향과 그로인해 발전 효율이 어떤 변동성을 보이는지 분석한 연구내용<sup>3,4)</sup>은 미세먼지 농도에 의한 빛의 산란과 흡수 작용을 확인할 수 있는 내용과 거리가 멀기 때문에 실외 기상환경관측 자료와 다목적의 일조량계 측정 자료를 활용하여 미세먼지와 산란 비의 관계를 확인하고 전 수평면 일조량 직산분리 모델의 신뢰성과 연관지어 분석할 필요가 있다.

본 연구는 2018년 1월부터 2019년 4월까지 H대학교 실외 기상환경 및 일조량 측정설비를 통해 축적한 9,326개의 1시간 평균데이터를 활용하여 미세먼지 농도에 따른 대기환경 위험수준이 전 수평면 일조량의 산란 비율에 미치는 영향을 알아보고 더 나아가 미세먼지 농도의 위험수준별 직산분리 모델의 신뢰성을 확인하고자 한다. 또한 9,326개의 데이터를 Perez model과 Watanabe model로 직산분리하여 산출한 결과 값에 따라 국내 기상환경에서 적용되기에 타당한 직산분리 모델을 선별하고 신뢰성을 향상시키는 연구를 향후 계획하여 진행하고자 한다.

1) 전 수평면 일조량

2) 전 수평면 일조량을 수평면 직달 일조량과 수평면 산란 일조량으로 분리시키는 과정

## 2. 연구개요 및 필요성

대기는 오염물질 농도에 따라 혼탁도가 상이하하다. 공기 중 미세한 입자들로 이루어져 있는 오염물질은 시정 효과를 감소시키며 빛의 산란과 흡수 작용을 발생시키므로 그 농도는 빛 에너지를 전기 에너지로 생산하는 태양광발전시스템과 밀접한 관련이 있다. 최근 국내 대기환경오염도는 과거 대비 비교적 높게 측정되고 있으며 이러한 환경적인 변화가 지면으로 입사하는 빛 에너지 산출과정에서 어떠한 영향을 미치는지 알아볼 필요성이 제기되고 있다.

### 2.1 국내 대기환경 오염도 수준

대기환경오염도는 대기오염물인 미세먼지(PM<sub>10</sub>), 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>), 오존(O<sub>3</sub>), 이산화질소(NO<sub>2</sub>), 일산화탄소(CO), 아황산가스(SO<sub>2</sub>) 및 많은 종류의 유해가스에 의해 농도가 결정된다. 특히 미세먼지와 초미세먼지는 입자의 크기에 따라 분류되며 최근 농도가 꾸준히 증가하는 추세를 보인다.

Fig. 1은 경기도 대기환경정보에서 제공하는 경기도 시흥시 정왕동의 미세먼지 농도를 월별 평균으로 정리하여 나타낸 그래프이다. 2019년도에 들어서 미세먼지 농도가 급격하게 증가하는 것을 알 수 있으며 미세먼지(PM<sub>10</sub>)와 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)가 비례하는 것을 확인하였다.

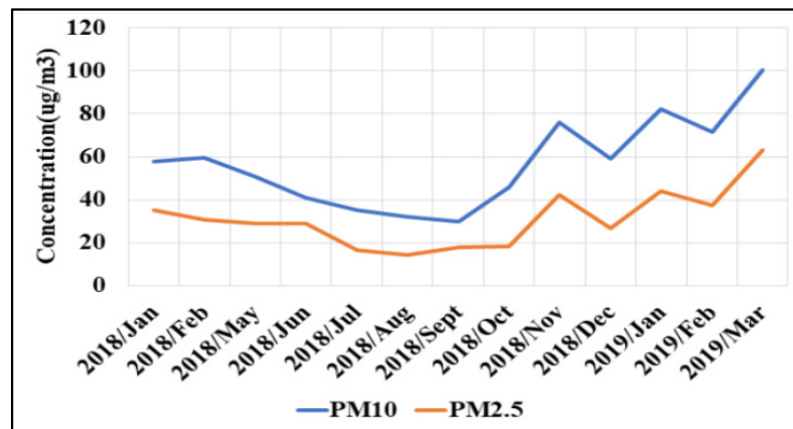


Fig. 1 Graph showing the monthly change in average of PM (Particulate matter) concentration

Fig. 2는 마찬가지로 경기도 대기환경정보에서 제공하는 경기도 시흥시 정왕동의 오존(O<sub>3</sub>), 이산화질소(NO<sub>2</sub>), 일산화탄소(CO), 아황산가스(SO<sub>2</sub>) 농도를 월별 평균으로 정리하여 나타낸 그래프이다. 우측 Y축은 일산화탄소(CO)의 농도이며 좌측 Y축은 나머지 오염물질의 농도를 나타낸다. 네 가지 오염물질은 각기 변화추이가 상이하며 오존의 경우 변동 폭이 매우 큰 것을 알 수 있다. 아황산가스의 경우 과거에 비해 크게 높아지거나 낮아진 사례가 없으며 일산화탄소와 이산화질소의 경우 미세먼지 변화추세와 유사하지만 변동 폭이 미세먼지에 비해 두드러지지 않는 것을 확인할 수 있다.

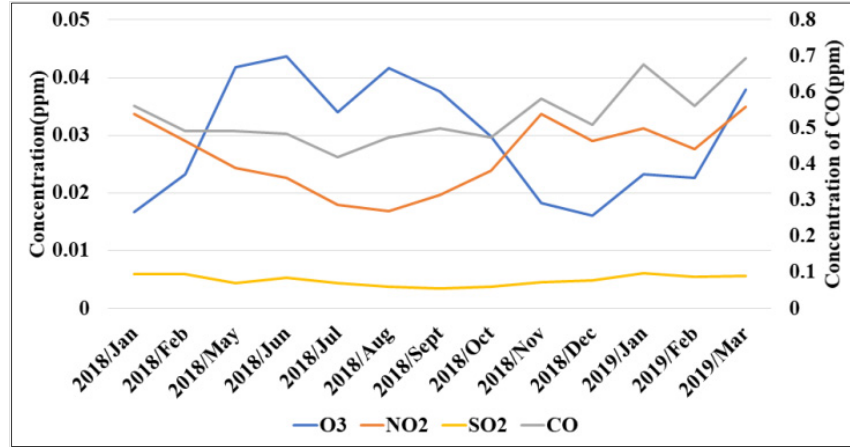


Fig. 2 Graph showing the monthly change in average of O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub> concentration

### 2.2 직산분리 모델의 필요성

태양광발전시스템의 성능을 평가하고 타당성을 분석하는 과정에서 발전량 산출은 매우 중요한 과정이다 (Fig. 3). 태양광발전시스템 출력 발전량을 산출하기 위해서는 모듈의 면적, 설치 경사각 및 방위각, 음영조건 등을 고려한 입력 에너지를 정량적인 데이터로 보유해야 한다<sup>4)</sup>. 태양광발전시스템의 입력 에너지를 예측하기 위해서는 태양전지 어레이의 단위 면적당 빛 에너지양을 정의하는 경사면 일조량 산출이 우선 시 되어야한다. 경사면 일조량을 산출하기 위해 반드시 필요한 과정인 전 수평면 일조량 직산분리는 지면에 입사하는 빛 에너지를 직달 성분과 산란 성분으로 나누는 과정이다.

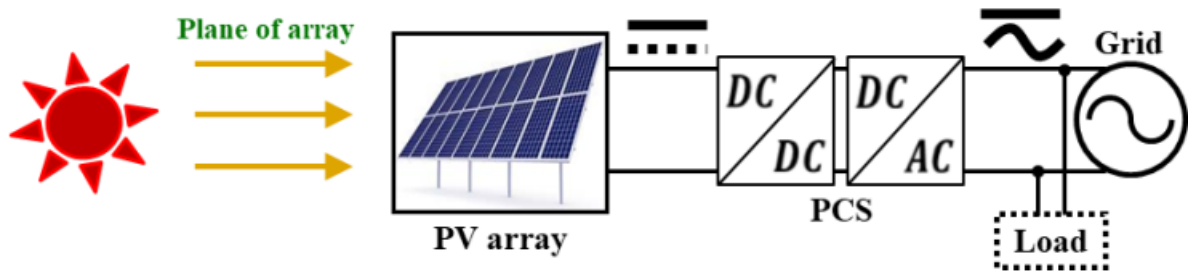


Fig. 3 The process of solar energy to be used as electric energy in PV system

일반적으로 계절마다 일출시간과 태양고도가 다르기 때문에 연간 최대 발전량을 출력하기 위해선 태양전지 어레이를 최적 경사각으로 설치하여 한다. 이 때문에 설치되는 지역의 위도와 경도에 따라 태양전지 어레이의 경사각과 방위각이 다르게 고려되며 태양전지 어레이로 입사하는 일조량이 계절마다 차이가 난다.

태양전지 어레이에 입사하는 일조량은 피라노미터를 이용한 실제 측정 또는 모델을 이용한 계산수식에 의한 산출로 정량화할 수 있다<sup>5)</sup>. 전자는 태양광발전시스템 시공 시 설치하고자하는 태양전지 어레이의 경사각과 동

일한 경사로 피라노미터를 설치하여 데이터를 수집하는 방법이며 후자는 Fig. 4에 나타난 순서도처럼 전 수평면 일조량을 직산분리하여 계산한 수평면 직달 일조량과 수평면 산란 일조량을 경사면 일조량 변환 모델의 변수로 적용하여 산출하는 방법이다. 그러나 태양광발전시스템에 경사면 일조량 데이터를 수집하기 위한 피라노미터를 설치하는 국내 규정은 마련되어 있지 않다. 따라서 경사면 일조량 변환 모델을 사용하여 태양전지 어레이에 입사하는 경사면 일조량을 예측하는 계산 방법의 타당성이 중요한 실정이며 이를 위해 기상환경 조건에 따라 직산분리 모델의 신뢰성을 검증하고 정확성을 향상시킬 방법을 강구해야한다<sup>6)</sup>.

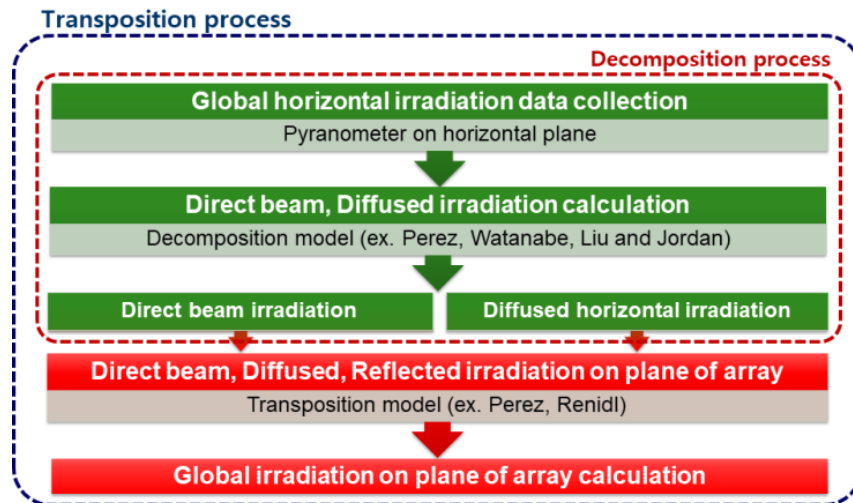


Fig. 4 A schematic diagram illustrating the process for calculating plane of array irradiation from global horizontal irradiation

### 2.3 청명계수( $k_t$ )와 산란계수( $k_d$ )의 상관관계

전 수평면 일조량은 외기일조량이 대기권을 지나 지면에 입사하는 빛 에너지를 의미한다. 이 과정에서 대기 중 수증기, 에어로졸, 구름입자 그리고 수많은 기체화합물에 의해 산란과 흡수 작용이 발생하며 이로 인해 수평면 직달 일조량과 수평면 산란 일조량으로 분류된다. 기존 직산분리 연구에서는 대기권을 통과하기 전 지구로 입사하는 외기일조량과 대기권을 통과하여 지면으로 입사하는 전 수평면 일조량의 비를 정량적으로 표기하였으며 이를 청명계수( $k_t$ )라고 정의한다. 일반적으로 대기에 포함되어 있는 여러 기상요소들의 정확한 정량이 어렵기 때문에 본 연구에서는 청명계수를 통해 기상요소들의 영향정도를 통합적으로 파악하여 천공상태를 표기하였다. 청명계수가 0에 가까울수록 구름의 영향이 크게 미치는 흐린 날을 가정하였으며 1에 가까울수록 구름의 영향이 적게 미치는 맑은 날을 가정하였다. 또한 외기일조량이 대기권을 통과하며 산란 작용에 의해 발생하는 수평면 산란 일조량과 전 수평면 일조량과의 비를 산란계수( $k_d$ )라고 지칭한다. 두 계수의 비례관계를 통해 대기 중 기상요소가 지면에 입사하는 빛의 산란과 흡수 작용에 어떠한 영향을 일으키는지 Fig. 5와 Fig. 6을 통해 확인할 수 있다.

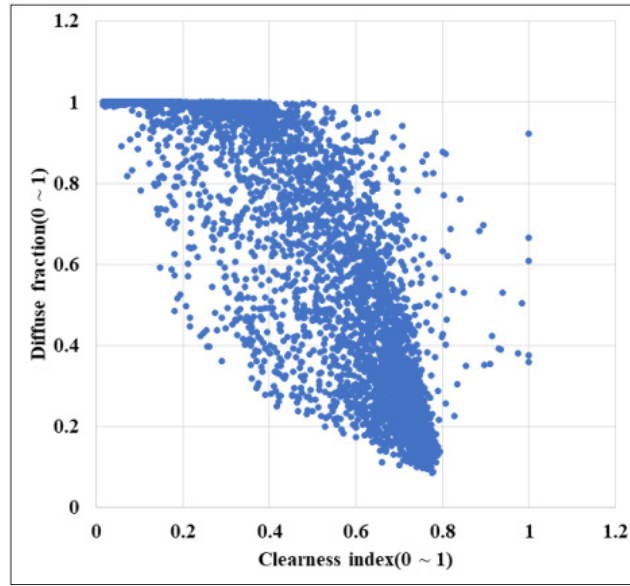


Fig. 5 Diffuse fraction in function of clearness index for measured data, for the period 1st January 2018 to 31st April 2019

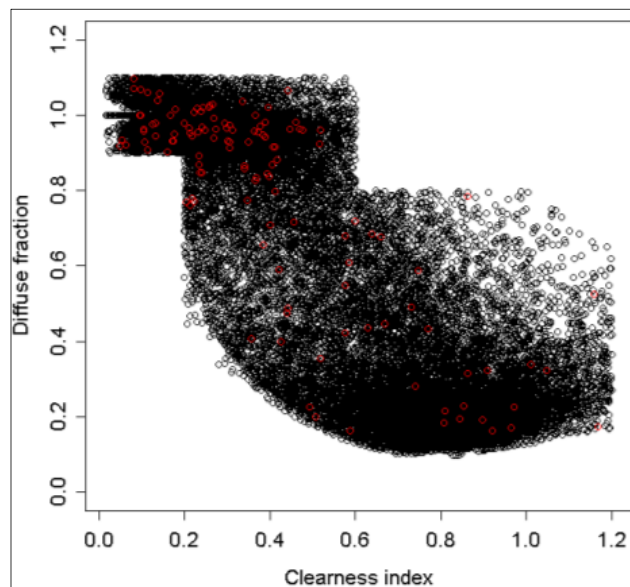





Fig. 6 Diffuse fraction in function of clearness index for irradiance data of Visp<sup>3)</sup> composed by 135,694 hourly data

본 연구에서 상관관계를 분석할 청명계수( $k_t$ )와 산란계수( $k_d$ )를 도출하기 위해 Table 1의 장비들을 이용하여 H대학교 건물 옥상에서 전 수평면 일조강도, 수평면 산란 일조강도, 수평면 직달 일조강도를 실제로 측정하였다. 각 장비로 축적한 데이터를 1시간 평균 데이터로 수집하여 엑셀을 이용하여 청명계수( $k_t$ )와 산란계수( $k_d$ )를 계산하였다.

3) 기상관측소가 설치되어있는 스위스에 위치한 도시이름

**Table 1** Equipments for collection of measured irradiance data in H University

Category	Pyranometer		Pyrheliometer
			
Model / Manufacturer	LP PYRA 02 / Delta OHM	MS-80 / EKO	MS-57 / EKO
Wavelength range	305 nm ~ 2800 nm	285 nm ~ 3000 nm	200 nm ~ 4000 nm
Irradiance range	0 ~ 2000 W/m <sup>2</sup>	0 ~ 4000 W/m <sup>2</sup>	0 ~ 4000 W/m <sup>2</sup>
Response time 95%	< 28 sec	< 0.5 sec	< 0.2 sec
Typical sensitivity	10 uV/(W/m <sup>2</sup> )	10 uV/(W/m <sup>2</sup> )	8 uV/(W/m <sup>2</sup> )
Collection data type	Global horizontal irradiance	Diffused irradiance	Direct beam irradiance
Unit	(W/m <sup>2</sup> )/1·hour	(W/m <sup>2</sup> )/1·hour	(W/m <sup>2</sup> )/1·hour

가시광선영역에서 물체를 명확하게 식별할 수 있는 최대거리를 의미하는 시정(Visibility)은 대기의 혼탁도를 평가하는 척도로 사용되며 청명계수( $k_t$ )와 연관성이 짙다. 하지만 시정과 산란계수( $k_d$ )는 항상 비례하는 관계를 가지지 않으며 직산분리 모델의 개념에서는 대기 중 수증기량이 산란계수( $k_d$ )를 결정하는 가장 영향력이 큰 변수로 알려져 있다. 또한 대기환경오염 수준을 결정하는 기체 화합물 및 미세먼지 뿐만 아니라 다른 에어로졸 요소들도 시정효과에 영향을 미친다. 빛이 지면에 입사하기 위해 통과하는 대기는 운량에 따라서도 시정효과에 영향을 미치지만 본 연구에서는 운량을 관측하고 부분적인 구름의 움직임을 포착할 수 있는 방법이 부족하여 활용하지 않았다. 따라서 복합적인 에어로졸 구조와 수증기를 포함한 대기환경의 오염도에 따른 산란계수( $k_d$ )와 청명계수( $k_t$ )의 상관관계를 분석하였다.

$$\text{외기 일조강도}(I_o, \text{ Extraterrestrial irradiance}) = 1367 \times (1 + 0.0334 \cdot \cos \frac{360}{365} n) \quad (1)$$

$$\text{태양 고도각}(\beta, \text{ Solar altitude angle}) = \sin^{-1} [\cos(L) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(H) + \sin(L) \cdot \sin(\delta)] \quad (2)$$

(n : 일(수), L : 지역 위도,  $\delta$  : 일적위, H : 시간각)

$$\text{청명계수}(k_t, \text{ Clearness index}) = \frac{I_g}{I_o \cdot \sin \beta} \quad (3)$$

$$\text{산란계수}(k_d, \text{ Diffuse fraction}) = \frac{I_{DH}}{I_g} \quad (4)$$

$$I_g \geq 5 \text{ W/m}^2 \quad (5)$$

$$\beta \geq 5^\circ \quad (6)$$

$$I_{BH} \leq I_o \quad (7)$$

식(3), (4)를 이용하여 청명계수( $k_t$ )와 산란계수( $k_d$ )를 구하고 전 실측 데이터를 연구 목적에 맞게 선별하는 작업을 식(5)–(7)을 통해 진행하였다.

Fig. 5는 국내 H대학교 기상관측 장비를 활용하여 계산한 청명계수( $k_t$ )와 산란계수( $k_d$ )의 상관관계 분포도이다. Fig. 6은 Fig. 5의 상관관계 분포도의 타당성을 확인하기 위해 인용된 논문<sup>5)</sup>에서 참조한 청명계수( $k_t$ )와 산란계수( $k_d$ )의 상관관계 분포도이다. Fig. 6의 경우, Swiss의 Visp 도시에서 관측한 135,694개의 1시간 평균 일조강도 데이터를 기반으로 작성되었다. 맑은 날과 흐린 날을 청명계수 기준으로 분류한 뒤 운량을 고려한 데이터 선별 작업을 진행하여 연구목적에 맞게 최적화 시켰다. 따라서 Fig. 6과 같이 부자연스러운 데이터 분포를 나타내지만 가장 이상적인 청명계수( $k_t$ )와 산란계수( $k_d$ )의 상관관계 분포도로 볼 수 있다. 본 연구에서 측정된 데이터로 작성한 Fig. 5의 경우, H 대학교에 설치된 일조량 관측 장비를 통해 얻은 데이터에서 청명계수( $k_t$ )와 산란계수( $k_d$ )가 반비례 관계를 추종하는 것을 알 수 있으며 청명계수( $k_t$ ) 범주 내에서 Fig. 6의 분포도와 데이터 밀집도가 유사하다는 점에서 분석용 데이터로 사용되기에 타당한 것으로 사료된다.

### 3. 직산분리 모델을 이용한 데이터 산출

본 연구에서는 두 가지의 직산분리 모델을 사용하였다. 하나는 미국과 유럽에서 측정된 데이터를 기반으로 경험적 회귀식으로 작성된 Perez model과 다른 하나는 일본 후쿠오카 지역에서 1년 동안 측정된 데이터를 기반으로 작성된 Watanabe model이다. Perez model은 유럽 전역에서 태양광발전시스템을 분석하기 위해 사용하는 프로그램인 PVsyst에서 사용하고 있는 직산분리 모델이다. 그리고 Watanabe model은 아시아 지역에서 다른 직산분리 모델들에 비해 비교적 높은 신뢰도를 가지는 직산분리 모델이다. 국내 H 대학교에서 측정한 실측 전 수평면 일조량을 위 두 모델로 직산분리하여 수평면 산란 일조량과 수평면 직달 일조량 데이터를 산출하였다. Watanabe model의 수식 적용은 Excel을 활용하였으며 Perez model은 Excel과 Matlab을 이용하여 계산을 진행하였다. 총 9,326개의 시간 평균 데이터를 확보하였으며 이 중 식(5)–(7)의 과정을 통해 데이터를 선별하였다. 그리고 각 모델의 계산 결과마다 산란계수( $k_d$ )를 산출하였으며 실측값과 비교해가며 신뢰성을 확인하였다. 본 연구는 미세먼지와 직산분리의 상관관계를 확인하기 위해 9,326개의 데이터 중 미세먼지(PM<sub>10</sub>)와 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)를 제외한 나머지 대기환경오염물질의 농도를 보통이상으로 선별하였다. 즉 비교에 사용된 데이터에서 오존(O<sub>3</sub>) ≤ 0.09 ppm, 이산화질소(NO<sub>2</sub>) ≤ 0.06 ppm, 일산화탄소(CO) ≤ 9 ppm, 아황산가스(SO<sub>2</sub>) ≤ 0.05 ppm 로 각 대기환경오염물질의 위험수준이 보통 이상인 데이터를 선별하여 비교를 진행하였다.



## 4. 데이터 비교 및 결과

### 4.1 직산분리 모델별 신뢰성 검증

미세먼지 농도에 따른 직산분리 모델의 신뢰성 검증에 앞서 9,326개의 1시간 평균 데이터를 활용하여 직산분리 모델별 신뢰성을 검증하였다. 비교는 모델 수식으로 산출한 수평면 직달 일조강도와 수평면 산란 일조강도를 실측 데이터와 비교하여 계산 값과 실측 값 사이의 상관성( $R^2$ )을 확인하였다.

Fig. 7에서 볼 수 있듯이 총 9,326개의 1시간 평균 전 수평면 일조강도를 Watanabe model로 직산분리한 수평면 직달 일조강도와 수평면 산란 일조강도는 실측값과의 상관성( $R^2$ )이 각 0.9231, 0.7122이며 Perez model로 전 수평면 일조강을 직산분리한 수평면 직달 일조강과 수평면 산란 일조강은 실측값과의 상관성( $R^2$ )이 각 0.9394, 0.7706으로 Perez model의 예측성이 Watanabe model보다 더 뛰어나다고 평가할 수 있다. 또한 두 모델 모두 수평면 산란 일조강도의 예측을 실측 수평면 산란 일조강도보다 더 낮게 평가하는 경향을 보인다.

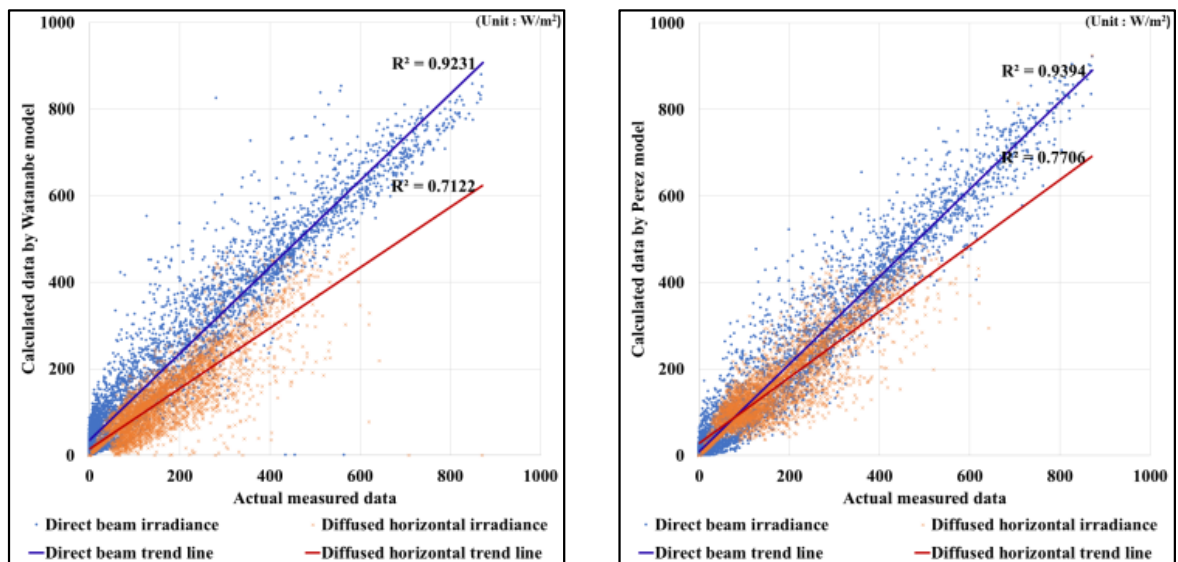


Fig. 7 A distribution graph comparing actual measured data with calculated results of each model

### 4.2 미세먼지 농도가 직산분리 모델의 신뢰성에 미치는 영향

데이터 비교 분석에서 가장 먼저 미세먼지 농도가 최악인 날들을 선정하였다. 경기도 대기환경정보에서 규정한 미세먼지 농도별 위험 수준에서 경기도 시흥시 정왕동의 미세먼지( $PM_{10}$ ) 혹은 초미세먼지( $PM_{2.5}$ ) 농도가 매우 나쁨 수준을 기록한 날들을 Figs. 8, 9와 같이 선정하였다. 총 12일의 미세먼지 농도 최악일이 선정되었으며 이 중 평균 산란 비<sup>4)</sup>가 80% 이상인 날과 80% 미만인 날을 분류하여 각 직산분리 모델로 구한 수평면 직달 일조량과 수평면 산란 일조량의 신뢰성을 확인하였다.

4) 산란 비: 산란계수 \* 100(%)로 정의하며 전 수평면 일조량에 대한 수평면 산란 일조량의 비를 나타냄

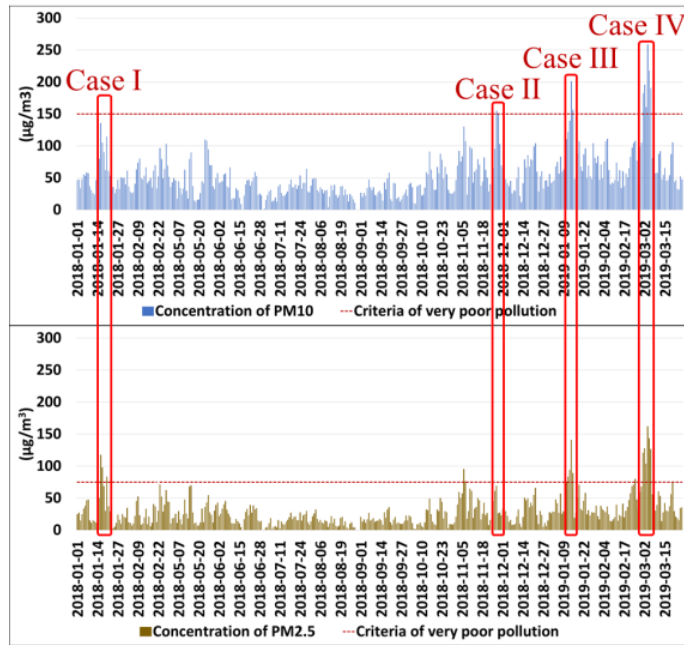


Fig. 8 Selection of the worst day of PM concentration in one year

GHI : Global horizontal irradiance      🟢 : Clear day   🟡 : Cloudiness day

Category	Level of contamination	Date	GHI (kWh)	Diffuse ratio (%)	PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )
Case I	PM <sub>10</sub> : bad	2018-01-16	1.125	97.8 🟡	135.6	117.4
	PM <sub>2.5</sub> : very bad	2018-01-17	2.058	75.5 🟢	105.0	97.5
		2018-01-20	2.217	84.0 🟡	114.7	83.2
Case II	PM <sub>10</sub> : very bad	2018-11-27	1.565	94.5 🟡	154.7	69.3
	PM <sub>2.5</sub> : bad					
Case III	PM <sub>10</sub> : very bad	2019-01-14	1.744	93.7 🟡	201.1	141.0
	PM <sub>2.5</sub> : very bad	2019-01-15	2.002	71.0 🟢	156.7	89.0
Case IV	PM <sub>10</sub> : very bad	2019-03-01	4.462	46.6 🟢	182.3	120.5
		2019-03-02	3.528	64.8 🟢	195.6	127.9
		2019-03-03	4.075	51.1 🟢	160.7	103.5
		2019-03-04	4.201	57.7 🟢	258.6	161.9
		2019-03-05	2.814	89.1 🟡	217.6	143.3
		2019-03-06	2.527	93.0 🟡	190.3	126.4

Fig. 9 A table comparing diffuse ratio according to the worst day selection criteria of PM concentration

미세먼지 위험수준이 매우 나쁜 날들 중 Fig. 10과 같이 실제 산란 비가 80%이상인 6일에 대해서 1시간 평균데이터로 직산분리 모델별 신뢰성을 확인해본 결과 두 모델 모두 수평면 산란 일조강도의 예측 정확성이 매우 높게 나타났다. 하지만 수평면 직달 일조강도의 예측은 실측 값 보다 더 높게 평가하는 경향을 보였다. 또한 Fig. 11에서 볼 수 있듯이 실제 산란 비가 80% 미만인 6일에 대해서는 두 모델 모두 수평면 직달 일조강도의 예측 정확성이 매우 높게 나온 반면 수평면 산란 일조강도의 예측은 실측 값 보다 더 낮게 평가하는 경향을 보였다.

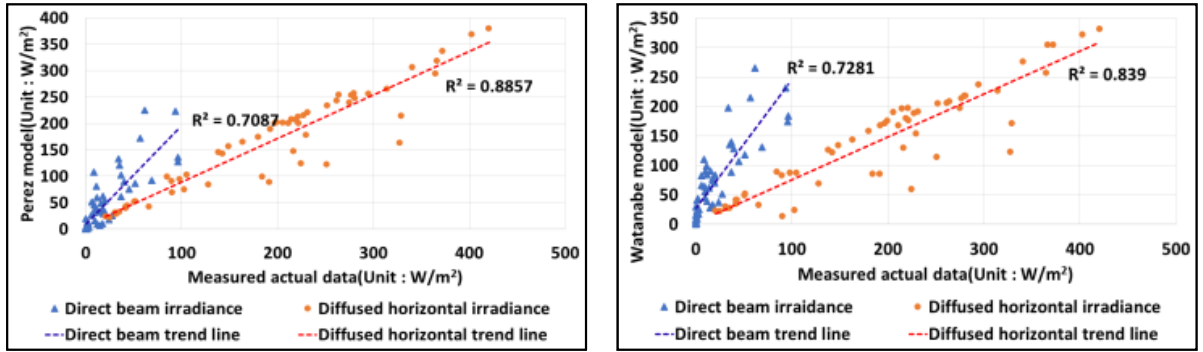


Fig. 10 Reliability evaluation by each model for days when the diffuse ratio is 80% or more among the worst PM concentration

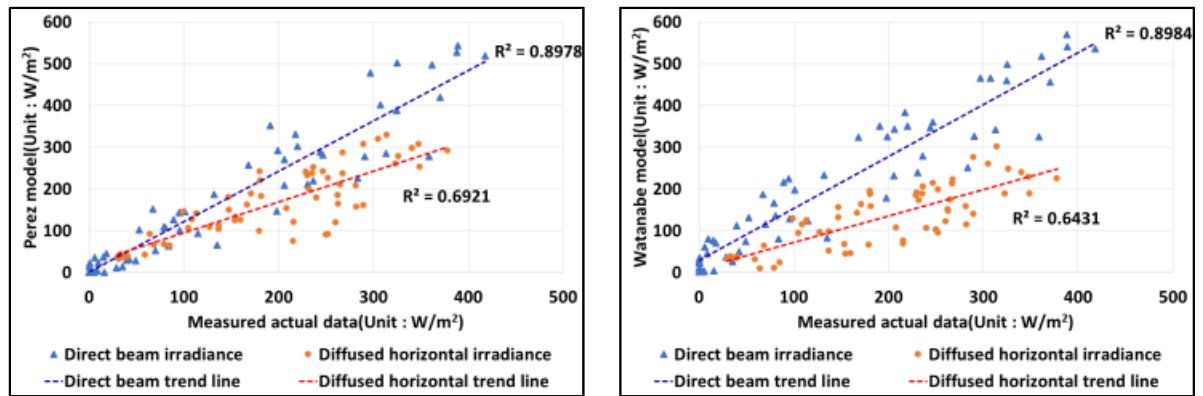


Fig. 11 Reliability evaluation by each model for days when the diffuse ratio is less than 80% among the worst PM concentration

산출한 산란계수( $k_d$ ) 데이터의 비교를 위해 미세먼지 평방 제곱미터 당 미세먼지 질량에 따라 기준을 정하였다. 미세먼지( $PM_{10}$ )  $\leq 80 \text{ ug/m}^3$ , 초미세먼지( $PM_{2.5}$ )  $\leq 35 \text{ ug/m}^3$ 을 미세먼지 상태 보통 이상으로 정량하였고 미세먼지( $PM_{10}$ )  $\geq 81 \text{ ug/m}^3$ , 초미세먼지( $PM_{2.5}$ )  $\geq 36 \text{ ug/m}^3$ 을 미세먼지 상태 나쁨 이하로 정량하였다. 미세먼지 농도 기준별 각 직산분리 모델의 산란계수 신뢰성을 평가하였다.

미세먼지( $PM_{10}$ )와 초미세먼지( $PM_{2.5}$ ) 농도에 따른 위험수준이 보통 이상일 때는 Fig. 12의 그래프처럼 Perez model과 Watanabe model을 이용하여 산출한 산란계수( $k_d$ )가 실측 산란계수( $k_d$ )와 각 0.7675, 0.7072의 상관성( $R^2$ )을 보였다. 하지만 Fig. 13과 같이 미세먼지 위험수준이 나쁨 이하일 때는 Perez model과 Watanabe model을 이용하여 산출한 산란계수( $k_d$ )가 실측 산란계수( $k_d$ )와 각 0.6518, 0.553의 상관성( $R^2$ )을 보였다. 따라서 미세먼지 농도에 따른 위험수준이 높을수록 직산분리 모델로 산출한 산란계수( $k_d$ )의 예측 신뢰성이 낮아지는 것을 알 수 있다.

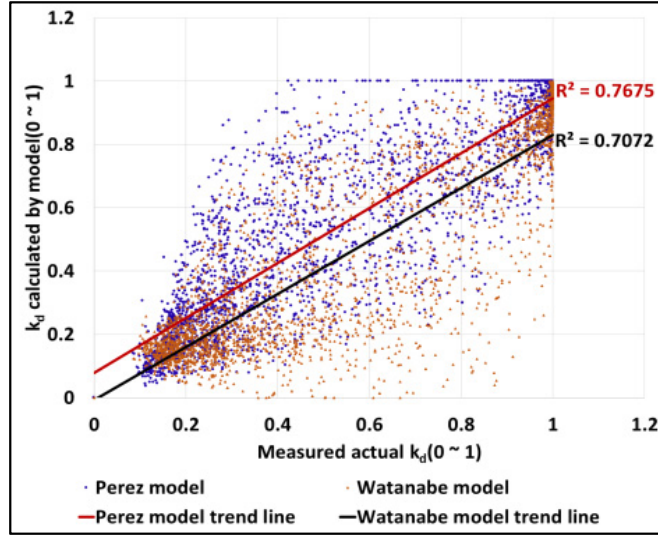


Fig. 12 Reliability distribution of  $k_d$  calculated by decomposition model when PM concentration is above normal

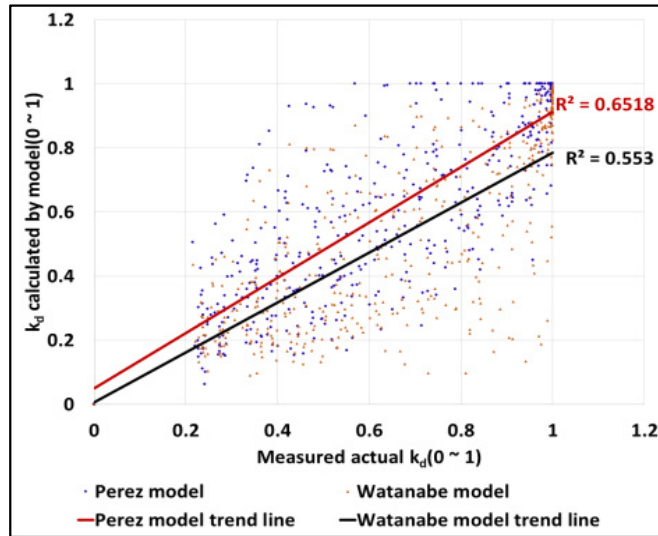


Fig. 13 Reliability distribution of  $k_d$  calculated by decomposition model when PM concentration is less than bad

## 5. 결론

본 논문에서는 Perez model과 Watanabe model로 직산분리하였을 때 미세먼지( $PM_{10}$ )와 초미세먼지( $PM_{2.5}$ ) 농도에 따른 위험수준이 신뢰성에 미치는 영향에 대해 분석하였고 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- (1) 1년 3개월 동안 축적한 9,326개의 1시간 평균 데이터를 활용하여 각 직산분리 모델의 신뢰성을 평가하였을 때 Perez model의 실측 값에 대한 수평면 직달 일조강도 상관성이 Watanabe model의 실측 값에 대한 수평면 직달 일조강도 상관성보다 0.0163 더 높게 나타났으며 수평면 산란 일조강도 상관성 또한 Perez model이 Watanabe model보다 0.0584 더 높게 나타났다. 또한 분포도 그래프에서 Perez model로 산출한 각 일조강도 성분들의 표본집단이 Watanabe model 보다 더  $x=y$  축에 밀집하여 분포하였다. 따라서 국내

에서 Watanabe model을 이용하여 직산분리한 결과보다 Perez model을 이용하여 직산분리하였을 때 신뢰도가 더 높은 것으로 나타난다.

- (2) 미세먼지( $PM_{10}$ )와 초미세먼지( $PM_{2.5}$ )를 제외한 다른 대기환경오염물질 농도의 위험수준이 보통 이상일 때 미세먼지( $PM_{10}$ )와 초미세먼지( $PM_{2.5}$ )의 농도에 따른 위험수준이 최악인 12일을 선정하여 직산분리 모델의 신뢰성을 확인하였다. 12일 중 실제 산란 비가 80% 이상인 날들의 경우 직산분리 모델을 이용하여 수평면 직달 일조강도와 수평면 산란 일조강도를 산출하였을 때 수평면 직달 일조강도의 예측성이 매우 낮게 나왔으며 수평면 산란 일조강도는 예측성이 높게 나타났다. 또한 실제 산란 비가 80% 미만인 날의 경우 두 모델모두 수평면 직달 일조강도를 비교적 정확하게 예측하였으며 수평면 산란 일조강도에 대한 예측성은 다소 떨어지는 것으로 확인됐다. 미세먼지 농도가 매우 높은 날 시정효과와 상관관계가 높은 산란계수( $k_d$ )에 따라 다양한 직산분리 모델을 적용한다면 수평면 직달 일조강도와 수평면 산란 일조강도의 예측성을 크게 향상시킬 것으로 기대된다.
- (3) 미세먼지( $PM_{10}$ )와 초미세먼지( $PM_{2.5}$ ) 농도에 따른 위험수준을 보통 이상과 나쁨 이하로 나누어 각 직산분리 모델로 산출한 산란계수( $k_d$ )의 신뢰성을 확인한 결과, 위험수준이 보통 이상일 경우 각 모델로 산출한 산란계수( $k_d$ )가 실측 산란계수( $k_d$ )와의 상관성( $R^2$ )이 높게 나타났지만 위험수준이 나쁨 이하일 경우 상관성( $R^2$ )이 크게 떨어지므로 미세먼지 농도의 위험수준별로 산란계수( $k_d$ )를 산출할 때 변수를 고려할 필요성이 있다고 사료된다.

## 후기

본 연구는 2018년도 한국에너지공단의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 2018G00342).

## REFERENCES

1. Chung, M. H., The Correlation of Solar Radiation and Atmospheric Elements including Air Pollution, KIEAE Journal, Vol. 19, No. 1, pp. 69-74, 2019.
2. Shim, J. S. and Song, D. S., Applicability of the Solar Irradiation Model in Preparation of Typical Weather Data Considering Domestic Climate Conditions, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 28, No. 12, pp. 467-476, 2016.
3. Son, J. H. and Jeong, S. J., A Research of the Effects of Particulate Matter on Solar Photovoltaic, Conference of Korea Environmental Policy And Administration Society, pp. 52-54, 2019.
4. Kwon, O. H. and Lee, K. S., Photovoltaic System Energy Performance Analysis Using Meteorological Monitoring Data, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 38, No. 4, pp. 11-31, 2018.
5. Lanini, F., Division of Global Radiation Into Direct Radiation and Diffuse Radiation, University of Bern Master's thesis, 2010.
6. Lee, S. H. and Lee, K. S., A Research on the Decomposition Model and Transposition Model Using the Measured Pyranometer Irradiation Data, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 38, No. 3, pp. 1-20, 2018.