

# 피라노미터 실측 일조량을 통한 직산 분리 모델과 경사면 일조량 변환 모델에 관한 연구

이상혁 · 이경수<sup>†</sup>

한국산업기술대학교 에너지·전기공학과

## A Research on the Decomposition Model and Transposition Model Using the Measured Pyranometer Irradiation Data

Lee Sang-Hyuk · Lee Kyung-Soo<sup>†</sup>

Department of Energy &amp; Electrical Engineering, Korea Polytechnic University

<sup>†</sup>Corresponding author: kyungsoolee@kpu.ac.kr

### Abstract

It is a very important and fundamental process to know accurately the intensity of the solar energy coming into the installed module considering the tilted angle. Europe and the US commonly use a program called PVsyst to convert the global horizontal irradiation to global irradiation on tilted plane. There are two types of models that PVsyst uses to convert to irradiation on tilted plane. In this paper, Perez model, which is a decomposition model and Perez model, which is a transposition model used in PVsyst, are applied based on global horizontal irradiation and global irradiation on tilted plane measured in a specific area. The comparison of the decomposition model shows the effect of the transposition model on global irradiation on tilted plane conversion by comparing the ratio of the horizontal diffuse irradiation amount of the Watanabe model which are highly trusted in Asia and the Perez model. The comparison of transposition model confirm the error between the measured data and the calculated value which is applied Perez model to global horizontal irradiation decomposed by Perez model and Watanabe model. Based on the two comparisons, This paper propose a method to confirm the reliability of transposition model and reduce the error when PVsyst is used in Korea.

**Keywords:** 직산분리(Decomposition), 경사면 일조량 변환(Transposition), 수평면 일조량(Global horizontal irradiation), 경사면 일조량(Global Irradiation tilted plane)

### 기호설명

$I_g$  : 전 수평면 일조량

$I_o$  : 외기 일조량

$I_C$  : 경사면 일조량

$I_n$  : 법선면 직달 일조량

 OPEN ACCESS


Journal of the Korean Solar Energy Society  
Vol.38, No.3, pp.1-20, June 2018  
<https://doi.org/10.7836/kSES.2018.38.3.001>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 18 January 2018

Revised: 11 May 2018

Accepted: 14 June 2018

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.

- $I_{BH}$  : 수평면 직달 일조량
- $I_{DH}$  : 수평면 산란 일조량
- $I_{BC}$  : 경사면 직달 일조량
- $I_{DC}$  : 경사면 산란 일조량
- $I_{RC}$  : 경사면 반사 일조량
- $k_t$  : 청명 계수(0~1)
- $m_{air}$  : 대기 질량
- $K_{t,clear}$  : 청명 기준일 계수
- $K_{DS}$  : 산란 일사율(0~1)
- $Kn_c$  : 최대 청명계수
- $\Delta Kn$  : 청명도 변화율
- $k'_t$  : 정규화된 청명계수
- $W$  : 가강수량
- $\Delta k'_t$  : 안정계수
- $F_1$  : 외기에서 태양 주위로 번지는 빛의 계수
- $F_2$  : 수평면 띠에서 분산되는 빛의 계수
- $R_h$  : 상대 습도
- $T_{air}$  : 외기온도(°C)

## 그리스 문자

- $\alpha$  : 태양전지 경사각(Degree)
- $\beta$  : 태양 고도각(Degree)
- $\theta_z$  : 태양 천정각(Degree)
- $\theta_c$  : 태양전지 입사각(Degree)
- $\rho$  : 지면반사율(Albedo)
- $\Delta$  : 하늘 밝기
- $\epsilon$  : 청명 지수

## 1. 서론

대한민국 정부의 신재생에너지 확대 정책으로 태양광사업이 새롭게 주목받고 있다. 제4차 신재생에너지 기

솔개발 및 이용, 보급 기본계획을 수립하여 2035년까지 신재생에너지 비중을 11%까지 확대할 계획이다.<sup>1</sup> 태양광 발전 설치 부지가 제한적인 국내에서는 태양에너지를 합리적으로 이용하기 위해 경사각 모듈을 설치하여 태양광 발전 수요를 확대해 나간다. 특정 지역에서 정확한 경사면 일조량을 예측할 수 있다면 발전량 또한 정확한 예측이 가능하게 되고 태양광 발전량 산정에 대한 신뢰를 얻게 된다. 하지만 아직까진 수평면 일조량을 변환한 경사면 일조량의 정량화와 실측 경사면 일조량과의 비교를 통한 신뢰도 분석에 대한 연구 내용이 미비한 실정이다.

태양광 모듈에 입사하는 경사면 일조량을 산정하는 방법은 실제 측정법과 모델 적용 계산법으로 나뉜다. 실제 측정은 태양광 발전 지역에서 모듈 경사면에 동일한 각도로 경사각을 주어 일조량계를 설치하여 모니터링 데이터를 수집하기 때문에 경사면 일조량이 정확하다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 모델 적용 계산법은 기존 해외에서 연구되었던 수평면 일조량 직산분리 과정을 통해 얻을 수 있는 수평면 직달 일조량과 수평면 산란 일조량을 경사면 일조량 변환 모델에 적용하여 경사면 일조량을 예측할 수 있다<sup>1,2)</sup>.

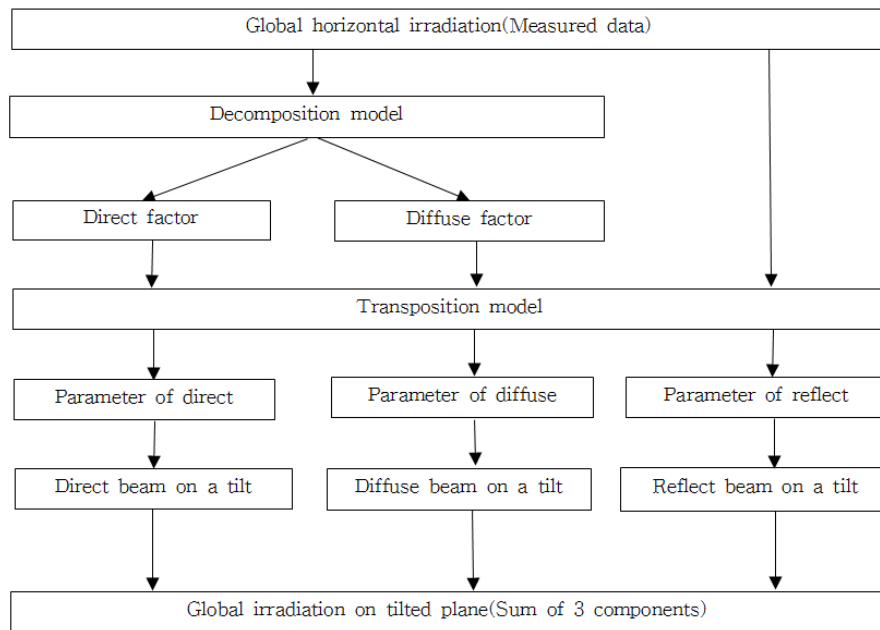


Fig. 1 Flowchart for the calculation method applying the model

모델 적용 계산법에 의해 얻어지는 경사면 일조량은 실측값보다 가격이나 시간적인 측면에서 절약이 가능하지만 정확한 신뢰성이 떨어진다. 국내에서는 경사면 일조량 변환 모델의 신뢰도에 대한 검증이 건축 환경 연구 분야에서 활발하게 이루어지고 있다. 건물에 태양광 모듈을 부착하는 각도에 따라 입사하는 에너지의 양은 달라지기 때문이다. 따라서 건물에 입사하는 일조량 분석에 관한 기존 연구는 경사면 일조량 변환 모델이 건물 높

1 산업통상자원부, “신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급촉진법”

이에 따라 일조량의 신뢰도가 달라진다는 결과를 보였다. 그러나 건물높이와 고정 경사각에 따른 경사면 일조량 변환 모델에 대한 신뢰도를 정량화했을 뿐 직산분리 모델에 대한 신뢰도를 함께 정량화하지 않았다<sup>3,4)</sup>.

본 논문은 경사각 고정형 태양광 발전시스템에서 얻을 수 있는 실측 수평면 일조량과 경사면 일조량을 바탕으로 유럽 전역에서 발전량을 예측하기 위해 많이 사용하는 프로그램인 PVsyst에서 사용하는 직산분리 모델과 경사면 일조량 변환 모델을 국내에서 적용해도 타당한지에 대해 알아본다. Fig. 2와 같이 경기도 시흥시 한국산업기술대학교 E동 옥상에 설치되어 있는 태양광 발전 설비에서 얻을 수 있는 실측 수평면 일조량을 직산분리 모델에 적용하여 수평면 직달 일조량과 수평면 산란 일조량으로 나눈다. 그리고 PVsyst에서 사용하고 있는 경사면 일조량 변환 모델인 Perez model을 적용하여 경사면 일조량으로 변환한다. 산출한 경사면 일조량을 Fig. 2처럼 옥상에 25°로 설치되어 있는 실측 경사면 일조량과 비교하여 모델의 정확도를 정량화한다. 그리고 경사면 일조량으로 변환하는 과정에서 생긴 오차에 대한 원인을 파악한다.


Pyranometer specification	Model: LP PYRA 02 Measuring range: 0-2000W/m <sup>2</sup> Spectral range: 305-2800nm W/m <sup>2</sup> Response time: < 28sec ISO 9060 Specification	
Pyranometer location	Latitude: 37.34° N Longitude: 126.74° E Altitude: 43m	

Fig. 2 Pyranometer used in the measured data

## 2. 경사면 일조량 산출을 위한 두 가지 모델의 이론적 해석

수평면 일조량을 경사면 일조량으로 바꾸기 위해 기상 데이터 변수들을 대입시킨 모델에 대해 이론적으로 해석하였다. 경사면 일조량을 산출하기 위해서는 첫 번째 단계로 실측 수평면 일조량을 수평면 직달 일조량과 수평면 산란 일조량으로 나누어 주는 직산분리 모델(Decomposition model)을 적용해야 한다.

직산분리 모델에 대한 만든 연도, 연구 대상 지역 등을 Table 1에 나타냈다. 각 모델마다 매개변수가 다르며 수식이 서로 상이하다. PVsyst에서 직산분리에 적용되는 모델은 버전 5 이전엔 Erbs correlation model을 적용하였으며, 현재 버전 6부터는 Perez model을 사용한다. 그 이유는 Perez model은 15개 지역에서 시간별 일조 데이터를 기반으로 만들어졌으며 Erbs correlation model보다 수평면 산란 일조량을 구하는 방법이 매개 변수에 따라 더 구체화되어 있기 때문이다. 따라서 본 논문은 Table 1의 직산분리 모델 중에 PVsyst 자체 내에서 적용되는 Perez model<sup>5)</sup>과 비교 대상으로 아시아 지역에서 다른 모델들에 비해 비교적 높은 신뢰도<sup>6)</sup>를 가지는 Watanabe model<sup>7)</sup>을 해석하고 실측 수평면 일조량을 두 모델에 적용하여 직산분리를 진행하였다.

**Table 1** Decomposition models

Models	Year	Experimental site	Parameters
Orgill and Hollands	1977	Canada	$k_t$
Erbs	1982	USA	$k_t$
Watanabe	1983	Japan	$k_t, \beta, K_{DS}$
Reindl	1990	USA & Europe	$k_t, \beta$
Perez	1992	USA & Europe	$k_t, m_{air}, X(k'_t, \theta_z, W, \Delta k'_t)$

두 번째 단계로 직산분리를 통해 구한 수평면 직달 일조량과 수평면 산란 일조량을 경사면 일조량 변환 모델 (Transposition model)의 변수로 적용시켜 경사면 일조량을 산출한다. Table 2에서 볼 수 있듯이 수평면 일조량을 경사면 일조량으로 바꾸는 모델은 사용하는 변수들에 따라 다양하다. Table 2에서 4개의 경사면 일조량 변환 모델 중에 PVsyst에서 적용되는 모델은 버전 5 이전에는 등방성(isotropic) 모델 중 하나인 Hay/ Davies model을 사용하여 비등방성(anisotropic) 모델들보다 경사면 산란 일조량이 산출이 정확하지 않았다. 하지만 현재 버전 6부터는 비등방성 모델인 Perez model을 사용한다<sup>8)</sup>. 모델을 적용하는 지역에 따라 모델마다 정확도가 차이가 나기 때문에 본 논문에서는 Perez model을 적용하여 변환한 경사면 일조량과 실측 일조량을 비교하여 오차를 정량화한다.

**Table 2** Transposition models

Models	Parameters
Isotropic	$\alpha, I_{DH}$
Sandia	$\alpha, I_{DH}, I_g, \beta$
Hay/Davies	$\alpha, I_{DH}, I_n, \beta, SunAzimuth, I_o$
Perez	$\alpha, I_{DH}, I_n, I_g, \beta, \theta_c, SunAzimuth, I_o, m_{air}$

### 2.1 수평면 일조량 직산분리 모델

직산분리 모델은 일본 후쿠오카 지역에서 1년 동안 측정된 데이터를 기반으로 만들어진 Watanabe model과 미국과 유럽에서 실측 데이터 기반으로 만들어진 Perez model을 사용한다. 수평면 일조량은 각 모델에 의해서 수평면 직달 일조량과 수평면 산란 일조량으로 나누어지는데 서로 다른 직산분리 모델을 사용할 경우 경사면 일조량 변환 결과가 달라진다. 따라서 경사면 일조량 변환 모델 적용 전 선행 연구로 직산 분리로 얻어진 수평면 직달 일조량과 수평면 산란 일조량의 비율이 모델마다 얼마나 차이가 나는지 그리고 경사면 일조량에 어떤 영향을 미치는지 알아본다.

(1) Watanabe model

Watanabe model은 실측된 전 수평면 일조량과 실측된 수평면 산란 일조량을 바탕으로 작성된 상관관계식이다. 먼저 수평면 일조량과 외기 일조량의 반비례 관계를 통해 형성되는 청명계수(Clearness index)를 변수로 사용하며, 청명일 기준 계수(Clearness index of the atmosphere)에 따라 하늘의 상태를 담천공(Overcast day)<sup>2</sup>과 청천공(Clear sky day)<sup>3</sup>으로 나누고 두 가지 천공 상태에 대해 달라지는 산란일사율과 태양 고도각을 변수의 계수로 넣어 식(7)의 수평면 직달 일조량과 식(8)의 수평면 산란 일조량을 구한다.

$$k_t (\text{청명계수}) = \frac{I_g}{I_o \cdot \sin\beta} \tag{1}$$

$$K_{t,clear} (\text{청명기준일계수}) = 0.4268 + 0.1934 \cdot \sin\beta \tag{2}$$

$$k_t \geq K_{t,clear} \text{ 일 때 (청천공)} \tag{3}$$

$$K_{DS} = k_t - (1.107 + 0.03569\sin\beta + 1.681\sin^2\beta) \cdot (1 - k_t)^3 \tag{4}$$

$$k_t < K_{t,clear} \text{ 일 때 (담천공)} \tag{5}$$

$$K_{DS} = (3.996 - 3.862\sin\beta + 1.54\sin^2\beta) \cdot Tk_t^3 \tag{6}$$

$K_{DS}$ 는 산란일사율

$$I_{BH} = \frac{I_o \sin\beta \cdot K_{DS}(1 - k_t)}{1 - k_{DS}} \tag{7}$$

$$I_{DH} = \frac{I_o \sin\beta \cdot (k_t - K_{DS})}{1 - K_{DS}} \tag{8}$$

(2) Perez model

Perez model을 적용하여 직산분리를 하기 위해서는 우선 DISC 알고리즘이라는 1987년 8월에 Maxwell이

<sup>2</sup> 담천공: 천공은 하늘의 상태를 나타내는 지표이며, 담천공은 청명계수 기준으로 흐린 날을 뜻한다.

<sup>3</sup> 청천공: 청명계수 기준으로 맑은 날을 뜻한다.

투고한 논문 내용을 확인하여야한다<sup>9)</sup>. DISC 알고리즘은 실측 된 전 수평면 일조량과 수평면 직달 일조량을 바탕으로 만들어진 계수 함수다. 시간에 따라 변하는 일조강도 값을 사용하여 만든 모델로 첫 번째는 청명계수에 따라 천공 상태를 구분하고 천공 상태에 따라 계수 a, b, c의 값을 구한다. 변수인 대기 질량(Airmass) 값에 관계식을 적용하여 청명도 변화율(A reduction of the clearness index)을 구한다. 두 번째는 대기 질량(Airmass)을 변수로 적용하여 구할 수 있는 청천공에서의 최대 청명계수(A maximum for the clearness index for cloudless sky)를 구하고 청명도 변화율과의 차를 외기 일조량에 곱해 법선면 직달 일조량(Direct normal irradiance)을 구한다.

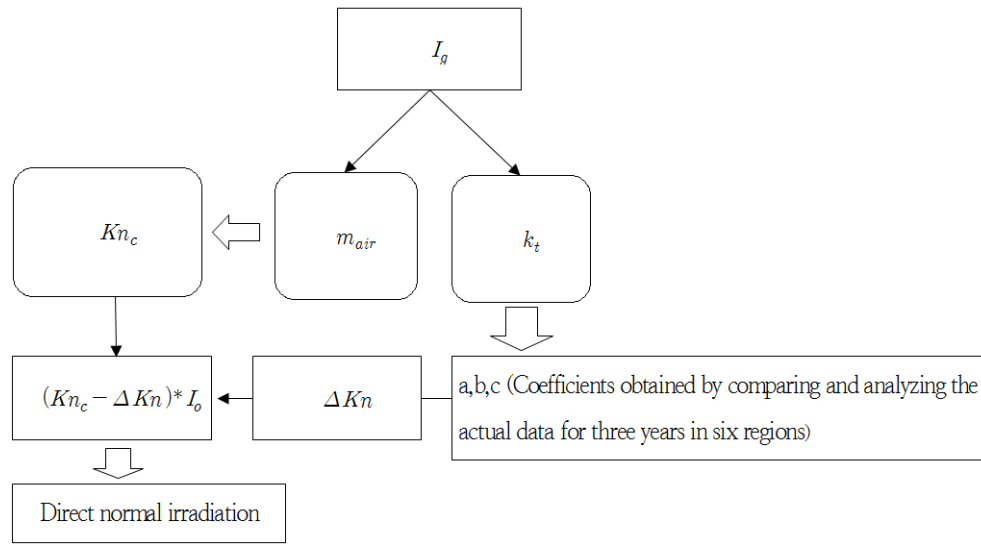


Fig. 3 The process of applying the DISC Algorithm

$$k_t(\text{청명계수}) = \frac{I_g}{I_o \cdot \sin\beta} \tag{9}$$

$$m_{air}(\text{대기 질량}) = \frac{1}{\sin\beta + \frac{0.50572}{(\beta + 6.07995)^{1.6364}}} \tag{10}$$

$$Kn_c(\text{최대 청명 계수}) = 0.866 - 0.122(m_{air}) + 0.0121(m_{air})^2 - 0.000653(m_{air})^3 + 0.000014(m_{air})^4 \tag{11}$$

if  $k_t \leq 0.6$

$$a = 0.512 - 1.56 * k_t + 2.286 * k_t^2 - 2.222 * k_t^3 \tag{12}$$

$$b = 0.37 + 0.962 * k_t \tag{13}$$

$$c = -0.28 + 0.932 * k_t - 2.048 * k_t^2 \tag{14}$$

or  $k_t > 0.6$

$$a = -5.746 + 21.77 * k_t - 27.49 * k_t^2 + 11.56 * k_t^3 \tag{15}$$

$$b = 41.4 - 118.5 * k_t + 66.05 * k_t^2 + 31.9 * k_t^3 \tag{16}$$

$$c = -47.01 + 184.2 * k_t - 222 * k_t^2 + 73.81 * k_t^3 \tag{17}$$

시간마다 달라지는  $k_t$  값에 따라 구한 a, b, c(식(4)부터 (9))를 식(10)에 대입하여  $\Delta Kn$ 을 구한다.

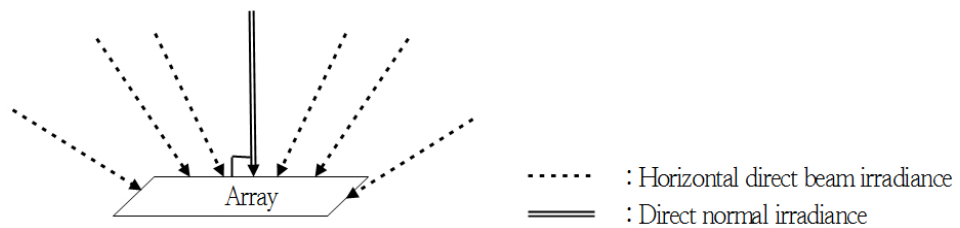
$$\Delta Kn = a + b * \exp[c * (m_{air})] \tag{18}$$

$$Kn = Kn_c - \Delta Kn \tag{19}$$

$$I_n \text{ (Direct normal irradiance)} = I_o * Kn \tag{20}$$

앞서 해석한 DISC 알고리즘으로 구한 법선면 직달 일조량은 수평면 직달 일조량과 다른 차이가 있다.

Fig. 4에서 볼 수 있듯이 태양전지의 법선면에 수직으로 들어오는 시간당 일조강도 합을 법선면 직달 일조량이라 하고 그 이외의 각도에서 태양전지에 들어오는 직달 일조강도의 합을 수평면 직달 일조량이라고 한다. Perez model은 DISC 알고리즘을 바탕으로  $6 \times 6 \times 5 \times 7$  행렬 계수 함수인  $X(k'_t, \theta_z, W, \Delta k'_t)$ 를 법선면 직달 일조량에 적용시켜서 수평면 직달 일조량을 얻는다.



**Fig. 4** The difference between direct normal irradiance and horizontal direct beam irradiance



$X(k'_t, \theta_z, W, \Delta k'_t)$  에서  $k'_t$  는 정규화된 청명계수를 나타내는데 태양 고도각에 따라 값이 바뀌는  $k_t$  에서 대기 질량이 기하급수적으로 바뀔 때 반비례 상관관계를 나타내는 매개 변수이며  $k_t$  값보다 더 명확하게 대기 상태를 나타낸다.

$$k'_t = \frac{k_t}{1.031 \cdot \exp\left(\frac{-1.4}{0.9 + \frac{9.4}{m_{air}}} + 0.1\right)} \quad (21)$$

태양 천정각인  $\theta_z$  가  $X$  행렬 계수 함수에 포함 된 이유는 DISC 알고리즘으로 구한 법선면 직달 일조량을 태양 고도에 따라 수평면 일조량으로 바꿔야하므로 시간별 태양 천정각의 코사인 값이 필요하다.

$W$  는 가강수량이다. 대기 중에 포함되어 있는 모든 물의 양을 나타내는데 이 매개 변수가 필요한 이유는 산란 되는 빛과 수직으로 들어오는 빛 양의 비례관계를 알 수 있기 때문이다. 즉 산란은 빛의 굴절 때문에 나타나고 대기 중에 포함되어 있는 수증기의 양이 증가할수록 산란이 더 크게 일어나기 때문에 수직으로 들어오는 빛의 양이 줄어든다.

$$W(\text{가강수량}) = \exp(0.07 \cdot Td - 0.075) \quad (22)$$

여기서,  $Td$  는 표면의 이슬점 온도를 나타내며 변수  $H$  에 의해서 구할 수 있다.

$$Td = \frac{243.12H}{17.62 - H} \quad (23)$$

또한 변수  $H$  는 외기온도와 지면으로부터 2~5m 떨어진 구역에서 측정한 상대 습도가 변수로 주어진 로그함수로 구할 수 있다.

$$H = \ln\left(R_h + e^{\frac{17.62 T_{air}}{243.12 + T_{air}}}\right) \quad (24)$$

마지막 매개 변수인  $\Delta k'_t$  는 안정계수(Stability index)이다. 특정 날에 일사 조건이 안정적이면 값이 작아지고 불안정하면 값이 커진다. 흐린 날에도 시간마다 흐린 정도와 청명계수가 달라지기 때문에  $X$  행렬함수에서 1 시간 간격으로 달라지는 대기 상태의 안정도를  $\Delta k'_t$  로 표현하여 변수로 지정하였다.

$$\Delta k'_t (\text{안정 계수}) = \frac{[|k'_{t,i} - k'_{t,i+1}| + |k'_{t,i} - k'_{t,i-1}|]}{2} \quad (25)$$

여기서,  $i$ 는 시간 간격을 나타낸다.

일사 조건에 의한 매개 변수 4가지를 통해  $6 \times 6 \times 5 \times 7$  행렬에서 함수 값을 찾아내어 법선면 직달 일조량와 곱하여 수평면 직달 일조량을 구할 수 있다.

$$I_{BH} = I_n \cdot X(k'_t, \theta_z, W, \Delta k'_t) \quad (26)$$

따라서,  $I_g = I_{BH} + I_{DH}$  이므로 수평면 산란 일조량도 구할 수 있다.

## 2.2 경사면 일조량 변환 모델

### (1) Perez model

경사각을 가지고 있는 태양전지에 들어오는 빛의 양을 정확하게 파악하기 위해서는 빛의 3가지 성분을 알아야 한다. 첫 번째가 경사면 직달 일조량이고 두 번째가 경사면 산란 일조량 그리고 마지막이 경사면 반사 일조량이다.

경사면 직달 일조량은 법선면 직달 일조량에서 태양이 경사각을 가지고 있는 태양전지에 입사하는 각도의 코사인 값을 곱해주면 된다.

$$I_{BC} = I_n \cdot \cos(\theta_c), \quad I_n = \frac{I_{BH}}{\sin\beta}$$

$$\text{따라서 } I_{BC} = I_{BH} \cdot \frac{\cos(\theta_c)}{\sin\beta} \quad (27)$$

여기서  $\frac{\cos(\theta_c)}{\sin\beta}$  는  $R_bfactor$ 라고 명칭한다.

경사면 반사 일조량은 전 수평면 일조량에 지면 반사율(Albedo) 값을 곱하고 경사각에 의해 태양전지가 반사광선을 받는 비를 곱해주어 얻는다. 본 논문에서는 지면 반사율을 Liu & Jordan이 제시한 0.2 상수 값으로 설정하였다<sup>10)</sup>.

$$I_{RC} = I_g \cdot \rho \cdot \left(\frac{1 - \cos\alpha}{2}\right) \quad (28)$$

경사면 산란 일조량을 구하기 위해 사용되는 Perez model은 Anisotropic model 종류 중 하나이다. 따라서 빛이 모든 방향에서 불균등하게 들어온다는 조건을 바탕으로 필요한 3가지 요소를 알아야한다. 3가지 요소들은 Perez model의 함수에서 각각 계수로 사용되게 되는데 이때 적용되는 함수에 대한 변수는 앞서 구했던 수평면 산란 일조량을 사용한다.

첫 번째 요소는 Isotropic model을 적용한다. 등방성 모델을 적용함으로써 산란되는 빛은 모든 방향에서 균등하게 들어온다는 가정 하에 외기에서 들어오는 태양 빛 주위로 산란되는 빛의 계수를 제외한 값을 수평면 산란 일조량에 곱해주고 태양전지 경사각에 비례한 상수를 곱해주어 Isotropic model을 적용한 경사면 산란 일조량을 구한다.

$$\text{요소 1. } I_{DH}[(1 - F_1) * 0.5(1 + \cos\alpha)] \tag{29-1}$$

두 번째 요소는 외기에서 들어오는 태양 빛 주위(Circumsolar zone)로 산란되는 빛의 성분이다. 태양의 고도에 따라 태양전지에 들어오는 산란 빛의 세기는 달라지므로 Perez가 제시한 태양주위로 비추는 빛의 계수( $F_1$ )를 수평면 산란 일조량에 곱한다. 또 태양전지 입사각에 비례하고 태양 천정각에 반비례하는 계수를 곱해주어 두 번째 경사면 산란 일조 성분을 구한다.

$$\text{요소 2. } I_{DH} * F_1 * \frac{a}{b} \tag{29-2}$$

여기서  $a = \max(0, \cos(\theta_c))$ ,  $b = \max(0.087, \cos(\theta_z))$

세 번째 요소는 수평면 띠(Horizon ribbon)에서 산란되는 빛의 성분이다. 마찬가지로 Perez가 제시한 수평면 띠에서 산란되는 빛의 계수( $F_2$ )를 수평면 산란 일조량에 곱해주고 태양전지 경사각의 사인 값을 비례 계수로 곱해주면 구할 수 있다.

$$\text{요소 3. } I_{DH} * F_2 * \sin\alpha \tag{29-3}$$

위의 식 (29-1, 29-2, 29-3)을 모두 더해주어 식(30)과 같이 경사면 산란 일조량을 구한다.

$$I_{DC} = I_{DH}[(1 - F_1) * 0.5(1 + \cos\alpha)] + I_{DH} * F_1 * \frac{a}{b} + I_{DH} * F_2 * \sin\alpha \tag{30}$$

각 계수들에 대한 수식은 다음과 같다.

$$F_1 = F_{11} + F_{12} * \Delta + F_{13} * \theta_z \text{ (circumsolar brightening coefficient)} \tag{31}$$

$$F_2 = F_{21} + F_{22} * \Delta + F_{23} * \theta_z \text{ (horizon band brightening coefficient)} \tag{32}$$

$$\Delta = I_{DH} * m_{air} / I_o \text{ (Sky brightness parameter)} \tag{33}$$

**Table 3** Variables required for the Perez model's light coefficient equation

$\epsilon$	$F_{11}$	$F_{12}$	$F_{13}$	$F_{21}$	$F_{22}$	$F_{23}$
1	-0.008	0.588	-0.062	-0.060	0.072	-0.022
2	0.130	0.683	-0.151	-0.019	0.066	-0.029
3	0.330	0.487	-0.221	0.055	-0.064	-0.026
4	0.568	0.187	-0.295	0.109	-0.154	-0.014
5	0.873	-0.392	-0.362	0.226	-0.462	0.001
6	1.132	-1.237	-0.412	0.288	-0.823	0.056
7	1.060	-1.600	-0.359	0.264	-1.127	0.131
8	0.678	-0.327	-0.250	0.156	-1.377	0.251

$$\epsilon = (I_{DH} + I_{BH}) / I_{DH} + k * \theta_z^3 / (1 + k * \theta_z^3) \text{ (Sky clearness parameter)} \tag{34}$$

( $k=1.041$  상수 값을 가진다)

위 식(27, 28, 30)에서 구한 경사면 직달 일조량, 산란 일조량, 반사 일조량을 모두 더해주어 식(35)와 같이 경사면 일조량을 구한다.

$$I_C = I_{BC} + I_{RC} + I_{DC} \tag{35}$$

### 2.3 PVsyst 프로그램

PVsyst<sup>11)</sup>는 태양광 발전 설치 전에 선행으로 이루어질 수 있는 발전량 예측과 발전소 설계의 이정표 역할을 한다. 입력 데이터인 수평면 일조량을 대입하면 PVsyst 내에서 모델 수식을 적용하여 데이터파일을 생성하는 방식으로 경사면 일조량을 예측하며 시스템 손실들과 모듈, 인버터 정격 용량에 맞는 발전용량을 산정하고 실제 예측 발전량을 산출한다.

PVsyst는 직산분리와 경사면 일조량 변환이 동시에 이루어지기 때문에 Fig. 5와 같이 월별 수평면 일조량을 삽입하여 월마다 경사면 일조량의 결과 값을 정량화한다. PVsyst는 자체적으로 직산 분리 모델을 적용시키고 결과 값에 경사면 일조량 변환 모델을 적용시키는 알고리즘을 적용하므로 경사면 일조량 산출이 시간별로 일정

하지 않다. 따라서 실측값과 비교를 통해 정확도를 확인할 필요가 있다.

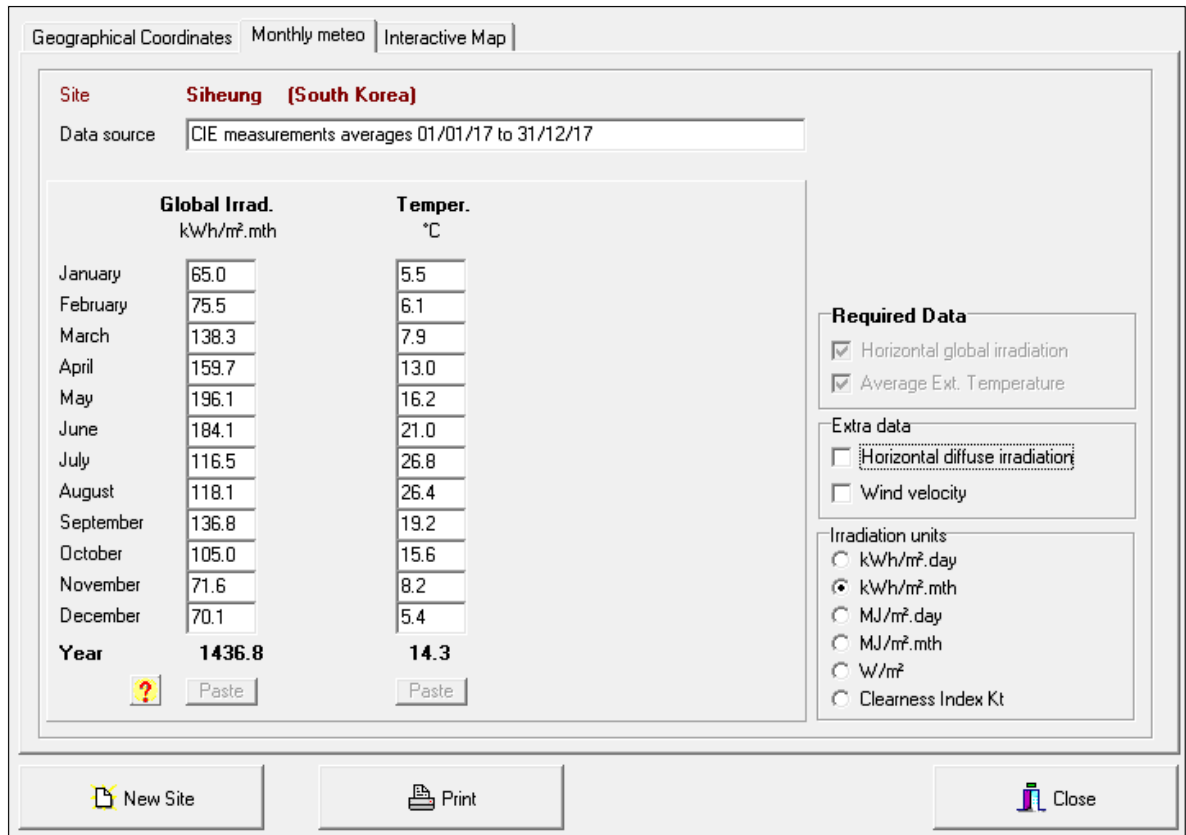


Fig. 5 Monthly global horizontal irradiation insertion process in PVsyst

### 3. 모델을 적용한 데이터 산출

실측 수평면 일조량 데이터를 경사면 일조량 결과 값으로 산출하는 방법은 2가지로 분류 된다.

① Excel과 Matlab을 이용하여 실측 수평면 일조량을 경사면 일조량으로 변환한다. DISC 알고리즘은 Excel 함수로 계산하지만 Perez model의 행렬 계수 함수인  $X(k'_t, \theta_z, W, \Delta k'_t)$ 를 적용하기 위해선 복잡한 알고리즘을 해석해야 한다. 따라서 수식 프로그램인 Matlab을 사용하여 코딩으로 직산 분리를 시행하였다. 그리고 직달과 산란으로 분리된 수평면 일조량을 Excel로 불러와 수식에 대입하여 경사면 일조량으로 변환한다.

② PVsyst를 사용하여 직산분리와 경사면 일조량 변환을 모두 실행한다. 우선, Fig. 5와 같이 Database에 실측 수평면 일조량을 삽입하고 프로그램 자체적으로 알고리즘을 실행할 수 있도록 시뮬레이션 기간을 1년으로 정해 Simulation을 진행한다.

### 3.1 수평면 일조량 직산분리

#### (1) 시간별 일조강도 비교

직산 분리를 통해 얻은 수평면 직달 일조강도와 수평면 산란 일조강도 계산식에서 구한 해가 떠 있는 시간을 기준으로 분포도 그래프로 표현하였다. 2017년 1월과 2월 그리고 3월은 부분적으로 빠져 있는 시간들이 있기 때문에 통합하였고 나머지 4월부터 12월까지는 월마다 시간별 일조강도를 나타냈다.

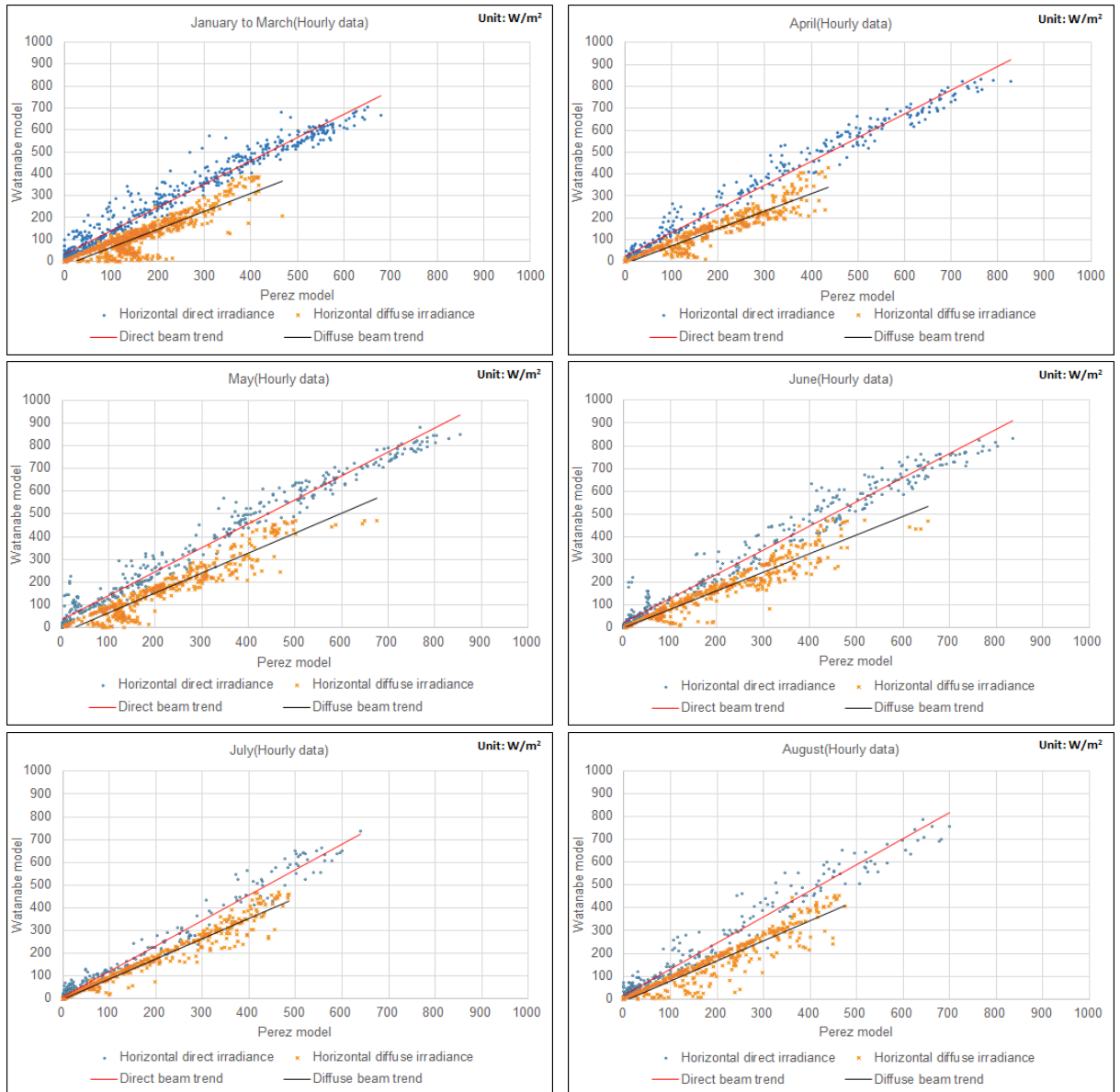


Fig. 6 Monthly distribution graphs of hourly direct irradiance and diffuse irradiance

4 데이터 1월은 1일부터 25일, 2월은 24부터 28일 12:00시, 3월은 17일 15:00부터 18일 9:00시까지 누락.

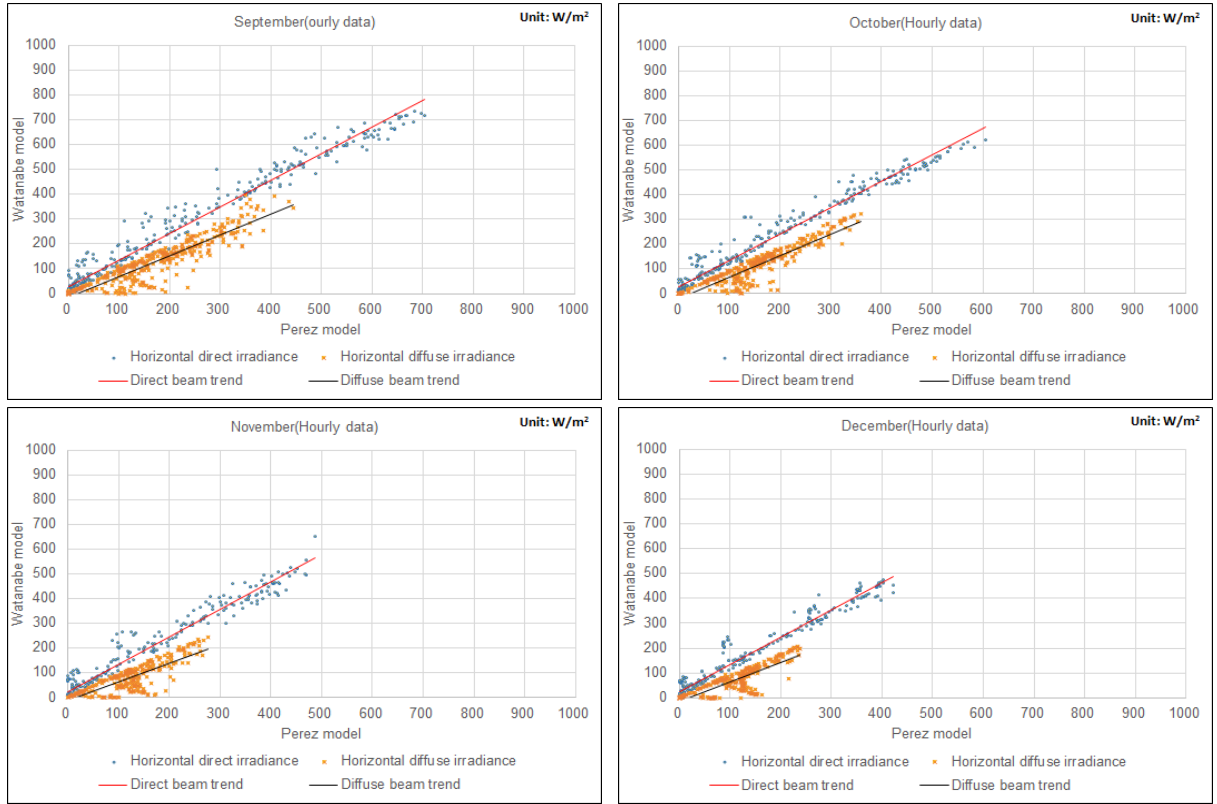


Fig. 6 Monthly distribution graphs of hourly direct irradiance and diffuse irradiance (Continued)

Fig. 6의 그래프를 보면 각 성분별 일조강도별로 추세선의 기울기가 x축에 가까울수록 Perez model에서 일조강도가 크게 나타나고 y축에 가까울수록 Watanabe model에서 일조강도가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 1월부터 12월까지의 분석결과를 보면 직산분리 모델의 수평면 직달 일조강도 비중이 Watanabe model이 높고 수평면 산란 일조강도 비중은 Perez model이 더 높다. Table 1을 확인해보면 Watanabe model은 매개변수로 청명계수와 태양고각을 적용하여 산란일사율을 구한다. 날씨의 맑고 흐린 정도를 천공상태로 나누는 것만으로 수평면 산란 일조강도의 비중을 정하는데 반해 Perez model은  $6 \times 6 \times 5 \times 7$  행렬 계수 함수인  $X(k'_t, \theta_z, W; \Delta k'_t)$ 에서 대기 중 수증기량이나 다른 매개변수에 따라 계수 값을 정하여 사용하기 때문에 비교적 Watanabe model에 비해 수평면 산란 일조강도의 비중이 높아진다. 이전에 개재된 직산분리 예측 모델에 관한 연구 논문에서는 Perez model은 산란 일조량 값이 클수록 예측이 좋다는 결과<sup>12)</sup>와 Watanabe model은 수평면 일조량이 낮아질수록 수평면 직달 일조량이 실측값보다 커진다는 결과<sup>13)</sup>를 보였다. 따라서 Fig. 5에서 알 수 있는 결과는 Appendix A의 Table 6과 참조논문<sup>12,13)</sup>을 통해 타당하다고 평가한다.

## (2) 월별 일조량 비교

Fig. 7에서는 1월부터 3월까지의 데이터를 합쳐서 비교하였고, 4월부터 12월까지는 월별 수평면 산란 일조량

의 비율을 확인하였다.

$$\text{월별 수평면 산란 일조량의 비(\%)}: \frac{\text{수평면산란일조량}}{\text{전수평면일조량}} \times 100 \quad (36)$$

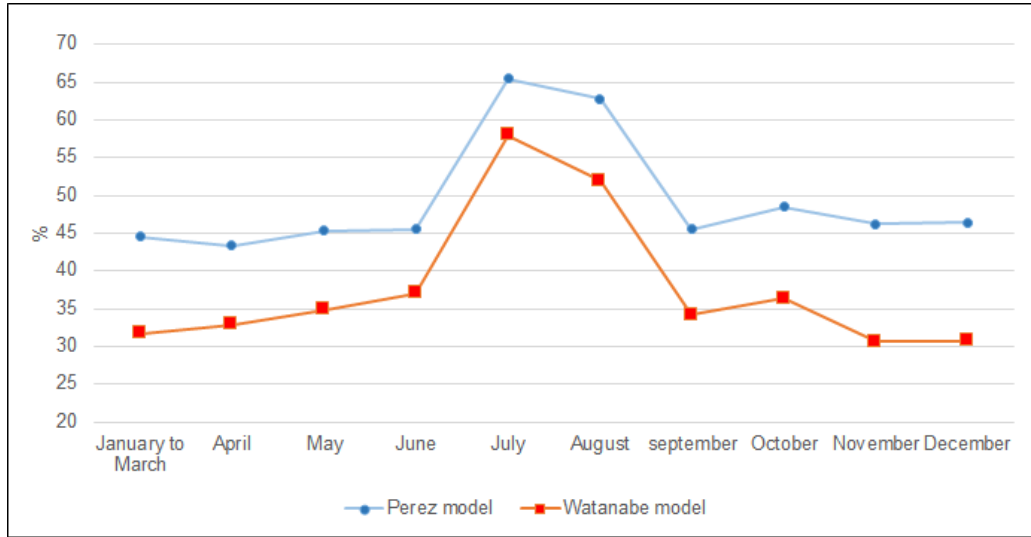


Fig. 7 Monthly diffuse irradiation ratio by Perez model & Watanabe model

Fig. 7 그래프에서 알 수 있듯이 장마철인 7월, 8월에는 두 모델 모두 수평면 산란 일조량의 비율이 급격하게 높아진다. 외기가 습할수록 대기 중 수증기의 양이 증가하게 되고 빛이 산란되는 양이 증가하기 때문이다. 즉, 대기 중에서 굴절되어 산란되는 빛의 세기는 대기의 상태 혹은 대기의 질량에 따라 변동이 심하다. 따라서 수평면 산란 일조량은 계절에 따라 습도의 영향을 크게 받는다는 것을 알 수 있다.

### 3.2 경사면 일조량 산출

#### (1) 월별 경사면 일조량 비교

경사면 일조량 비교에서는 직산분리 모델과 경사면 일조량 변환 모델 명칭에서 혼동이 올 수 있기 때문에 모델 명칭은 Table 4와 같이 약어로 표기하였다.

Table 4 Abbreviation for explanation

Abbreviation		
Decomposition model	Transposition model	Measured data
Watanabe : W	Perez : P	Measured global horizontal irradiation : GHI
Perez : P'	PVsyst simulation : Sim	Measured global irradiation on tilted plane : GPI



경사면 일조량 산출 과정은 3가지로 나뉜다. 첫 번째는 실측 수평면 일조량을 Perez model을 적용하여 직산 분리한 후 Perez model을 적용하여 경사면 일조량을 예측한 결과(P+P)이고 두 번째는 Watanabe model을 적용하여 직산분리한 후 Perez model을 적용하여 경사면 일조량을 예측한 결과(W+P)이며 세 번째로 PV<sub>syst</sub> 자체 내에서 직산분리한 후 경사면 일조량으로 산출하는 시뮬레이션 결과(Sim)이다. 세 개의 결과를 경사각 25°로 설치되어 있는 피라노미터<sup>5)</sup>로 실측한 경사면 일조량과 비교하여 각 모델별 정확도를 파악한다.

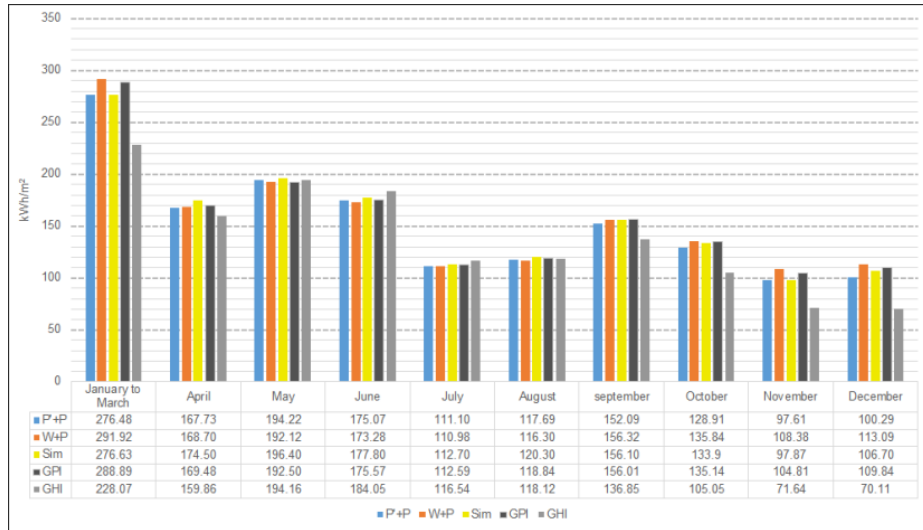


Fig. 8 Monthly irradiation on tilted plane according to decomposition model

Fig. 8 막대그래프에서 알 수 있듯이 두 모델과 PV<sub>syst</sub> 시뮬레이션으로 구한 경사면 일조량은 실측값과 약 0.2% ~ 6%의 차이를 보인다. 경사면 일조량은 식(35)에서 확인할 수 있듯이 경사면으로 입사하는 직달분, 산란분, 반사분의 합이다. 오차를 수식적으로 해석하였을 때 식(27)에서 구한 변수  $R_b factor$  값으로 경사면 직달 일조량을 산정하고 식(30)에서 구한 변수  $[(1 - F_1) * 0.5(1 + \cos \alpha)] + I_{DH} * F_1 * \frac{a}{b} + I_{DH} * F_2 * \sin \alpha$  값으로 경사면 산란 일조량을 산정한다. 경사면에서 직달 변수 : 산란 변수 = 1.2 : 1로 직달분 비중이 산란분 비중보다 크다. 즉, 수평면 산란 일조량이 커질수록 경사면 일조량은 작아진다. 따라서 공기 중에 포함된 수증기의 양이 다른 계절별 수평면 산란 일조량 예측이 다르기 때문에 모델의 경사면 일조량 예측값과 실측값이 미세한 오차를 보이게 된다. 여름인 6월부터 8월까지 P+P 과정으로 구한 경사면 일조량이 실측값에 근접하였고 나머지 월들은 W+P 과정으로 구한 경사면 일조량이 실측값에 근접하였다. 6월과 7월은 수평면 일조량이 경사면 일조량보다 더 크게 나타났으며 12월은 수평면 일조량에서 경사면 일조량으로 변환 효율이 가장 높았다.

5 피라노미터(Pyranometer): 전천일사계(全天日射計)라고 불리며 입사하는 모든 태양 복사 에너지를 측정하는 장비이다.

(2) 총 경사면 일조량 비교

**Table 5** The error of total irradiation on tilted plane obtained by applying the model

Unit: kWh/m <sup>2</sup>	P+P	W+P	Sim	GPI
Total irradiation on tilted plane	1521.20	1566.93	1552.90	1563.66
Total error (GPI - model)	42.46	-3.28	10.76	0

직산분리 모델별로 계산한 경사면 일조량 총 합과 PVsyst 시뮬레이션 일조량 총 합은 실측값과 각각 차이가 나는 것을 알 수 있다. Table 5 경사면 일조량 총합에서 실측값과 가장 큰 차이를 보이는 모델은 Perez model이며 Watanabe model은 경사면 일조량 총 합이 실측값과 가장 가까운 값을 예측 하였다. 또한 같은 모델을 사용하여 계산한 P+P와 Sim 과정은 서로 상이한 경사면 일조량 총합을 보이는데 P+P 경우 실제 계산을 할 때 필요한 변수인 대기질량 값이나 해가 뜨는 시간이 Sim 경우와 다르다. 가장 큰 차이점은 직산분리 시에 사용되는 자연 계수인 습도나 온도는 P+P의 경우에는 실측 기상 정보를 사용하지만 Sim 경우에는 프로그램 자체 내에서 축적된 과거 자료를 바탕으로 예측한 기상 정보를 사용하기 때문에 직산분리나 경사면 일조량 변환에서 결과 값이 차이가 나게된다.

**4. 결론 및 고찰**

본 논문에서는 두 가지 직산분리 모델의 결과 값을 변수로 지정하여 각각 Perez model에 적용시켜 경사면 일조량을 구한 결과를 토대로 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

- (1) 직산 분리 모델을 적용할 때 Watanabe model과 Perez model의 차이점은 수평면 일조량을 직달과 산란으로 나누는 비중이다. 결국 수평면 산란 일조량을 더 고려하여 직산분리 한 모델은 Perez model이며 이 모델은 Watanabe model보다 더 많은 매개변수를 수식에 적용한다. 이때 포함되는 기상 조건들은 Watanabe model에서는 독립 변수로 사용되지 않으며 변수 모두가 산란을 고려한 자연 조건들에서 파생된다. 그러므로 실측 수평면 일조량을 직산분리했을 때 모든 월마다 수평면 산란 일조량 비중은 Perez model이 Watanabe model보다 높다.
- (2) Fig. 8을 확인하면 다른 월들에 비해 11월과 12월 실측 경사면 일조량 값이 모델 예측 경사면 일조량보다 더 높게 나타난다. 이는 겨울철 내리는 눈이 지면에 쌓였을 때 달라지는 지면반사율을 본 논문에서 적용하지 않았기 때문에 발생한 오차이다. 경사면 일조량 예측 결과에서 6, 7, 8월에 P+P 과정이 W+P 과정보다 경사면 일조량 예측값이 실측값에 더 가까웠고 나머지 월들은 W+P 과정이 실측값과 더 비슷하였다. 따라서 계절별로 보다 정확한 직산분리 모델을 사용하여 경사면 일조량 변환 모델을 적용한다면 실측값에 매우 근접한 경사면 일조량을 예측할 수 있다.
- (3) Figs. 7과 8을 함께 확인해보면 두 모델 모두 수평면 산란 일조량의 비율이 가장 높은 7월, 8월대에 경사

면 일조량이 가장 낮은 것을 확인할 수 있다. 또 7월과 8월에 P'+P 과정으로 산출한 경사면 일조량이 실측 값에 매우 근접하므로 공기 중 수증기가 많은 여름 장마철 기간은 Perez model이 Watanabe model보다 예측 면에서 더 우수하다고 평가할 수 있다. 식 (30)을 확인해보면 Perez model은 법선면 직달 일조량에 행렬함수  $X(k'_t, \theta_z, W, \Delta k'_t)$ 를 곱하여 수평면 직달 일조량을 구한다. 식 (24)를 통해 알 수 있듯이  $X(k'_t, \theta_z, W, \Delta k'_t)$ 의 매개변수 중  $W$ (가강수량)은 습도가 높을수록 큰 값을 가진다. 가강수량 값이 클수록 함수계수  $X(k'_t, \theta_z, W, \Delta k'_t)$ 는 작은 값을 추정<sup>14)</sup>하므로 수평면 직달 일조량이 작아지게 된다. 겨울철에는 대부분 가강수량값이 0~1 사이를 나타내고 여름철에는 1~4 사이를 나타내므로 여름철에 더 세밀하게 가강수량을 예측할 수 있다. 그러므로 습도가 높아 산란 일조량 비중이 높을수록 Perez model의 직산분리가 더 정확해진다는 사실을 신뢰할 수 있다. 하지만 Fig. 8을 확인하면 1년 동안 실측 자료를 기반으로 연구한 결과 1월부터 12월을 종합하여 보았을 때 P'+P 과정보다 W+P 과정을 통해 경사면 일조량으로 변환하는 방법이 국내에서 더 신뢰할 수 있다고 평가한다.

## 5. 향후 계획

2018년부터 한국산업기술대학교 E동 옥상에 설치된 태양추적장치를 사용하여 수평면 일조량을 실제로 직산 분리한 실측 수평면 직달 일조량과 실측 수평면 산란 일조량을 모델 산출 값과 비교하여 어떤 모델이 국내에서 더 신뢰도를 가지는지 알아볼 예정이다.

## 후기

본 연구는 2017년도 한국에너지공단의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 201600990002).

## REFERENCES

1. Lave, M., Hayes, W., Pohl, A., and Hansen, C. W., Evaluation of Global Horizontal Irradiance to Plane-of-array Irradiance Models at Locations Across the United States, IEEE journal of Photovoltaics, Vol. 5, No. 2, pp. 597-606, 2015.
2. Mahachi, T., and Rix, A. J.. Evaluation of Irradiance Decomposition and Transposition Models for a Region in South Africa Investigating the Sensitivity of Various Diffuse Radiation Models, In Industrial Electronics Society, IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE, pp. 3064-3069, 2016.
3. Yoon, K. C., Jeon, J. U., and Kim, K. S., Comparative Analysis of Measurements and Total Solar Irradiance Models on Inclined Surface for Building Solar Energy Prediction, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 32, No. 6, pp. 44-52, 2012
4. Liu, C. D., Seo, Y. S., Oh, M. S., and Kim, H. S., A Study on the Solar Irradiance for the BIPV System Design in the Super High-rise Buildings, Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, Vol. 5, No. 4, pp. 230-235, 2011.
5. Ineichen, P., Perez, R. R., Seal, R. D., Maxwell, E. L., and Zalenka, A., Dynamic Global-to-direct Irradiance

Conversion Models, Ashrae Transactions, Vol. 98, No. 1, pp. 354-369, 1992.

6. Shim, J. S. and Song, D. S., Applicability of the Direct-diffuse Insolation Decomposition Models Considering the Domestic Sky Conditions, Conference Journal of The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, pp. 763-766, 2017.
7. Watanabe, T., Procedures for Separating Direct and Diffuse Insolation on a Horizontal Surface and Prediction of Insolation on Tilted Surface, Transactions of the Architectural Institute of Japan, No. 330, pp. 96-108, 1983.
8. Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., and Stewart, R., Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance, Solar energy, Vol. 44, No. 5, pp. 271-289, 1990.
9. Maxwell, E. L., A Quasi-physical Model for Converting Hourly Global Horizontal to Direct Normal Insolation, Solar Energy Research Inst., Golden, No. SERI/TR-215-3087 CO(USA), 1987.
10. Liu, B. Y. and Jordan, R. C., The Long-term Average Performance of Flat-plate Solar-energy Collectors: with Design Data for the US, Its Outlying Possessions and Canada., Solar Energy, Vol. 7, No. 2, pp. 53-74, 1963.
11. PVsyst. Version 6.6.4, University of Geneva, 1994-2012.
12. Lee, H. Y., Yoon, S. H., and Park, C. S., The Effect of Direct and Diffuse Split Models on Building Energy Simulation, Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design, Vol. 31, No. 11, pp. 221-229, 2015.
13. Shim, J. S. and Song, D. S., Analysis of the Predicting Horizontal Insolation, Direct-diffuse Insolation Decomposition for Making Typical Weather Data, Conference Journal of The Society Of Air-Conditioning And Refrigerating Engineers of Korea, pp. 95-98, 2016.
14. Lanini. F., Division of Global Radiation into Direct Radiation and Diffuse Radiation, University of Bern Master's Thesis, 2010.

## Appendix A

직산분리 모델 중 Watanabe model의 신뢰성을 확인하기 위해 대전지역 한국에너지기술연구원에서 받은 실측 수평면 일조량과 실측 법선면 직달 일조량을 근거로 Watanabe model을 적용하여 직산 분리하고 계산값과 비교하였다. 대전 지역에서 시간 단위의 습도와 기온 자료를 얻을 수 없기 때문에 Perez model로 직산 분리는 시행하지 못했다. 그리고 계절에 따른 모델의 신뢰성을 파악하기 위해 8월과 12월 자료를 사용하였다.

**Table 6** Comparison of measured irradiation in Kier and irradiation generated by Watanabe model

Unit: kWh/m <sup>2</sup>	Measured irradiation from Korea institute of energy research in Dae-jeon			Watanabe model	
	Global horizontal irradiation	Direct beam	Diffuse beam	Direct beam	Diffuse beam
August	109.25	32.54	76.72	43.06	66.19
December	67.49	30.78	36.70	44.15	23.34