

작물모형 입력자료용 일사량 추정을 위한 지역 특이적 AP 계수 평가

조영상¹, 정재민¹, 현신우², 김광수^{1,3*}

¹서울대학교 식물생산과학부, ²서울대학교 농림생물자원학부, ³서울대학교 농업생명과학연구원
(2022년 9월 16일 접수; 2022년 11월 28일 수정; 2022년 12월 14일 수락)

Assessment of Region Specific Angstrom-Prescott Coefficients on Uncertainties of Crop Yield Estimates using CERES-Rice Model

Young Sang Joh¹, Jaemin Jung¹, Shinwoo Hyun², Kwang Soo Kim^{1,3*}

¹Department of Plant Science, Seoul National University

²Department of Agriculture, Forestry and Bioresources, Seoul National University

³Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

(Received September 16, 2022; Revised November 28, 2022; Accepted December 14, 2022)

ABSTRACT

Empirical models including the Angstrom-Prescott (AP) model have been used to estimate solar radiation at sites, which would support a wide use of crop models. The objective of this study was to estimate two sets of solar radiation estimates using the AP coefficients derived for climate zone (AP_{Frere}) and specific site (AP_{Choi}), respectively. The daily solar radiation was estimated at 18 sites in Korea where long-term measurements of solar radiation were available. In the present study, daily solar radiation and sunshine duration were collected for the period from 2012 to 2021. Daily weather data including maximum and minimum temperatures and rainfall were also obtained to prepare input data to a process-based crop model, CERES-Rice model included in Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT). It was found that the daily estimates of solar radiation using the climate zone specific coefficient, S_{Frere} , had significantly less error than those using site-specific coefficients S_{Choi} ($p < 0.05$). The cumulative values of S_{Frere} for the period from march to September also had less error at 55% of study sites than those of S_{Choi} . Still, the use of S_{Frere} and S_{Choi} as inputs to the CERES-Rice model resulted in slight differences between the outcomes of crop growth simulations, which had no significant difference between these outputs. These results suggested that the AP coefficients for the temperate climate zone would be preferable for the estimation of solar radiation. This merits further evaluation studies to compare the AP model with other sophisticated approaches such as models based on satellite data.

Key words: Angstrom-Prescott coefficient, Solar radiation, DSSAT, AP model, NRMSE



* Corresponding Author : Kwang Soo Kim
(luxkwang@snu.ac.kr)

I. 서 론

작물모형은 노지나 시설에서 기상, 토양 및 재배관리 조건에 따른 작물의 생산성을 추정하기 위해 사용된다(Kim et al., 2020b). 현실과 유사한 조건에서 가상으로 작물의 생육 상황을 모의하는 작물 모형은 포장실험을 실행하기 어려운 조건들을 반영하여 예측값을 얻을 수 있다(Kim et al., 2018). 또한, 작물의 생산성을 시공간적으로 추정하여 일정 지역에서의 작부체계를 설계하기 위해 작물 모형이 활용될 수 있다(Kim et al., 2012). 예를 들어, Kim et al.(2013)은 미래 기후변화 시나리오에 따른 파종과 이앙시기별 작물의 생육 및 수량을 비교하여 주요 식량작물에 대한 적응 대책을 제안하였다. Reynold et al.(2018)은 작물 모형을 사용하여 재배 관리의 효율성을 증가시키고 이를 사회경제 모델과 연계하여 농업인 뿐만 아니라 정부부처 차원에서의 정책 수립에 긍정적인 영향을 줄 수 있다고 하였다.

작물의 생육 과정을 모의하는 작물모형들은 여러 기상요소와 함께 일사량을 필수적인 기상입력 변수로 사용한다(Hunt et al., 1998). Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT), Agricultural Production Systems simulator (APSIM), ORYZA 2000 등 주요 곡물작물을 대상으로 하는 과정기반 작물모형들은 광효율 계수를 활용하여 일사량으로부터 일별 광합성량을 계산한다(Bouman et al., 2001; Jones et al., 2003; Keating et al., 2003; Wopereis et al., 1996). 또한, 작물모형을 사용하여 예측된 생산량 값들은 일사량에 대한 민감도가 높다(Trnka et al., 2007). 이는 일사량 자료의 품질에 따라 생산성 추정값의 불확도가 높아질 수 있는 것을 의미한다. 특히, 식량관련 정책 수립이나 재배관리 의사결정을 위해 작물모형의 모의 결과값이 사용될 경우(Aubry et al., 1998), 이들의 불확도를 낮추는 것이 유리하다.

일사량 관측값은 다른 기상요소에 비해 가용도가 상대적으로 낮다(Almorox and Hontoria, 2004). 우선, 일사량을 측정하는 센서들을 구매하기 위해 상당한 비용과 노력이 요구된다(Kang et al., 2019; Abraha and Savage, 2008). 또한 센서들로부터 측정되는 값들의 품질관리를 위해 지속적인 유지보수가 필요하다(Zhang et al., 2017). 이로 인해, 해외 선진국에서도 일사량 관측소는 온도와 강수를 측정하는 관측소에 비해 상당히 적은 수가 운영된다(Aladenola and Madramootoo,

2004). 일사량 관측에는 인적 물적 자원이 다소 필요하기 때문에 현재 기상청의 중관기상관측소(ASOS) 102여 지점에서 시간당 일사량 값을 제공하지만 20년 이상의 일사량 자료를 제공하고 있는 관측소는 20개의 장소로 제한되어 있다. 반면 기온의 경우 방재기상관측소(AWS) 510곳에서도 자료가 제공되며, 20년 이상의 기상자료를 431개의 지점에서 제공하고 있다. 작물이 재배되는 모든 지점에서의 관측자료 수집은 현실적 제약이 존재하며, 이를 대신하기 위한 수단이 필요하다.

일사량 관측값을 대신하여 쉽게 구할 수 있는 기상요소들의 관측값으로부터 일사량을 추정치를 계산하는 기법들이 개발되어 왔다. 예를 들어, 일조시간(Angstrom, 1924), 기온(Prieto and Garcia, 2022), 상대습도(Swartzman and Ogunlade, 1967) 및 위성자료(Noia et al., 1993) 등을 활용한 일사량 추정 모형들이 보고되었다. 그 중에서도 가장 보편적으로 사용되어 온 방식은 일조시간을 활용하여 일사량을 추정하는 방식이다(Besharat et al., 2013). 특히, 간단한 수식을 사용하여 일조시간으로부터 일사량을 추정할 수 있는 Angstrom-Prescott (AP) 모형이 널리 사용되고 있다. 예를 들어, 작물모형인 ORYZA2000은 일조시간이 입력자료로 사용될 경우 모형 내 탑재된 AP 모형을 통해 일사량을 추정한다(Li et al., 2017). 국내에서는 일사량에 비해 일조시간이 상대적으로 다수의 기상 관측소에서 측정되고 있어 AP 모형을 사용하는 것이 모형 활용에 유리하다.

Mousavi et al.(2015)은 지역의 기후적 및 지형적 특징에 따라 AP 모형의 모수 또는 AP 계수가 결정되어야 함을 보고하였다. Choi et al.(2010)은 국내 지역별로 특이적인 AP 계수를 사용하여 일사량을 추정하였다. 반면, Hyun and Kim(2016)은 온대 기후대에 적합할 것으로 보고된 AP 계수가 사용되더라도, 국내에서의 일사량 추정 오차가 작을 것으로 보고하였다. 일사량 추정에 대한 신뢰도가 일정 수준 유지될 수 있다면 개별적인 추정이 필요한 지역특이적 AP 계수를 대신하여 기후특이적 AP 계수를 사용할 수 있다.

일반적으로 AP 계수를 사용한 일사량 추정 방식의 신뢰도를 평가하기 위해 일사량 관측값과 추정값 사이의 일치도가 분석된다. 그러나, 이러한 분석 결과들은 일사량 추정값을 작물 모형의 입력자료로 사용할 때 얻어지는 생산량 예측값의 신뢰도 변화가 검토되어야 한다. 특히, 작물 모형은 작물 재배 기간동안 누적된

일사량의 비선형적 결과들을 예측하기 때문에, 누적된 일사량 오차를 기반으로 작물 생산성 추정에 미치는 영향을 분석하는 것이 유리하다.

본 연구에서는 AP 모델로 추정된 일사량이 작물 생산성 예측 신뢰도에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 특히, 기후 특이적 및 지역 특이적인 AP 계수들을 사용하여 추정된 일사량이 작물모형의 입력자료로 사용되었을 때 발생하는 생산성 예측값의 불확도 양상을 분석하고자 하였다. 지역 특이적인 AP 계수들은 일정 지역의 기상 특성을 반영하여 추정되기 때문에, 불확도가 시간에 따라 변화할 수 있다. 반면, 기후 특이적 AP 계수는 국내에서 보편적으로 사용될 때 불확도의 범위가 공간적으로 차이가 있을 수 있다. 본 연구에서는 AP 계수 사용에 따른 시간적 및 공간적 오차를 비교하여 국내 적용에 유리한 일사량 추정 방식을 제안하고자 하였다. 이를 통해, 복잡한 지형에서 다양한 작물이 재배되는 국내 환경에 유리한 작물모형의 입력 자료를 준비할 수 있도록 지원할 수 있다.

II. 재료 및 방법

2.1. 관측 자료의 수집

일조시간과 일사량이 동시에 관측되는 기상관측소를 대상으로 기상자료를 수집하였다(Fig. 1). 일조시간은 96개의 종관기상관측소에서 관측되고 있는 반면, 일사량 관측자료는 48개의 종관기상관측소에서 수집되고 있다. 장기간에 대한 일사량 자료가 가용한 관측소는 20개에 불과하다(Hyun *et al.*, 2016). 본 연구에서는 Choi *et al.*(2010)와 Hyun *et al.*(2016)에서 공통적으로 사용된 18개의 종관기상관측소를 선정하였다. 장기간의 일사량 비교를 위해 2012년 1월부터 2021년 12월까지 10년 기간 동안 일별 일사량과 일조시간 자료를 수집하였다. 또한, 작물모형을 활용한 분석을 위해 최고 기온, 최저 기온 및 강수량을 추가적으로 수집하였다.

종관기상관측소의 일별 자료는 기상청에서 운영하는 기상자료개방포털(<https://data.kma.go.kr>)을 통해 수집되었다. 장기간 기상자료를 자동으로 수집하기 위해 OpenAPI를 사용하였다. 본 연구에서는 Representational State Transfer (REST)방식으로 데이터를 제공하는 지상(종관, ASOS) 일일 자료 조회서비스를 활용하였다. 사용자가 지정한 기상관측소와 자료수집 기간을 대상으로 기상자료를 요청하고, 수집된 자료를 International



Fig. 1. Locations of 18 weather stations where sunshine duration and solar radiation were observed for over 20 years.

Consortium for Agricultural Systems Applications (ICASA) standard 형식의 일별 기상자료를 생성하는 프로그램을 C++를 사용하여 개발하였다. 이 프로그램은 최고기온, 최저기온, 강수량 및 일사량 등 종관기상 관측소에서 측정되는 기상요소에 대한 자료수집이 가능하다. 또한, 작물 모형의 구동을 지원하기 위해 DSSAT의 기상관련 입력파일인 WTH 파일을 자동으로 생성한다.

2.2. 일사량 추정

본 연구에서는 Angstrom(1924)이 제시한 AP 모델을 사용하여 일별 일사량을 추정하였다. 대기권 외부에 도달한 태양복사가 투과되는 정도와 일조시간이 증가함에 따라 작물 근각 상부에 도달하는 일사량이 증가한다. 이를 반영하여 AP 모델은 일사량을 다음과 같이 계산한다(Prescott, 1940):

$$R_s = (a + b \cdot \frac{S}{S_0}) R_a \quad (\text{Eq. 1})$$

여기서, S와 S₀는 각각 관측된 일조시간과 가조시간이며, R_a는 대기권 밖 일사량을 나타낸다. AP 계수인 a와 b는 각각 일조시간이 0일 때와 일조시간의 증가에 따

른 R_a 의 대기투과율을 나타낸다. 일일 대기권 밖 일사량인 R_a 는 다음과 같이 계산된다(Duffie *et al.*, 2013).

$$H_a \left(\frac{Wh}{m^2 \text{ day}} \right) = \frac{24}{\pi} I_{sc} \left[1 + 0.33 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \left[\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi}{180} \omega_s \sin \varphi \sin \delta \right] \quad (\text{Eq. 2})$$

n 은 일자(day of year), φ 는 위도($^\circ$), δ 는 일적위($^\circ$), ω_s 는 일몰시간각, I_{sc} 는 일사량 상수(1367 W/m^2)이다. 일적위(δ)와 일몰시간각 ω_s 은 다음과 같이 계산된다.

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + n) \right] \quad (\text{Eq. 3})$$

Table 1. Angstrom-Prescott coefficient by climate zone

Climate zone	a	b
Cold and temperate	0.18	0.55
Dry tropical zone	0.25	0.45
Humid tropical zone	0.29	0.42

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (\text{Eq. 4})$$

AP 계수에 따른 일사량 추정값의 신뢰도를 분석하기 위해 기후특이적 및 지역 특이적 계수값을 문헌을 통해 수집하였다. Frere and Popov(1979)는 기후에 따른 AP계수를 제안하였다(Table 1). 국내의 기후 조건을 고려하여 온대 기후에 적용될 수 있는 0.18와 0.55가 각각 a와 b값으로 사용되었다(Hyun *et al.*, 2016). 반면, Choi *et al.*(2010)은 1983년부터 2007년까지 18개 지점에서의 일사량과 일조시간 자료를 사용하여 지역별 AP 계수를 추정하였다(Table 2). 기후특이적 계수와 지역 특이적 계수를 각각 AP_{Frere} 와 AP_{Choi} 로 표시하였다.

2.3. 일사량 비교

AP계수들을 사용하여 얻어진 일사량 추정값과 관측값의 차이를 분석하기 위해 Normalized Root Mean Square Error (NRMSE)를 사용하였다. 일사량 관측값 (S_{Obs})과 기후 특이적 계수를 사용하여 계산된 추정값

Table 2. Angstrom-Prescott coefficients by weather stations reported by Choi *et al.* (2010)

Station ID	Station Name	Elavation	Daily data	
			a	b
100	Daegwallyeong	843	0.175	0.559
101	Chuncheon	77	0.207	0.476
105	Gangneung	26	0.217	0.482
108	Seoul	89	0.197	0.452
112	Incheon	69	0.192	0.476
119	Suwon	34	0.199	0.459
129	Sosan	26	0.222	0.484
131	Cheongju	57	0.198	0.491
135	Chupungnyeong	243	0.181	0.485
136	Andong	141	0.200	0.471
138	Pohang	2	0.201	0.493
143	Daegu	58	0.204	0.463
146	Chungju	54	0.206	0.470
156	Gwangju	71	0.211	0.495
159	Busan	69	0.200	0.471
165	Mokpo	38	0.230	0.500
184	Jeju	20	0.197	0.506
192	Jinju	21	0.194	0.477

(S_{Frere}) 및 지역 특이적 계수를 사용하여 계산된 추정값 (S_{Choi})을 비교하기 위한 NRMSE는 다음과 같이 계산되었다(Logue and Green, 1991).

$$NRMSE = \sqrt{\frac{[\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2]}{n}} \cdot \frac{100}{O} \quad (\text{Eq. 5})$$

여기서, P_i 와 O_i 는 각각 예측값과 관측값을 나타낸다. n 과 O 는 각각 표본의 개수 및 관측값의 평균을 의미한다. NRMSE를 사용하여 S_{Frere} 와 S_{Choi} 값들의 오차를 관측 지점별로 분석하였다. 특히, 일별 일사량 관측값과 추정값 사이에 유의미한 차이가 있었는지 확인하기 위해 지점별로 짝지은 t검정을 수행하였다. 일사량이 작물의 생육에 영향을 주는 기간인 3월부터 9월까지의 누적 일사량을 연도별, 지역별 기준을 통해 구하였다. 일사량 관측값과 추정값에 대한 누적 일사량 사이의 차를 NRMSE를 통해 비교하였다.

2.4. 작물 생육 모의

일사량 추정값을 과정기반 작물모형의 입력자료로 사용하여 발생하는 벼 수량 예측값의 불확도를 분석하였다. 본 연구에서는 DSSAT에 포함되어 있는 CERES-Rice 모델을 사용하였다. DSSAT은 토양, 기상, 재배방법, 재배품종에 의한 변인을 수식화 하여 수확량을 예측하는 작물모형으로, 일일 일사량을 통해 증발산량과 광합성량을 계산하여 식물의 생장을 모의한다(Jones *et al.*, 2003). 또한, 해충, 토양, 작물, 기상, 재배관리 방법 등에 대한 모듈들로 구성되어 있어 다양한 재배조건에 따른 생육모의가 가능하다.

일사량 추정방식에 따른 수량 모의값 차이를 확인하기 위해 일사량 관측값 자료가 수집된 2012년부터 2021년 동안 총 8100회의 벼 생육 모의와 작물 수량 추정이 이루어졌다. 다양한 재배 조건을 고려하기 위해 이앙일과 품종을 달리 하여 생육을 모의하였으며, 이앙일은 국내에서 적용될 수 있는 5월 초부터 6월 중순까지 10일 간격으로 설정하였다. 또한, 오대, 화성 및 추청 등 국내에서 재배되는 생태형을 대표할 수 있는 품종들을 대상으로 재배 관리 시나리오를 구성하였다. 품종모수는 Shim *et al.*(2010)에서 제시한 모수를 활용하였다. 시비조건은 농촌진흥청에서 제시한 표준 재배법에 따라 설정하였다. 토양에 대한 모수는 토양으로 인한 변이를 최소화하기 위해 논토양의 대표 토양인 지산통 자료를 통일하여 활용하였다(Yang *et al.*, 2009).

2.5. 수량 비교

지점 및 시점별로 S_{Choi} , S_{Frere} 및 S_{Obs} 을 사용하여 얻어진 작물모형 구동결과를 분석하였다. 우선, 기후 특이적 계수 및 지역특이적 계수로 추정된 일사량과 관측값을 사용하여 얻어진 수량 모의값을 각각 H_{Frere} , H_{Choi} 및 H_{Obs} 로 표시하였다. H_{Choi} 및 H_{Frere} 에 대한 지점별 NRMSE를 계산하고 이들의 짝지은 t검정을 수행하였다. 또한, AP 계수별 NRMSE에 대한 analysis of variance (ANOVA)를 수행하였다. 이를 위해, 지역, 연도, AP 계수 추정법을 변인으로 설정하였다. 또한, 이앙일, 품종, AP계수 추정법을 변인으로 하여 추가적인 ANOVA를 수행하였다. 짝지은 비교와 분산 분석을 위해 각각 통계분석 프로그램인 R (R Core Team, 2022)과 Origin (OriginLab, Massachusetts, USA)을 활용하였다.

작물 재배관리 시나리오가 대상 지역에 적절하지 않은 경우, 해당 재배관리의 모의 결과는 분석에서 제외하였다. 예를 들어, 이앙일이 실제보다 늦게 설정되어 생육 후기 저온으로 피해를 받아 수량이 비정상적으로 낮아질 수 있다. 이를 고려하여 모의수량이 0인 경우 등이 해당된다.

III. 결 과

3.1. 일사량 추정

기후특이적 AP계수를 사용하여 추정된 일사량 값은 대부분의 지역에서 지역특이적 AP계수를 사용한 값보다 오차가 작았다. S_{Frere} 및 S_{Choi} 값의 오차는 각각 16.1% 및 17.2%이었다. 연구 대상 지역 중 대구, 추풍령, 안동 등 NRMSE의 차가 큰 지역에서는 이러한 차이가 3.7%까지 증가하였다. 생육기간인 3월부터 9월까지의 누적 일사량을 분석한 결과, 18개 지역 중 10개의 지역에서 S_{Frere} 누적값이 S_{Choi} 누적값보다 오차가 작았다(Fig. 2). 6개의 지역에서는 S_{Choi} 가 일사량 관측값과 더 가까웠다.

AP계수를 사용하여 얻어진 일별 일사량은 비교적 큰 오차를 가졌으나 작물 재배 기간으로 한정했을 경우의 오차는 상대적으로 작았다. 전체 기간 동안의 S_{Frere} 값들은 일사량 관측값과 12%에서 22% 사이의 오차가 있었다. 18개 지역 중 소산, 진주, 포항 등에서는 관측 기간 동안 오차가 19% 이상으로 높았다. 반면, 안동, 대구 및 춘천에서는 작물재배 기간 동안 오차가 14% 이하로 낮았다. S_{Choi} 값들은 일사량 관측값과 비교하여

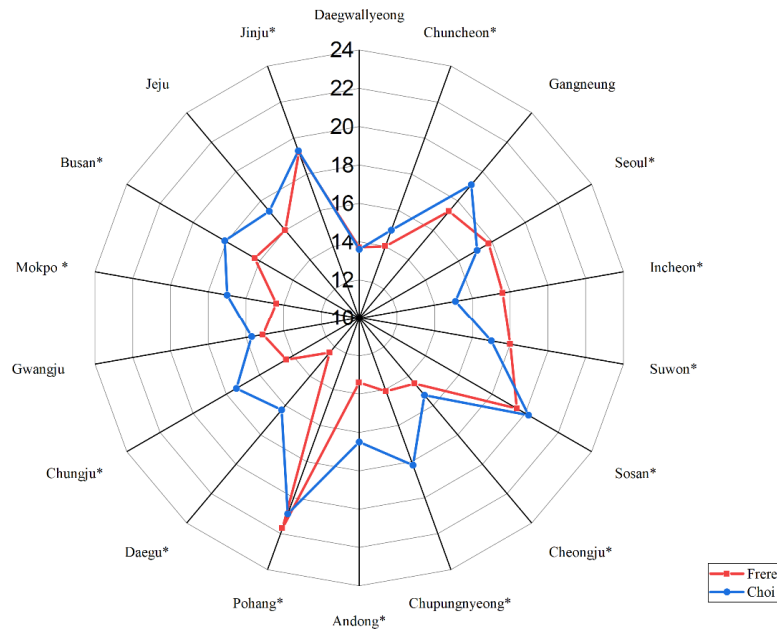


Fig. 2. Normalized Root Mean Square Error values of daily solar radiation using climate zone and site-specific coefficients of Angstrom Prescott model (* indicates that p-value is less than 5%) Frere and Choi indicate the solar radiation estimate using climate zone and site-specific coefficients respectively.

13%에서 21% 사이의 오차가 있었다. 오차가 19% 이상으로 높은 지역은 강릉, 소산, 포항, 진주였고, 오차가 15% 이하인 지역은 춘천, 대관령이었다. 재배 적기의 일사량 누적값의 NRMSE 분석 결과, 일일 일사량 추정값에 비해 낮은 오차율을 보였다. NRMSE는 5%에서 14% 사이에 분포하였고, 일일 일사량의 오차율이 높았던 소산, 진주, 포항의 경우에는 오차율이 14%에서 12% 사이에 분포하였다.

비록 오차 절대값의 차이는 작았으나, S_{Frere} 와 S_{Choi} 의 오차값은 대부분의 지역에서 유의미한 차이가 있었다(Fig. 2). S_{Frere} 와 S_{Choi} 의 NRMSE 값을 사용하여 짝지는 t검정을 수행한 결과, 18개 지역들 중 제주, 광주, 대관령, 강릉을 제외한 14개의 지역에서 5% 유의수준에서 차이가 인정되었다. 특히, 이들 지점에서의 S_{Frere} 가 10개 지역에서 S_{Choi} 보다 일사량 관측값에 더 가까운 것으로 나타났다. 또한 지역별 연간 누적 일사량 값에 대한 짝지는 t검정 결과, 대관령을 제외한 17개의 지역에서 5% 유의수준에서 통계적 유의성이 발견되었다(Fig. 3).

3.2. DSSAT 구동 결과

AP 계수에 따라 나타난 일사량 추정값의 차이에 비해 수량 예측값의 차이가 작은 것으로 나타났다. 추정 일사량을 사용한 생산성과 관측 일사량을 사용한 생산성의 차이는 비교적 작았다 (Fig. 4). 예를 들어, 일사량 관측치를 통한 수량 예측값과 S_{Frere} 및 S_{Choi} 를 이용하여 모의한 수량 사이의 NRMSE값은 평균적으로 4% 내외에 불과하였다. 대관령, 대구, 충주 등지에서는 3%이하의 낮은 오차율을 보였고 인천과 포항에서는 수량의 오차가 5%와 10%로 다른 지역에 비해 큰 오차가 발생하였다(Fig. 4). 기후특이적 계수를 사용하여 추정된 일사량값이 지역특이적 계수를 사용한 것 보다 일치도가 높았다. 품종, 이앙일, AP계수를 변인으로 하여 수량에 대한 ANOVA 분석 결과, AP계수와 품종에 따라 수확량에서 95%수준에서 수량에 유의미한 차이가 나타나지 않았다(Table 3). AP계수를 변인으로 하여 수량에 대한 ANOVA 분석 결과(Table 3), 수량은 장소와 연도에 따라 95% 수준에서 유의미한 차이를 보였지만, AP계수에 대해서는 통계적으로 유의미한 차이가 나타났다.

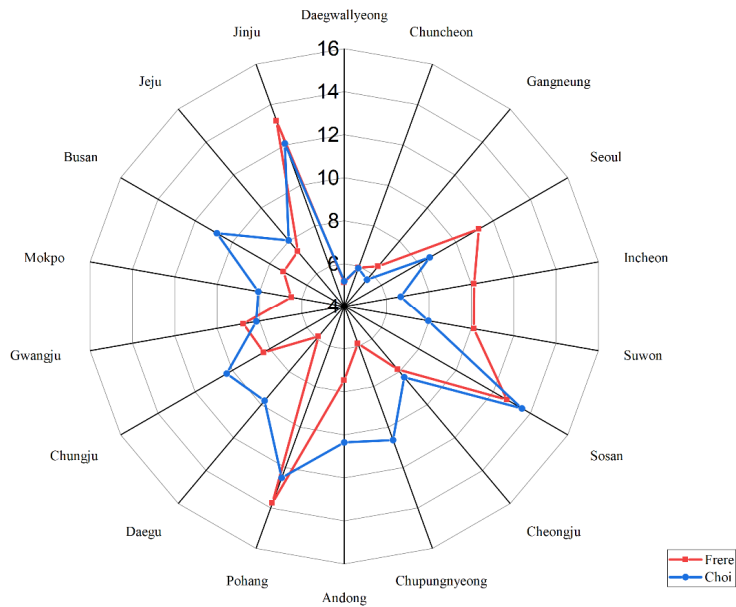


Fig. 3. Normalized Root Mean Square values of accumulative solar radiation by sites and year. Frere and Choi indicate the solar radiation estimates using climate zone and site-specific coefficients respectively.

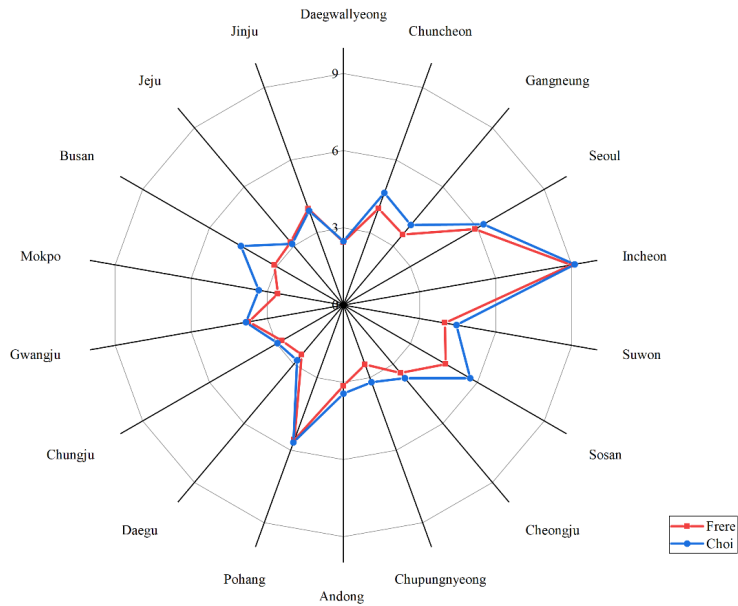


Fig. 4. Normalized Root Mean Square values of yield by site. Frere and Choi indicate the outputs of rice model using the solar radiation estimates using climate zone and site-specific coefficients as inputs, respectively.

Table 3. Two sets of Analysis of variance for crop yield, one set using site, year, and the coefficient set as factor, the other cultivar transplant and the coefficient set

Factor	F value	P value
site	78.50	1.56*10 ⁻²⁴¹
year	88.26	4.31*10 ⁻¹⁵³
AP	20.83	5.14*10 ⁻⁶
site*year	4.54	3.45*10 ⁻⁶⁴
site*AP	3.20	9.48*10 ⁻⁶
year*AP	2.21	0.019
site*year*AP	1.43	4.77*10 ⁻⁴
cultivar	248.21	7.96*10 ⁻¹⁰⁴
transplant	526.23	0
AP	20.79	5.25*10 ⁻⁶
cultivar *transplant	23.65	5.51*10 ⁻³⁶
cultivar*AP	0.12	0.89
transplant*AP	0.81	0.52
cultivar*transplant*AP	0.11	1.00

IV. 고찰 및 결론

일사량의 추정 방식인 AP모델의 계수를 달리 하여 작물 모형을 구동한 결과, 두 계수에 따른 예상 수량에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 18개의 지점 중 AP_{Frere}를 통한 수량 예측값이 AP_{Choi}와 비교하여 16지역에서 낮은 오차율을 보였지만, NRMSE값의 차이는 평균적으로 0.42%로 비교적 작은 차이임을 확인할 수 있었다. 수량에 대한 ANOVA 분석결과에서도 품종과 AP 계수 추정방식에 따라 수량에 통계적인 유의성이 없었다(p = 0.89). 일사량 추정의 목적이 수량의 예측으로 한정된다면, AP_{Frere}와 AP_{Choi}를 사용하였을 때, 통계적으로 유의미한 차이가 없었기 때문에, 보다 보편적으로 활용이 가능한 AP_{Frere}를 사용하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

다만, Angstrom-Prescott 모델은 일차식에 의존하기 때문에 일사량 추정에 한계를 가지고 있으며, 이를 극복하기 위해 다양한 시도가 이루어져 왔다. 예를 들어, AP모델의 정확도를 높이기 위해 quadratic, cubic, logarithmic, exponential 등의 관계식들이 제시되었다 (Ögelman *et al.*, 1984; Samuel, 1991; Ampratwum and Dorvlo, 1999; Almorox and Hontaria, 2004). Teke

et al.(2015)은 Angstrom모델을 기반으로 한 일사량 추정방식은 크게 선형회귀모델, 비선형회귀모델로 구분되며, 이 중에서 비선형회귀모델을 통한 일사량 추정의 정확도가 더 높은 것으로 분석하였다. 또한 Despotovic *et al.*(2015)은 World Radiation Data Centre에서 제공하는 기상데이터를 이용하여 전세계 928지점에서의 선형모델과 polynomial, logarithmic, exponential, power 등의 비선형모델 총 101개를 사용하여 6년 동안의 일사량 추정값을 비교해본 결과, polynomial 모델과 선형모델이 가장 효과적임을 보고하였다.

Russo and Zou(2019)는 모델 개발 과정에서 과적합(overfitting) 현상이 일어나는 것을 주의해야 된다고 하였다. 특히, 제한적인 시공간 범위에서 얻어진 데이터를 사용하여 모델의 모수를 추정하기 위한 calibration을 수행할 경우, 해당 모델이 이미 수집된 데이터에 대한 정확도는 높지만 그 이외의 지역에서는 오차가 커질 수 있다는 점을 제시하였다. Frere and Popov(1979)가 제안한 기후특이적 AP계수는 FAO 내부의 여러 프로젝트에서 검증된 수치로서 아프리카의 9개국을 포함하여 다수의 조건에서 추정된 계수인 반면, Choi *et al.* (2010)이 제안한 지역특이적 AP계수는 1983년부터 2007년 기간 동안 18개의 국내 지점에서 얻어진 관측값을 사용하여 추정된 것이다. 따라서, 본 연구에서 사용된 지역특이적 계수는 특정 시공간 범위에서 나타나는 기후조건에 적합하도록 추정되었기 때문에 상대적으로 과적합에 의한 오차 증가가 발생할 수 있다. 본 연구에서도 지역특이적 계수보다 기후특이적 계수로 일사량을 추정하였을 때 관측값과 더 가까웠다. 추후 연구에서는 상대적으로 오랜 기간 동안 수집된 자료를 사용하여 지역특이적 계수를 추정하고 이들의 신뢰도를 분석하여야 할 것이다.

일조시간 외에도 구름, 에어로졸, 기온, 습도 등의 여러 변수를 복합적으로 사용하여 일사량 추정의 정확도를 높일 수 있다. White *et al.*(2011)은 인공위성 자료를 사용하면 구름 및 에어로졸에 의한 대기투과율을 직접 계산하여 신뢰도 높은 일사량 추정값을 얻을 수 있다고 하였다. Antonopoulos *et al.*(2019)는 artificial neural network (ANN)와 multi-linear regression methods (MLR) 방식을 사용하여 물리적 일사량 추정 모델을 개발하고 이러한 모델이 상대적으로 높은 정밀도를 보인 것으로 보고하였다. 특히, 인공위성 자료는 상당히 넓은 범위에서의 일사량 추정을 가능하게 한다는 장점이 있다. 예를 들어, Escobar *et al.*(2015)는 최대 5km

공간해상도로 칠레의 전지역에 대한 시간당 일사량 추정값을 인공위성 자료를 사용하여 생산하였다. 또한, Kim *et al.*(2020a)은 천리안 인공위성의 위성영상을 활용하여 한반도 여러 지역의 일사량을 계산하였다. 추후 연구에서 다양한 변수와 ANN, 인공위성 기술 등을 접목하여 실시간 위성자료를 통한 정확한 지역별 일사량을 예측하고 이를 작황에 도입하여 작물의 생육을 모의할 수 있는 체계를 구성 및 응용하여 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

적 요

일사량은 작물모형의 구동에 필수적인 요소지만, 일사량의 직접관측은 다른 기상자료들과 다르게 많은 인적, 물적 자원이 필요하다. 직접 일사량을 측정하는 대신 다른 기상자료를 통해 일사량을 추정하는 여러 방식이 존재하고 그중 대표적인 방법이 일조시간을 통해 일사량을 추정하는 Angstrom-PreScott 모델이다. Frere and Popov(1979)에 의해 전세계의 기후를 세 분류로 나누어 일조시간을 일사량으로 변환하는 AP 계수(AP_{Frere})가 제시되었고, 국내 18개 중관기상관측소에서 30년간 관측한 일단위 일사량과 일조량 관측 자료를 통해 AP계수를 경험적으로 도출한 계수(AP_{Choi})가 Choi *et al.*(2010)에 의해 제시되었다. 본 연구에서는 2012년부터 2021년까지 일사량 관측값(S_{Obs})과 AP_{Frere} 와 AP_{Choi} 를 통해 도출한 일사량(S_{Frere} , S_{Choi})을 NRMSE와 t검정을 통해 분석하였고, 이를 DSSAT 작물모형에 입력모수로 사용하여 벼 품종 오대, 화성 및 추청에 대한 생육모의를 하였다. 일사량 추정 결과 일사량의 추정값과 측정값 사이에는 12%에서 22%사이의 오차가 존재하였고, 이를 3월부터 9월 사이의 생육기간에 한정하여 누적 일사량을 계산하면 오차가 줄었다. 18개의 지역중 관찰값과 생육기간의 누적 일사량은 S_{Frere} 의 경우에 10개의 지역에서 S_{Choi} 보다 S_{Obs} 와 가까웠고, 일일 일사량의 오차율을 통해 분석하였을때 S_{Frere} 가 12개 지역에서 더 가까웠다.

감사의 글

이 논문은 본 연구는 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 농업에너지자립형 산업모델기술개발 사업의 지원을 받았습니다(321075-02-1-SB010).

REFERENCES

- Abraha, M. G., and M. J. Savage, 2008: Comparison of estimates of daily solar radiation from air temperature range for application in crop simulations. *Agricultural and Forest Meteorology* **148**(3), 401-416.
- Aladenola, O. O., and C. A. Madramootoo, 2004: Evaluation of solar radiation estimation methods for reference evapotranspiration estimation in Canada. *Theoretical and applied climatology* **118**, 377-385.
- Almorox, J. Y., and C. J. E. C. Hontoria, 2004: Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain. *Energy Conversion and Management* **45**(9-10), 1529-1535.
- Ampratwum, D. B., and A. S. Dorvlo, 1999: Estimation of solar radiation from the number of sunshine hours. *Applied energy* **63**(3), 161-167.
- Angstrom, A., 1924: Solar and terrestrial radiation. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **50**(210), 121-126.
- Antonopoulos, V. Z., D. M. Papamichail, V. G. Aschonitis, and A. V. Antonopoulos, 2019: Solar radiation estimation methods using ANN and empirical models. *Computers and Electronics in Agriculture* **160**, 160-167.
- Aubry, C., F. Papy, and A. Capillon, 1998: Modelling decision-making processes for annual crop management. *Agricultural systems* **56**(1), 45-65.
- Besharat, F., A. A. Dehghan, and A. R. Faghieh, 2013: Empirical models for estimating global solar radiation: A review and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **21**, 798-821.
- Bouman, B. A. M., 2001: *ORYZA2000: modeling lowland rice*. IRRI.
- Choi, M.-H., and J. I. Yun, U. Chung, and K. H. Moon, 2010: Performance of Angstrom-PreScott Coefficients under Different Time Scales in Estimating Daily Solar Radiation in South Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **12**(4), 232-237. (in Korean with English abstract)
- Despotovic, M., V. Nedic, D. Despotovic, and S. Cvetanovic, 2015: Review and statistical analysis

- of different global solar radiation sunshine models. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* **52**, 1869-1880.
- Duffie, J. A., W. A. Beckman, and N. Blair, 2013: *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons.
- Escobar, R. A., C. Cortés, A. Pino, M. Salgado, E. B. Pereira, F. R. Martins, J. Boland, and J. M. Cardemil, 2015: Estimating the potential for solar energy utilization in Chile by satellite-derived data and ground station measurements. *Solar Energy* **121**, 139-151.
- Frere, M., and G. F. Popov, 1979: *Agrometeorological crop monitoring and forecasting*.
- Hunt, L. A., L. Kuchar, and C. J. Swanton, 1998: Estimation of solar radiation for use in crop modeling. *Agricultural and Forest Meteorology* **91**(3-4), 293-300.
- Hyun, S., and K. S. Kim, 2016: Assessment of the Angstrom-Prescott coefficients for estimation of solar radiation in Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **18**(4), 221-232. (in Korean with English abstract)
- Jones, J. W., G. Hoogenboom, C. H. Porter, K. J. Boote, W. D. Batchelor, L. A. Hunt, P. W. Wilkens, U. Singh, A. J. Gijssman, and J. T. Ritchie, 2003: The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* **18**(3-4), 235-265.
- Kang, D., S. Hyun, and K. S. Kim, 2019: Development of a deep neural network model to estimate solar radiation using temperature and precipitation. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **21**(2), 85-96. (in Korean with English abstract)
- Keating, B. A., P. S. Carberry, G. L. Hammer, M. E. Probert, M. J. Robertson, D. Holzworth, N. I. Huth, J. N. G. Hargreaves, H. Meinke, Z. Hochman, G. McLean, K. Verburg, V. Snow, J. P. Dimes, M. Silburn, E. Wang, S. Brown, K. L. Bristow, S. Asseng, S. Chapman, R. L. McCown, D. M. Freebairn, and C. J. Smith, 2003: An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy* **18**, 267-288.
- Kim, C.-K., H.-G. Kim, Y.-H. Kang, B.-Y. Kim, 2020a: Evaluation of Satellite-Derived Solar Irradiance and Limitation in Ground Observation. *Journal of the Korean Solar Energy Society* **40**(6), 121-134. (in Korean with English abstract)
- Kim, D.-J., S.-O. Kim, K. H. Moon, and J. I. Yun, 2012: An Outlook on Cereal Grains Production in South Korea Based on Crop Growth Simulation under the RCP8.5 Climate Change Scenarios. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **14**(3), 132-141. (in Korean with English abstract)
- Kim, D.-J., J.-H. Roh, C.-K. Kim, and J. I. Yun, 2013: The Influence of Shifting Planting Date on Cereal Grains Production under the Projected Climate Change. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **15**(1), 26-39. (in Korean with English abstract)
- Kim, K. S., J. Kim, and S. Hyun, 2020b: Analysis of Crop Survey Protocols to Support Parameter Calibration and Verification for Crop Models of Major Vegetables. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **22**(2), 68-78. (in Korean with English abstract)
- Kim, K. S., S.-O. Kim, J. H. Kim, K. H. Moon, J. H. Shin, and J. Cho, 2018: Development and application of crop models in Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **20**(2), 145-148. (in Korean with English abstract)
- Li, T., O. Angeles, M. Marcaida III, E. Manalo, M. P. Manalili, A. Radanielson, and S. Mohanty, 2017: From ORYZA2000 to ORYZA (v3): An improved simulation model for rice in drought and nitrogen-deficient environments. *Agricultural and Forest Meteorology* **237-238**, 246-256.
- Loague, K., and R. E. Green, 1991: Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. *Journal of contaminant hydrology* **7**, 51-73.
- Mousavi, R., A. A. Sabziparvar, S. Marofi, N. A. Ebrahimi Pak, and M. Heydari, 2015: Calibration of the Angström-Prescott solar radiation model for accurate estimation of reference evapotranspiration in the absence of observed solar radiation. *Theoretical and Applied Climatology* **119**, 43-54.
- Noia, M., C. F. Ratto, and R. Festa, 1993: Solar irradiance estimation from geostationary satellite data: I. Statistical models. *Solar Energy* **51**(6), 449-456.
- Ögelman, H., A. Ecevit, and E. Tasdemiroğlu, 1984: A new method for estimating solar radiation from bright sunshine data. *Solar Energy* **33**(6), 619-625.
- Prescott, J. A., 1940: Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. *Transactions of the Royal Society of South Australia* **46**, 114-118.
- Prieto, J. I., and D. García, 2022: Modified

- temperature-based global solar radiation models for estimation in regions with scarce experimental data. *Energy Conversion and Management* **268**, 115950.
- R Core Team, 2022: R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing.
- Reynolds, M., M. Kropff, J. Crossa, J. Koo, G. Kruseman, A. Molero Milan, J. Rukoski, U. Schulthess, B. Singh, K. Sonder, H. Tonnang, and V. Vadez, 2018: Role of modelling in international crop research: Overview and some case studies. *Agronomy*, **8**(12), 291.
- Russo, D., and J. Zou, 2019: How much does your data exploration overfit? controlling bias via information usage. *IEEE Transactions on Information Theory* **66**(1), 302-323.
- Samuel, T. D. M. A., 1991: Estimation of global radiation for Sri Lanka. *Solar Energy* **47**(5), 333-337.
- Shim, K. M., K. A. Roh, K. H. So, G. Y. Kim, H. C. Jeong, and D. B. Lee, 2010: Assessing impacts of global warming on rice growth and production in Korea. *Climate Change Research* **1**(2), 121-131. (in Korean with English abstract)
- Swartman, R. K., and O. Ogunlade, 1967: Solar radiation estimates from common parameters. *Solar energy* **11**(3-4), 170-172.
- Teke, A., H. B. Yıldırım, and Ö. Çelik, 2015: Evaluation and performance comparison of different models for the estimation of solar radiation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **50**, 1097-1107.
- Trnka, M., J. Eitzinger, P. Kapler, M. Dubrovský, D. Semerádová, Z. Ě. Žalud, and H. Formayer, 2007: Effect of estimated daily global solar radiation data on the results of crop growth models. *Sensors* **7**(10), 2330-2362.
- White, J. W., G. Hoogenboom, P. W. Wilkens, P. W. Stackhouse Jr, and J. M. Hoel, 2011: Evaluation of satellite-based, modeled-derived daily solar radiation data for the continental United States. *Agronomy Journal* **103**(4), 1242-1251.
- Yang, C.-H., T.-K. Kim, J.-H. Ryu, J.-D. Kim, and K.-Y. Jung, 2009: Soil Characteristic of Plow and Compaction Layer in Fluvio-marine Deposit Paddy Soil. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* **42**(5), 364-370. (in Korean with English abstract)
- Zhang, J., L. Zhao, S. Deng, W. Xu, and Y. Zhang, 2017: A critical review of the models used to estimate solar radiation. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* **70**, 314-329.