

국내 일사량 추정을 위한 Angstrom-PreScott계수의 평가

현신우¹ · 김광수^{1,2*}

¹서울대학교 식물생산과학부

²서울대학교 농림기상협동과정

(2016년 11월 1일 접수; 2016년 11월 25일 수정; 2016년 12월 9일 수락)

Assessment of the Angstrom-PreScott Coefficients for Estimation of Solar Radiation in Korea

Shinwoo Hyun¹ and Kwang Soo Kim^{1,2*}

¹Department of Plant Science, Seoul National University, Seoul, Korea

²Interdisciplinary Program in Agricultural and Forest Meteorology, Seoul National University, Seoul, Korea

(Received November 1, 2016; Revised November 25, 2016; Accepted December 9, 2016)

ABSTRACT

Models to estimate solar radiation have been used because solar radiation is measured at a smaller number of weather stations than other variables including temperature and rainfall. For example, solar radiation has been estimated using the Angstrom-PreScott (AP) model that depends on two coefficients obtained empirically at a specific site (AP_{Choi}) or for a climate zone (AP_{Frere}). The objective of this study was to identify the coefficients of the AP model for reliable estimation of solar radiation under a wide range of spatial and temporal conditions. A global optimization was performed for a range of AP coefficients to identify the values of AP_{max} that resulted in the greatest degree of agreement at each of 20 sites for a given month during 30 years. The degree of agreement was assessed using the value of Concordance Correlation Coefficient (CCC). When AP_{Frere} was used to estimate solar radiation, the values of CCC were relatively high for conditions under which crop growth simulation would be performed, e.g., at rural sites during summer. The statistics for AP_{Frere} were greater than those for AP_{Choi} although AP_{Frere} had the smaller statistics than AP_{max} did. The variation of CCC values was small over a wide range of AP coefficients when those statistics were summarized by site. AP_{Frere} was included in each range of AP coefficients that resulted in reasonable accuracy of solar radiation estimates by site, year, and month. These results suggested that AP_{Frere} would be useful to provide estimates of solar radiation as an input to crop models in Korea. Further studies would be merited to examine feasibility of using AP_{Frere} to obtain gridded estimates of solar radiation at a high spatial resolution under a complex terrain in Korea.

Key words: Sunshine duration, Solar radiation, Crop model, Input data, Concordance correlation coefficient, Degree of agreement



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

I. 서 론

농경지에서의 생물리학적 과정을 예측하기 위해 다양한 모델들이 사용되어 왔다(Kim *et al.*, 2015; Holzworth *et al.*, 2015). 이러한 모델들은 관개 관리를 최적화하기 위한 증발산량 예측뿐만 아니라 작물의 수량을 예측하기 위한 작물 생육 모델들과 지표모델들이 포함된다(Kim *et al.*, 2013; Masutomi *et al.*, 2016). 예를 들어, 벼, 옥수수, 콩 등 주요 작물의 생육을 예측하기 위해 Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) 모델이 사용되어 왔다(Jones *et al.*, 2003). 또한, Noah 지표 모델을 사용하여 토양-식생-대기 연속체 사이에서의 물질과 에너지 교환을 모의하여 왔다(Kim *et al.*, 2013).

작물의 생산성을 예측하는 모델들은 대부분 일사량을 주요 입력자료로 사용한다. 예를 들어, DSSAT 모델 뿐만 아니라, ORYZA2000 모델 및 APSIM, STICS 모델들과 같은 작물 생육 모의 모델들은 일사량이 필수적인 기상 입력변수이다(Brisson *et al.*, 2003; Jones *et al.*, 2003; Heinemann *et al.*, 2012). Noah 모델과 같은 지표 모델 역시 일사량은 필수 입력변수이다.

일사량 관측자료는 상대적으로 적은 수의 기상관측소에서 제공되고 있다(Choi *et al.*, 2010). 국내에서는 94개 기상관측소에서 최저 및 최저기온, 강수량, 일조시간에 대한 일별관측자료를 기상청으로부터 얻을 수 있다. 그러나, 일사량 관측자료는 단지 37개소에서 제공되고 있다. 이들 일사량이 측정되고 있는 기상관측소 중 30년 이상 관측자료를 확보할 수 있는 곳은 20여곳에 지나지 않는다. 따라서, 일사량 관측자료가 가용하지 않는 많은 지점들에서는 작물 생산성을 예측하는 모델을 구동하기 어렵다.

관측자료를 대신하기 위해 일사량을 추정하기 위한 많은 방법들이 개발되어 왔다(Besharat *et al.*, 2013). 일사량을 추정하기 위해 일조시간, 기온, 강수량, 습도, 운량 등이 사용되어 왔다(Black, 1956; Swartman and Ogunlade, 1967; Jong and Stewart, 1993). Srivastava and Pandey(2013)는 Angstrom-Prescott 모델(AP 모델)이 가장 널리 쓰이는 일사량 모델이라고 보고하였다. 또한, Frere and Popov(1979)은 3종의 기후대를 구분하여 해당 기후조건에 사용될 수 있는 AP 모델을 위한 계수를 제시하였다.

AP 모델을 사용하여 보다 신뢰성 높은 일사량 추정하기 위한 연구가 진행되어 왔다(Srivastava and Pandey,

2013; Almorox and Hontoria, 2004). Liu *et al.*(2009)과 Choi *et al.*(2010)는 AP 모델의 입력자료를 월평균 자료를 이용하는 것보다 일단위 자료를 사용하였을 때 예측된 일사량의 오차가 적었다는 것을 보고하였다. 또한, 지역별로 특이적인 Angstrom-Prescott 계수(AP 계수) 추정을 통해 일사량 추정자료의 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 보고되었다. 그러나, 지역별 AP계수의 추정을 위해 장기간의 일사량자료와 일조시간 자료가 요구된다. Liu *et al.*(2009) 역시 안정적인 AP계수를 얻기 위해 특정지역의 경우 장기간의 자료가 필요하다는 것을 보고하였다. 그러나 장기간동안 일사량을 관측하는 지역이 많지 않아 개선된 AP 계수를 사용하는 것에 한계가 있다.

지역특이적인 AP 계수를 사용할 수 없을 경우, Frere and Popov(1979)가 제시한 보편적인 계수가 사용될 수 있다. 특히, 광범위한 지역에서 사용될 수 있는 계수가 사용될 경우, 공간적인 일사량 예측에도 도움을 줄 수 있다. 그러나, 지역 특이적인 계수와 Frere and Popov(1979)가 제안한 계수를 사용하여 추정된 일사량에 대한 비교 연구는 거의 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 우리나라에서 Frere and Popov(1979)가 제시한 계수(AP_{Frere})와 지역특이적으로 얻어진 계수(AP_{Choi}), 전역최적화를 통해 얻어진 계수(AP_{max})를 사용하여 추정된 일사량의 신뢰도를 비교하고 보다 보편적으로 사용될 수 있는 AP 계수를 탐색하는 것을 목표로 하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 기상자료

장기간의 일사량 관측치와 추정치를 비교하기 위해 최근 30년간 관측된 일별 일조시간 및 일사량 자료를 수집하였다. 국내에서 1986년부터 2015년까지 일조시간 및 일사량이 관측된 기상관측소는 총 20개소였다(Fig. 1). 일사량 및 일조시간 관측자료가 가용한 기상관측소의 대부분은 농림지역 뿐만 아니라 도시지역에 분포하였다.

기상관측소 20개 지점에서 30년간의 자료를 수집하기 위해, 기상자료 수집도구인 Wisedownloader (Lee *et al.*, 2015)를 사용하였다. Wisedownloader의 설정파일에 기상관측소 지점번호와 다운로드 기간을 지정하여, 기상청 홈페이지로부터 과거 기상자료를 자동으로 수집할 수 있다. Java 로 작성된 소스코드의 main 함수에서 다운로드를 받기 위한 기상변수들을 설정할 수 있



Fig. 1. Location of the weather stations where observation data of solar radiation and sunshine duration were collected from 1986-2015.

다. 본 연구에서는 일사 및 일조를 해당 변수로 설정하였다.

2.2. Angstrom-Prescott 모델

Angstrom-Prescott 모델(AP모델)은 Angstrom(1924)에 의해 제안된 월평균 일조율과 일사율 사이의 직선회귀식으로 개발되었다. Prescott(1940)은 보다 일반적인 관계식을 얻기 위해 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$SR(a, b) = (a + b(\frac{S}{S_0}))H_0 \tag{1}$$

여기서 $SR(a, b)$ 가 주어진 a, b 값을 사용하여 추정하고자 하는 일사량을 나타낸다. S 는 관측된 일조시간(hour)이다. S_0 와 H_0 는 각각 가조시간(hour)과 대기권 밖 일사량($MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$)으로 다음과 같이 계산하였다(Allen *et al.*, 1998).

$$S_0 = \frac{24}{\pi} \omega_s \tag{2}$$

$$H_0 = \frac{24 \times 60}{\pi} G_{sc} d_r (\omega_s \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s) \tag{3}$$

여기서 G_{sc} 및 φ 는 각각 태양상수($0.0820\ MJ\ m^{-2}\ min^{-1}$)와 위도(radian)를 나타낸다.

δ 와 ω_s 는 일적위(radian)와 일몰시간각(radian)을 나타내며 다음과 같이 계산하였다.

$$\delta = 0.409 \sin(\frac{2\pi}{365} DOY - 1.39) \tag{4}$$

$$\omega_s = \arccos(-\tan \varphi \tan \delta) \tag{5}$$

d_r 은 태양과 지구상의 상대적인 거리를 나타내며 다음과 같이 계산하였다.

$$d_r = 1 + 0.033 \cos(\frac{2\pi}{365} DOY) \tag{6}$$

일사량과 관련한 대기상태를 대표할 수 있는 AP계수는 일반적으로 지역과 기간에 따라 경험적으로 얻어질 수 있다(Liu *et al.*, 2009). AP 계수 중 a 는 흐린 날과 같이 일조시간이 0일 때 통상적인 태양복사의 대기투과율을 나타내고, b 는 일조율이 늘어남에 따라 증가하는 태양복사의 대기투과율을 나타낸다. 이에 따라 $a+b$ 는 맑은 날과 같이 일조시간과 가조시간이 같은 날의 태양복사 대기투과율을 나타낸다. 대기권 밖 일사가 줄어들지 않고 지표면에 도달하는 상태에서 a 와 b 값의 합이 1이 된다. 그러나, 태양광이 대기를 통과할 때 여러 입자들에 의해 산란, 흡수되어 줄어들게 되기 때문에, a 와 b 값의 합은 1보다 작게 된다(Choi and Yun, 2009).

2.3. AP계수값에 따른 일사량 추정치와 관측치의 일치도 분석

본래의 AP 모델은 월평균 자료를 사용하여 일사량을 예측하도록 개발되었다. 그러나, Choi *et al.*(2010)과 Liu *et al.*(2009) 등은 AP 모델을 사용하여 일별 일사량을 추정하는 것이 가능하다고 보고하였다. 본 연구에서도 일별 일조시간을 이용한 일별 일사량을 예측하여 분석에 사용하였다.

Frere and Popov(1979)는 전세계를 3가지 기후대로 구분하고, 각각의 기후대에서 사용할 수 있는 AP계수를 제시하였다(Table 1). 우리나라 지역에서는 온대 및 한대지역에 속하므로 $a = 0.18$ 및 $b = 0.55$ 인 AP계수값(AP_{Frere})이 사용될 수 있다. 이전 연구에서는 장기간의 일사량 관측자료와 추정자료를 비교하여 지역특이적인 AP 계수를 결정하였다(Choi *et al.*, 2010; Srivastava and Pandey, 2013; Liu *et al.*, 2009). 국내의 지역특이적인

AP계수값은 Choi *et al.*(2010) 이 제시한 AP계수값 (AP_{Choi})가 사용될 수 있다.

Table 1. AP coefficient suggested by Frere and Popov(1979)

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

지역특이적인 AP 계수값을 경험적으로 결정할 경우, 해당 지점별 관측값과 예측값의 회귀식을 사용하여 AP 계수값들을 얻을 수 있다. 그러나, 경험적으로 결정된 AP 계수값은 특정 지역에 대해 관측자료가 얻어진 일부 기간 동안에 대해 최적화된 값이기 때문에, 국소적 최적화(local optimization)의 결과값이라 볼 수 있다. 따라서, 국소적 최적화에 사용된 자료의 측정시기와 AP 계수값이 적용되는 시기가 다를 경우에는 비교적 낮은 신뢰성을 가진 일사량 추정치가 얻어질 수 있다.

전역 최적화(global optimization)를 수행할 경우 보다 보편적으로 사용될 수 있는 AP 계수값을 얻을 수 있다. 전역 최적화는 AP 계수의 가능한 모든 범위에 대해 이들 값의 신뢰성을 추정하여 최적의 값을 선정하는 것이다. van Oort *et al.*(2015)는 a 의 범위를 0.1에서 0.4, b 의 범위를 0.3에서 0.7, $a+b$ 의 범위를 0.6에서 0.9로 설정하였다. 본 연구에서도 van Oort *et al.*(2015)가 제시한 AP 계수값의 범위 내에서 다음과 같이 일사량을 추정하였다.

$$SR = \{SR(a, b) | 0.1 \leq a \leq 0.4, 0.3 \leq b \leq 0.7, 0.6 \leq a + b \leq 0.9\} \quad (7)$$

여기서 SR 은 해당 범위의 AP계수에서 얻어진 모든 일사량 추정치의 집합을 나타낸다.

특정 AP계수를 사용하여 얻어진 일사량의 신뢰도를 분석하기 위해 일사량 추정치와 관측치의 일치도(Degree of agreement) 통계량을 계산하였다. 일치도 통계량으로는 Concordance Correlation Coefficient (CCC)를 사용하였다. Lin(1989; 2000)이 제안한 CCC는 다음과 같이 계산된다.

$$CCC(AP, OBS) = \frac{2r(AP, OBS)}{VSR(AP) + VSR(OBS) + (\overline{SR(AP)} - \overline{SR(OBS)})^2} \quad (8)$$

여기서

$$\overline{SR(AP)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n SR_i(AP) \quad (9)$$

$$VSR(AP) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (SR_i(AP) - \overline{SR(AP)})^2 \quad (10)$$

$$r(AP, OBS) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (SR_i(AP) - \overline{SR(AP)})(SR_i(OBS) - \overline{SR(OBS)}) \quad (11)$$

AP와 OBS는 각각 주어진 AP계수와 관측치를 나타낸다. n 은 전체 자료의 수이다.

CCC는 실험의 재현성을 평가하기 위해 만들어졌으나 두 자료 간 일치도를 평가할 수 있기 때문에 모델의 예측결과와 실제 자료의 일치도를 평가하는 데에도 사용될 수 있다. Chirico and Gramatica(2011)는 CCC를 이용해 QSAR 모델의 정확성을 평가하였고, Wilkerson *et al.*(1995)은 CCC를 이용하여 메탄가스 방출량에 대해서 모델의 결과와 실제 데이터를 비교하는 연구를 진행하였다. 아직까지 CCC에 대한 명확한 기준은 존재하지 않지만 McBride(2005)가 제안한 기준을 사용할 수 있을 것이다. 예를 들어, 연속적인 변수에 대하여 CCC가 0.9 이하일 경우 일치도가 낮은 것으로 판단될 수 있다. 또한, CCC 값이 0.95에서 0.99까지를 높은 일치도를 보이는 것으로 구분할 수 있다. 일사량 추정치와 CCC 값을 계산하기 위하여 통계 소프트웨어인 R과 'epiR' 패키지를 사용하였다.

2.4. 일사량 추정치의 시공간적 분석

대기 투과율과 밀접한 관계가 있는 AP계수는 시공간적으로 다른 값을 사용하는 것이 일반적이기 때문에 AP계수를 사용하여 추정된 일사량을 시간적, 공간적으로 구분하여 분석을 하였다. 우선, AP모델이 월별 일사량을 추정하기 위해 개발된 것을 고려하여 일사량 추정치의 일치도를 월별로 분석하였다. 또한, 일조율과 일사율의 관계의 시계열적 변동양상을 알아보기 위해 년도별로 분석을 하였다. 마지막으로 일사량 추정치의 공간적 분포를 알아보기 위해 지역별 일치도 분석을 수행하였다. 일사량은 주로 농림지역에서 작물 생산성을 예측하거나 관개요구량을 추정하기 위해 사용될 수 있기 때문에, 농림지역과 도시지역을 구분하여 분석하였다. 이를

위해, 편의상 관측소 소재 지역의 인구가 100만 이하일 경우 농림지역으로 구분하였고, 그 외 지역을 도시지역으로 구분하여 비교하였다.

우선, AP_{Frere} 를 사용하여 추정한 일사량을 시공간적으로 구분하여 분석하였다. 특정 월을 나타내는 $m \in \{1, 2, \dots, 12\}$ 에 얻어진 일별 일사량 추정치와 관측치를 각각 $SR(AP_{Frere})_m$ 와 $SR(OBS)_m$ 이라 할 때, 주어진 월에 대한 일치도 ($CCC_{Frere|m}$)를 다음과 같이 계산하였다.

$$CCC_{Frere|m} = CCC(SR(AP_{Frere})_m, SR(OBS)_m) \quad (12)$$

마찬가지로 특정 지역 및 년도를 나타내는 $s \in \{0, 1, \dots, 19\}$ 와 $y \in \{1986, 1987, \dots, 2015\}$ 에 대해서 각각의 지역별 일치도($CCC_{Frere|s}$) 및 년도별 일치도($CCC_{Frere|y}$)를 계산하였다.

전역최적화 분석을 통해 신뢰성 높은 일사량 추정치를 얻을 수 있는 AP계수들의 시공간적인 분포를 분석하였다. 각 계수별로 얻어진 일별 일사량 추정치를 해당 지점, 년도 및 월별로 일치도 통계량을 계산하였다. 주어진 지점 s , 년도 y , 및 월 m 에 대해 a 와 b 값의 모든 범위에 대해 계산된 CCC를 $CCC_{[s,y,m]}$ 으로 표시하였다. 예를 들어, 지역코드 값이 0인 수원외의 2015년 1월 중 일별 일사량 추정치를 구하고 이들 값과 일사량 관측치와 비교하여 계산된 CCC 값을 $CCC_{[0,2015,1]}$ 로 표기되었다.

전역최적화를 통해 얻어진 AP계수와 이전 연구에서 보고된 AP 계수를 사용하여 얻어진 일사량 추정치의 신뢰도를 비교하기 위해 이들의 CCC 값을 비교하였다. 전역최적화 범위의 AP계수를 사용하여 월별로 얻어진 일사량 추정치와 관측치 사이의 CCC 값을 계산하고, 이들 CCC 값 중에서 최대값을 얻을 수 있는 AP 계수(AP_{max})를 구분하였다. 기존의 AP_{Frere} 와 AP_{Choi} 로부터 얻어진 CCC 값과 구별하기 위해 특정 AP 계수 X 로부터 얻어진 CCC 값들을 $CCC_{X|[s,y,m]}$ 로 표기하였다. 예를 들어, AP_{max} 를 사용하여 얻어진 CCC 값을 $CCC_{max|[s,y,m]}$ 으로 표기하였다. 이를 이용해 수원외의 2015년 1월에 대해 AP_{max} 를 이용하여 얻어진 일사량 추정치의 CCC 값은 $CCC_{max|[0,2015,1]}$ 으로 표기하였다. AP_{max} , AP_{Frere} 그리고 AP_{Choi} 를 비교하기 위해 각각의 CCC값의 분포를 분석하였다. 그리고 AP_{max} 를 구성하는 a , b , 그리고 $a+b$ 값에 대한 각각의 확률밀도함수를 계산하였다. AP_{max} 는 20개 지역에 대해서 30년 동안 매 월별로 서로 다른 AP계수의 조합이 나타나기 때문에 총 7200개의 AP계수를 가지게 된다. 확률분포함수를 이용해 이 계수들의 a , b 및

$a+b$ 값의 분포를 추정하고, 이를 AP_{Frere} 와 비교하였다.

전역최적화 과정을 통해 신뢰도 높은 일사량을 추정할 수 있는 AP 계수의 범위를 파악하였다. 주어진 AP계수를 사용하여 얻어진 일사량 추정치에 대해 특정 지역 또는 특정 기간동안 CCC값을 계산하였다. 예를 들어, 모든 AP계수에 대해 월별 CCC값을 다음과 같이 계산하였다.

$$CCC_m = \{CCC(SR(a,b)_m, SR(OBS)_m) | 0.1 \leq a \leq 0.4, 0.3 \leq b \leq 0.7, 0.6 \leq a + b \leq 0.9\} \quad (13)$$

CCC \in CCC_m 중에서 평균값이 크고 변이가 적은 CCC값들을 분류하였다. 이들 CCC 값이 얻어진 AP계수들의 분포를 분석하고 AP_{Frere} 및 AP_{Choi} 와 비교하였다. 특정 AP계수에 대한 월별 CCC 값의 평균은 다음과 같이 계산되었다:

$$\overline{CCC_m} = \frac{1}{12} \sum_{m=1}^{12} CCC_m \quad (14)$$

또한, 변이가 작은 AP계수의 범위를 확인하기 위해 개별 AP계수에 대해 변이계수를 다음과 같이 계산하였다.

$$CV = \sqrt{1/12 * \Sigma(\overline{CCC_m} - CCC_m)^2 / \overline{CCC_m}} \quad (15)$$

변이계수는 평균에 대한 상대적인 변동성을 나타내기 때문에 평균이 다른 자료를 비교할 때 사용하게 된다. 같은 방식으로 년도별 및 지역별 CCC값을 각각 계산하여 CCC_y 와 CCC_s 를 결정하였다. 또한, 이들 값의 평균과 변이계수를 년도별 및 지역별로 구하였다. 본 연구에서는 CCC 평균값이 0.9 이상 그리고 변이계수가 2% 이하가 얻어진 AP계수들을 분석하였다.

III. 결 과

3.1. AP_{Frere} 를 이용한 일사량 추정

Frere and Popov(1979)가 제안한 AP_{Frere} 를 이용하였을 때, 대부분의 일사량 추정치는 높은 일치도를 가졌으며, 특히 작물 생산성 예측을 위한 조건에서 일치도가 높았다. 월별로는 작물 재배기간동안 일치도가 높은 경향을 보였다(Fig. 2A). 작물 재배기간에 해당하는 기간 중 10월을 제외하고 $CCC_{Frere|m}$ 값이 0.9 이상이었다. 반면에, 겨울철에 해당하는 기간에는 일치도가 상대적으로 낮은 경향을 보였다.

AP_{Frere} 를 이용하여 추정된 일사량은 과거보다는 최

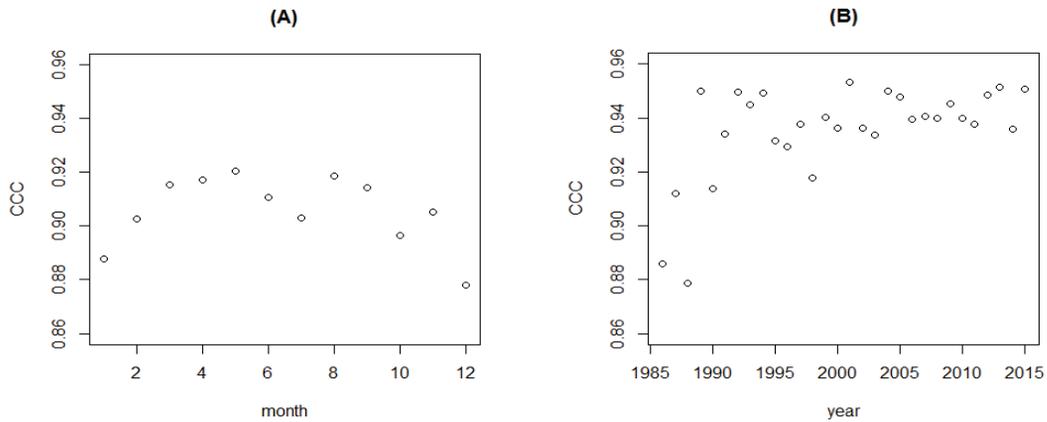


Fig. 2. Variation of CCC between estimated and observed solar radiation over months (A) and years (B).

근 기간에서 높은 일치도를 나타내는 경향을 보였다 (Fig. 2B). 1989년 이후로는 CCC_{Frere} 값이 0.9 이상을 유지한 반면 그 이전에는 0.9 미만의 낮은 일치도를 보였다. CCC_{Frere} 의 연도별 변동성도 1990년 이후에 과거 기간과 비교해서 낮은 경향을 가졌다.

지역적으로는 주요 작물재배지역에서 추정된 일사량 값이 높은 일치도를 보였다(Fig. 3). 모든 지역에 대해서 0.9 이상의 CCC_{Frere} 값이 계산되었으나 도시지역보다 농림지역에서 일치도가 상대적으로 높았다. 예를 들어, 서울과 부산의 CCC_{Frere} 는 각각 0.91과 0.92이었던 반면 전주와 서산의 값은 각각 0.94와 0.95였다.

3.2. 전역최적화를 사용한 일사량 추정

특정 지점과 연도에 대한 월별 일사량 추정치의 일치도를 비교하였을 때, AP_{Frere} 계수를 사용하여 월별 최대 일치도와 근접한 일치도 통계량을 얻었다(Fig. 4). CCC_{Frere} 는 CCC_{max} 보다 낮은 경향을 보였으나, CCC_{Choi} 보다는 상대적으로 높은 값을 가졌다. 예를 들어, 모든 월별 기간 동안의 CCC 값에 대해, CCC_{Frere} 가 0.9 이상일 확률은 0.7이었다. AP_{max} 를 사용했을 경우 이러한 확률은 높았다(0.94). 반면, CCC_{Choi} 가 0.9 이상일 확률은 0.59로 CCC_{Frere} 보다 낮았다.

AP_{max} 의 개별적인 계수값들은 대체적으로 AP_{Frere} 값과 유사한 값에서 확률밀도가 최대가 되는 단봉분포(unimodal distribution)을 가졌다. 확률밀도가 최대가 되는 AP_{max} 의 a 값은 0.151 이었다(Fig. 5A). 또한, b 의 최대 확률 밀도값은 0.586에서 나타났다(Fig. 5B). 이들 계수값들의 합인 $a+b$ 는 0.742에서 최대확률 밀도값이 나타나

AP_{Frere} 의 $a+b$ 값인 0.73과 유사한 값을 나타냈다(Fig. 5C).

3.3. 일사량 일치도 통계량에 따른 AP계수 최적 범위 분석

일사량 추정치의 일치도가 높은 a 와 b 값의 범위는 분석 방법에 따라 다르게 나타났다. 월별로는 일치도가 높은 AP계수값의 범위가 좁았으나 변이가 작은 계수값의 범위가 넓었다(Fig. 6A). 반면, 연도별로는 일치도가 높은 계수값의 범위는 넓었으나 일치도의 변이가 작은 범위는 좁은 경향을 보였다(Fig. 6B). 지역별로는 일치도가 높고 변이가 작은 계수들이 넓게 분포하였다(Fig. 6C). 예를 들어, CCC가 0.9를 넘는 AP계수의 범위는 연도별 평균과 지역별 평균에 대해서는 넓었으나 월별 평균에 대해서는 좁았다. 변이계수가 2% 이하인 계수의 범위는 월별 평균과 지역별 평균에 대해서는 넓었지만 연도별 평균에서는 좁았다. 각각의 경우에 대해 AP_{Frere} 는 평균적인 CCC 값은 높고 변이계수는 낮은 범위에 위치하였다.

일사량 추정치의 일치도가 높은 AP 계수의 범위는 공간과 시간 조건에 따라 다르게 나타났다(Fig. 7). 예를 들어, 4월은 7월보다 a 와 b 가 모두 낮은 범위에서 일치도가 높은 경향을 보였고, CCC_m 값이 0.9 이상인 부분이 더 넓게 분포하였다. 지역별로는 대관령에서의 AP 계수값이 수원에서 얻어진 값에 비해 a 와 b 가 각각 더 높은 범위에서 일치도가 높은 경향을 보였다. 또한, CCC_s 값이 0.9 이상인 AP계수 범위에 AP_{Frere} 와 AP_{Choi} 가 포함되었다.

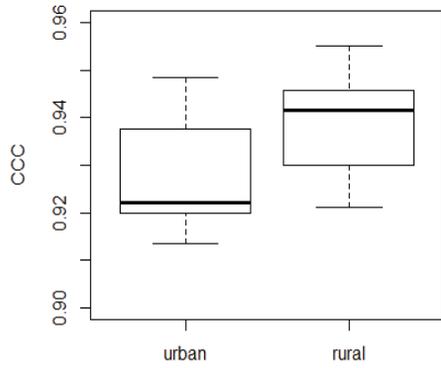


Fig. 3. Variation of CCC between estimated and observed solar radiation for urban and rural areas.

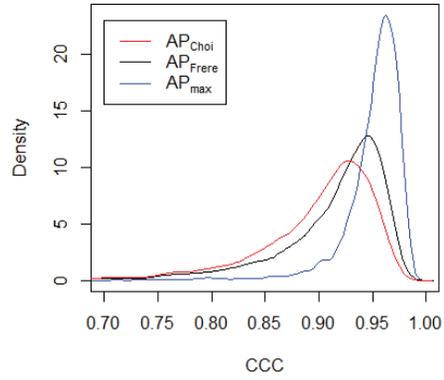


Fig. 4. Distribution of CCC between observed and estimated solar radiation using AP_{choi} , AP_{Frere} , and AP_{max} .

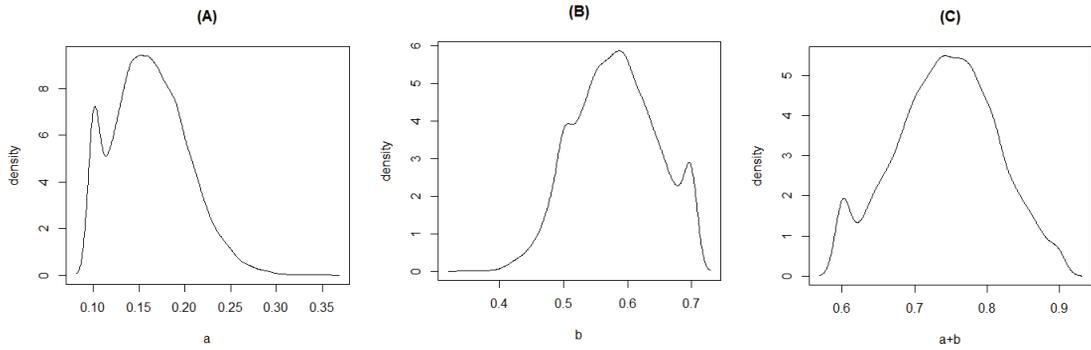


Fig. 5. Distribution of AP_{max} by type of coefficients: (A) intercept; (B) slope; and (C) sum of coefficients.

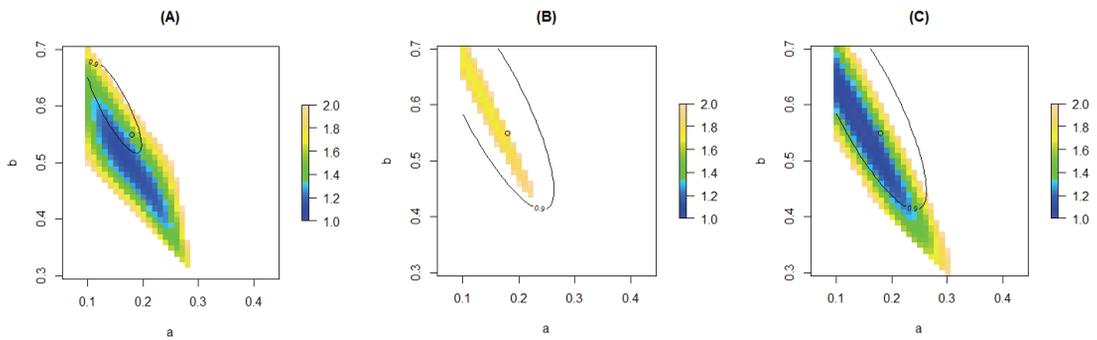


Fig. 6. CV(%) for average CCC by months (A), years (B), and sites (C).

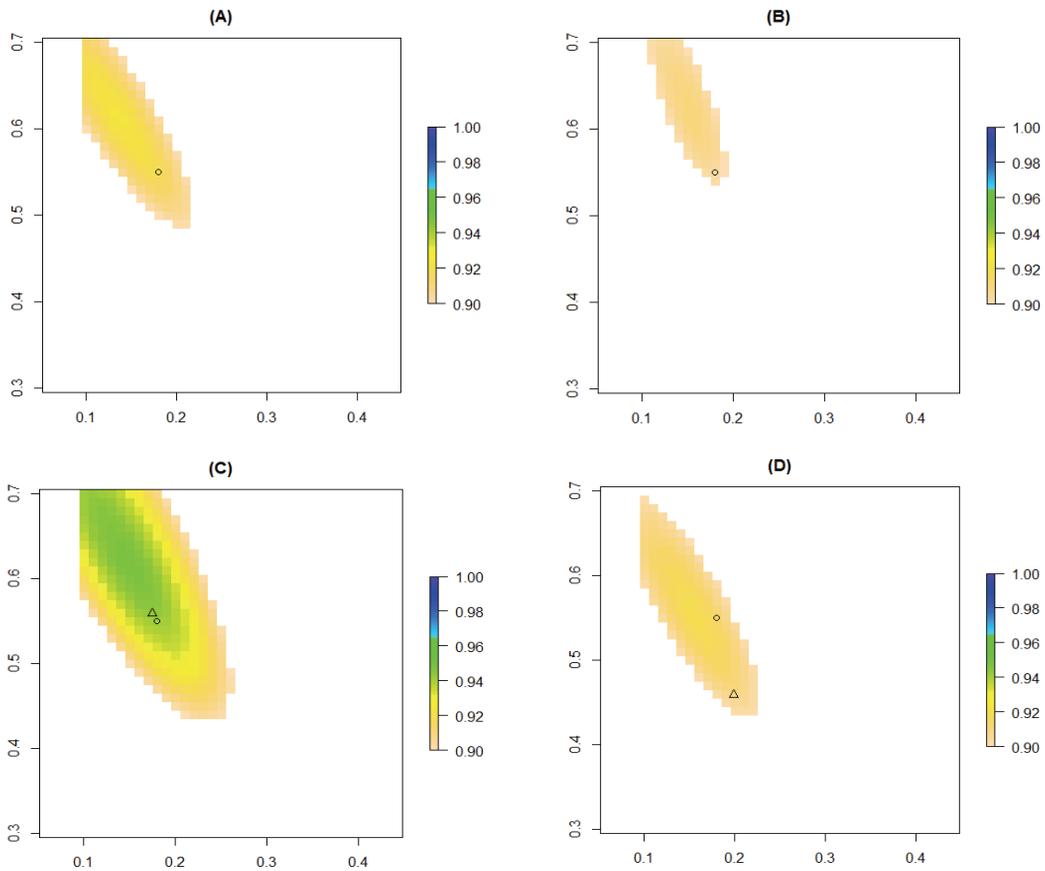


Fig. 7. CCC by AP coefficients for April (A) and July (B); and for Daegwallyeong (C) and Suwon (D), respectively. Circle and triangle represents coefficients suggested by Frere and Popov(1979; AP_{Frere}) and Choi *et al.*(2010; AP_{Choi}), respectively. AP_{Choi} appeared only for (C) and (D) because its value differs by site.

IV. 고 찰

본 연구 결과에 따르면, 우리나라에서 작물 생산성 예측을 위해 AP_{Frere} 의 활용가치가 높을 것으로 예상되었다. 국내에서는 상대적으로 적은 기상관측소에서 일사량 측정값이 얻어지므로 대부분의 지역에서 일사량 추정치가 필요하다. 일사량 추정치가 작물 생산성 예측에 사용하기 위해서 다음과 같은 조건을 만족시켜야 한다. 우선, 작물 재배기간에 대해서 신뢰도가 높은 추정이 되어야 한다. 또한, 보다 넓은 공간적인 범위에서 신뢰도 높은 일사량을 추정할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 AP_{Frere} 를 사용하여 추정된 일사량은 이러한 조건을 모두 만족시키고 있는 것을 보여주었다. 예를 들어, $CCC_{Frere|s}$ 값과 $CCC_{Frere|l}$ 값은 모두 0.9 이상이었다. 따라서, AP_{Frere} 를 사용하여 추정된 일사량을 국내 전체에 대해 적용을

하였을 때, 신뢰도 높은 작물 생산성 예측이 가능할 것으로 사료되었다.

AP_{Frere} 를 사용한 일사량 추정치는 작물 생산성 예측 이외에도 널리 사용될 수 있을 것이다. 일사량 결측값이 센서의 상태에 따라 종종 발생한다. 이러한 결측값으로 인해 해당 기간 동안 농업 생태계 모의가 불가능할 수 있다. 특히, 작물 생산성 예측을 위해서는 일정기간 존재하는 결측값으로 인해 한해의 생산성 예측이 어려워질 수 있다. 그러나, AP_{Frere} 값을 이용한 추정치로 결측값을 대체할 수 있을 것이다. 또한, AP_{Frere} 를 사용하여 추정된 일사량과 관측치의 비교를 통해 관측치의 품질관리에 사용될 수 있다. 일사량 추정치는 농업 생태계 모의 이외에도 신재생에너지 사업에 활용될 수 있다. Jo *et al.*(2011)은 태양광 발전 시스템의 설계를 위해 일사량 자료가 요구된다고 보고하였다. 일사량 측정이 일부 지역에만 국

한되기 때문에 AP_{Frere} 를 활용하여 추정된 일사량 자료가 이러한 시스템 설계에 사용될 수 있을 것이다.

특정 지점, 년도 및 월에 추정된 계수를 사용한다면 신뢰도가 높은 일사량 추정이 가능하나, 이러한 방식은 실용적이지 못하다. 예를 들어, AP_{max} 를 이용할 경우 일사량의 일치도 통계량이 가장 높았으나, 이는 일조시간과 일사량 관측값이 모두 가용한 지점에서 사용이 가능하다. 또한, 특정 지점과 기간에 대해 추정된 것이기 때문에 그 범위를 넘어가면 신뢰성이 떨어지게 되게 된다.

AP_{Choi} 와 같이 지역특이적으로 얻어진 계수보다 AP_{Frere} 를 사용하는 것이 공간적인 일사량 추정치를 얻기 위해 유리할 것으로 나타났다. 지역별 일치도를 비교한 결과에서, AP_{Frere} 를 사용하여 얻어진 일사량 추정치인 $SR(AP_{Frere})$ 값들은 AP_{Choi} 를 사용하여 얻어진 $SR(AP_{Choi})$ 보다는 높은 일치도를 가지는 경향을 보였다. 예를 들어, 대관령에서는 CCC_{Frere} 와 CCC_{Choi} 값은 각각 0.941과 0.943이었다. 그러나, 이를 제외한 모든 지점에서 SR_{Frere} 의 일치도 통계량은 SR_{choi} 의 일치도 통계량 값보다 높았다.

Choi *et al.* (2010)은 지역 특이적으로 예측된 계수를 공간내삽하여 일사량을 추정하였다. 그러나, 본 연구 결과에 따르면, 지역 특이적으로 얻어진 계수들이 항상 신뢰도 높은 일사량을 추정할 수 있게 하는 것은 아니었다. 오히려, 공간내삽이 된 일조시간과 AP_{Frere} 계수를 사용하여 신뢰도 높은 일사량 추정이 가능할 것으로 보였다. 예를 들어, AP_{Frere} 를 사용하여 예측된 일사량은 AP_{max} 를 사용했을 때와 비교하였을 때, CCC 값의 분포가 유사하였다. 비록, CCC_{Frere} 값이 CCC_{max} 보다 작았지만 대부분의 경우, CCC_{max} 와 CCC_{Frere} 사이의 차이가 2% 이하이기 때문에, 신뢰도 높은 일사량 추정이 가능할 것으로 사료되었다. 또한, AP_{Frere} 를 이용한 일사량 추정치는 지역과 기간에 대한 변이가 상대적으로 작기 때문에 넓은 지역과 기간에 대해 신뢰성 있는 일사량 추정치를 구할 수 있을 것이다. 그러나, 지형에 따른 효과 때문에, 고해상도의 일사량 추정 시 오차가 발생할 수 있다. 따라서, 공간내삽된 일조시간을 활용하여 얻어진 일사량 추정치에 대한 검증이 후속연구를 통해 이루어져야 할 것으로 사료되었다.

일사량 추정치와 관측치 사이에서 발생하는 오차는 여러가지 요인에 기인한다. 우선 일별자료를 이용하기 때문에 오차가 발생한다. 모델에서는 일조시간을 입력 자료로 사용하기 때문에 시간에 따라 들어오는 일사량이 일정하게 되지만, 실제로는 시간에 따라 빛의 강도가

다르기 때문에 같은 일조시간이라도 일사량이 다르게 된다. 예를 들어 아침의 일조시간 1시간 동안의 일사량과 낮의 일조시간 1시간 동안의 일사량은 차이가 있다. 그러나, 모델에서는 이러한 일사량의 차이를 고려할 수 없기 때문에 실제의 일사량과 차이가 발생하게 된다.

장기간의 대기 상태에 따라 일사량 추정치와 관측치 사이에서의 오차가 발생한다. AP계수는 대기투과율과 관계가 있다. 따라서, 대기 중에 빛을 산란시키는 물질의 농도에 AP계수값이 영향을 받는다. 예를 들어, 농림지역에서는 대기 오염물질이 도시지역보다 상대적으로 적기 때문에 일치도가 높은 AP계수의 범위가 좀 더 높은 값에 분포하고 상대적으로 넓게 형성되었을 개연성이 높다. AP_{Frere} 를 사용하여 일사량을 추정하였을 경우에도 이러한 원인으로 인해서 농림지역이 도시지역보다 일치도가 좀 더 높게 나타난 것으로 사료된다.

일조시간이 짧은 경우에도 일사량 오차가 큰 경향이 있었다. Choi *et al.* (2010) 역시 일조율이 0.2 이하로 낮을 경우 일조시간과 일사량 간의 관계가 변화할 수 있음을 보고하였다. 본 연구에서는 특히 일조시간이 0일 경우 일사량 추정치와 관측치 사이에서 상대적으로 큰 오차가 발생하였다. AP모델에서 일조시간이 0일 경우 일사량은 오로지 대기권 외 일사량과 상수 a 에 의해서만 결정이 된다. 그러나, 흐린 날씨 조건에서도 일사량의 차이가 있기 마련이기 때문에 이러한 일사량 관측치의 변동성을 단일 계수인 a 값으로 예측하는 것은 한계가 있다. 그럼에도 불구하고, 일조시간이 0일 경우, 평균적인 일사량이 작기 때문에 오차 역시 작아지게 된다. 따라서, 일사량이 적었던 기간의 오차는 작물 생육 예측에는 비교적 적은 영향을 줄 것으로 예상된다.

연도별 기상조건에 의해서 AP_{Choi} 와 AP_{Frere} 에 대한 일사량 추정치의 일치도가 차이가 나는 것으로 나타났다. AP_{Frere} 를 사용하였을 때, 일사량 일치도 통계량은 시간적인 변동성이 상대적으로 높았다. 특히, 년도별 일치도의 변이계수가 큰 점을 고려한다면 장기간 안정적인 AP계수를 지역별로 얻는 것을 어려울 것으로 예상된다. 예를 들어, AP_{Choi} 의 추정에 사용된 기간과 본 연구에서의 기간과 달라 CCC 값이 상대적으로 낮은 것으로 사료되었다. 본 연구에서는 기후적인 특성을 반영할 수 있는 기간인 30년 동안의 일사량을 비교하였기 때문에, 각 지역별로 높은 일치도 통계량을 얻을 수 있었던 AP_{Frere} 를 사용하는 것이 유리할 것으로 판단되었다.

AP 모델이 가지는 한계를 개선하기 위해 다른 일사량 추정 모델들과 비교를 해 볼 수 있을 것이다. 해외의 여러

지역에 대해 다수의 일사량 모델들이 비교 분석 되었다. 예를 들어, 이란(Besharat *et al.*, 2013), 인도(Namrata *et al.*, 2015) 및 중국(Chen *et al.*, 2004; Wong and Chow, 2001)에서 일사량 추정 모델들의 신뢰성이 비교되었으나, 국내에서는 아직 일사량 추정 모델들에 대한 비교 연구 사례를 찾기가 어려운 상황이다. 국내에서도 이러한 비교 연구를 통해 실용적으로 사용될 수 있는 일사량 추정모델이 개발 및 선정된다면 좀 더 정확한 일사량 자료를 생산할 수 있을 것이다.

Frere and Popov(1979)는 AP_{Frere} 가 적용 가능한 지역을 기후대별로 구분하였으나, 이전의 연구에서 지역특이적으로 얻어진 AP계수와 AP_{Frere} 를 비교하는 연구결과는 많지 않았다. 본 연구를 통해, 처음으로 국내에서 AP_{Frere} 를 적용하였을 때, 신뢰도 높은 일사량 추정이 가능할 것이라는 결과를 얻었다. 해외에서도 지역 특이적인 계수를 추정하였으나 AP_{Frere} 를 사용하여 추정된 일사량과의 비교는 거의 이루어지지 않았다. 예를 들어, Liu *et al.*(2009)와 Almorox and Hontoria(2004)는 중국과 스페인에서 지역 특이적인 AP 계수들을 추정하였으나, 이들 연구에서도 역시 AP_{Frere} 와 지역특이적으로 얻어진 AP계수의 일사량의 일치도 통계량에 대한 비교분석은 이루어지지 않았다. 해외 지역에서 AP_{Frere} 의 적용 가능성을 검토한다면 해당 지역에서의 일사량 추정에 적합한 모델을 판별하고, 더 나아가 이들 지역에서의 작물 생산성 예측에 도움을 줄 수 있을 것이다.

적 요

농업 생태계의 생산성을 예측하기 위한 모델의 필수 입력변수인 일사량은 비교적 적은 수의 기상관측소에서만 관측되고 있어, 이들 관측값을 대신하기 위해 일사량을 추정하는 모델들이 사용되고 있다. 특히, 간단한 계수를 사용하여 일조시간을 이용하는 Angstrom-Prescott (AP) 모델이 일사량 추정을 위해 가장 널리 쓰이고 있다. 국내에서 보편적으로 적용가능한 AP모델의 계수값을 탐색하기 위해 국내 20개 기상관측소의 30년간의 일단위 관측자료를 입력자료로 사용하여 경험적으로 얻어진 계수와 Frere and Popov(1979)가 제시한 계수(AP_{Frere})를 이용한 일사량을 추정하고, 이들의 신뢰도를 분석하였다. 또한, 전역최적화 과정을 통해 시공간적으로 신뢰도가 높은 일사량을 얻을 수 있는 AP계수의 범위를 탐색하였다. 분석을 위해 월별, 년도별, 지역별로 추정값과 측정값 사이의 일치도를 계산하였다. AP_{Frere} 를 사용한

결과 작물 생산성 예측을 위한 조건에서 일치도가 높게 나타났다. AP_{Frere} 를 사용하였을 때 전역최적화를 통해 추정된 AP계수(AP_{max})를 사용하였을 경우 보다 일치도가 낮았으나 경험적으로 얻어진 계수(AP_{Choi})보다는 일치도가 높은 일사량 추정이 가능하였다. 전역최적화를 통해 일사량 추정치의 신뢰도를 분석한 결과, 신뢰도가 높은 일사량을 얻을 수 있는 AP계수의 범위는 년도별로는 좁게 분포하였으나 월별, 지역별로는 넓게 분포하였다. 그 중에서도 변이가 작은 범위는 지역별 일치도가 월별 일치도보다 넓게 분포하였다. AP_{Frere} 는 각각의 경우에 대해 일치도가 높고 변이가 작은 범위에 속해 국내 조건에서 AP_{Frere} 를 적용할 경우, 신뢰도 높은 일사량 추정치를 얻을 수 있을 것으로 예상되었다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ010115022016)의 지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, 1998: Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56. *FAO, Rome*, **300**(9), D05109.
- Almorox, J. Y., and C. Hontoria, 2004: Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain. *Energy Conversion and Management* **45**(9), 1529-1535.
- 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.
- Besharat, F., A. A. Dehghan, and A. R. Faghih, 2013: Empirical models for estimating global solar radiation: A review and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **21**, 798-821.
- Black, J. N., 1956: The distribution of solar radiation over the earth's surface. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B* **7**(2), 165-189.
- Brisson, N., C. Gary, E. Justes, R. Roche, B. Mary, D. Ripoche, D. Zimmer, J. Sierra, P. Bertuzzi, P. Burger, and F. Bussiere, 2003: An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy* **18**(3), 309-332.
- Chen, R., K. Ersi, J. Yang, S. Lu, and W. Zhao, 2004: Validation of five global radiation models with measured daily data in China. *Energy Conversion and*

- Management* **45**(11), 1759-1769.
- Chirico, N., and P. Gramatica, 2011: Real external predictivity of QSAR models: how to evaluate it? Comparison of different validation criteria and proposal of using the concordance correlation coefficient. *Journal of Chemical Information and Modeling* **51**(9), 2320-2335.
- Choi, M. H., and J. I. Yun, 2009: On recent variations in solar radiation and daily maximum temperature in summer. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **11**(4), 185-191. (in Korean with English abstract)
- Choi, M. H., J. I. Yun, U. R. 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)
- Frere, M., and G. F. Popov, 1979: *Agrometeorological Crop Monitoring and Forecasting*. FAO.
- Heinemann, A. B., P. A. van Oort, D. S. Fernandes, and A. D. H. N. Maia, 2012: Sensitivity of APSIM/ORYZA model due to estimation errors in solar radiation. *Bragantia* **71**(4), 572-582.
- Holzworth, D. P., V. Snow, S. Janssen, I. N. Athanasiadis, M. Donatelli, G. Hoogenboom, J. W. White, and P. Thorburn, 2015: Agricultural production systems modelling and software: current status and future prospects. *Environmental Modelling & Software* **72**, 276-286.
- Jo, D. K., C. Y. Yun, K. D. Kim, and Y. H. Kang, 2011: A study on the estimating solar radiation using hours of bright sunshine for the installation of photovoltaic system in Korea. *Journal of the Korean Solar Energy Society* **31**(4), 72-79. (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. Gijsman, and J. T. Ritchie, 2003: The DSSAT cropping system model. *European journal of agronomy* **18**(3), 235-265.
- Jong, R. D., and D. W. Stewart, 1993: Estimating global solar radiation from common meteorological observations in western Canada. *Canadian Journal of Plant Science* **73**(2), 509-518.
- Kim, K., H. Jeong, and J. Kim, 2013: Comparison of crop growth and evapotranspiration simulations between Noah Multi Physics model and CERES-Rice model. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, **15**(4), 282-290. (in Korean with English abstract)
- Kim, J., C.K. Lee, H. Kim, B.W. Lee, and K.S. Kim, 2015: Requirement Analysis of a System to Predict Crop Yield under Climate Change. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, **17**(1), 1-14. (in Korean with English abstract)
- Lee, C.K., J. Kim, and K.S. Kim, 2015: Development and application of a weather data service client for preparation of weather input files to a crop model. *Computers and Electronics in Agriculture*, **114**, 237-246. (in Korean with English abstract)
- Lin, L.I., 1989: A concordance correlation coefficient to evaluate reproducibility. *Biometrics*, **45**, 255-268.
- Lin, L.I., 2000: A note on the concordance correlation coefficient. *Biometrics*, **56**, 324-325
- Liu, X., X. Mei, Y. Li, Y. Zhang, Q. Wang, J.R. Jensen, and J.R. Porter, 2009: Calibration of the Ångström-Prescott coefficients (a, b) under different time scales and their impacts in estimating global solar radiation in the Yellow River basin. *Agricultural and forest meteorology*, **149**(3), 697-710.
- Masutomi, Y., K. Ono, T. Takimoto, M. Mano, A. Maruyama, and A. Miyata, 2016: A land surface model combined with a crop growth model for paddy rice (MATCRO-Rice Ver. 1)–Part II: Model validation.
- McBride, G.B., 2005: A proposal for strength-of-agreement criteria for Lin's concordance correlation coefficient. *NIWA Client Report: HAM2005-062*.
- Namrata, K., S.P. Sharma, and S.B.L. Seksen, 2015: Comparison of different models for estimation of diffuse solar radiation in Jharkhand (India) region. *Applied Solar Energy*, **51**(3), 219-224.
- Prescott, J.A., 1940: Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. *Transactions of the Royal Society of South Australia*, **64**(1), 114-118.
- Srivastava, R.C., and H. Pandey, 2013: Estimating Angstrom-Prescott coefficients for India and developing a correlation between sunshine hours and global solar radiation for India. *ISRN Renewable Energy*, 2013.
- Swartman, R.K., and O. Ogunlade, 1967: Solar radiation estimates from common parameters. *Solar energy*, **11**(3), 170-172.
- van Oort, P.A., M.E. de Vries, H. Yoshida, and K. Saito, 2015: Improved climate risk simulations for rice in arid environments. *PLoS one*, **10**(3), e0118114.
- Wilkerson, V.A., D.P. Casper, and D.R. Mertens, 1995: The prediction of methane production of Holstein cows by several equations. *Journal of Dairy Science*, **78**(11), 2402-2414.
- Wong, L.T. and W.K. Chow, 2001: Solar radiation model. *Applied Energy*, **69**(3), 191-224.

부 록

AP_{Frere} 와 AP_{Choi} 를 이용한 일사량 추정치를 비교하기 위해, CCC와 NRMSE (Normalized Root Mean Square Error)의 지역별 분포를 비교하였다 (Fig. A1). NRMSE는 다음과 같이 계산되었다.

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\max(OBS) - \min(OBS)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (SR - OBS)^2}$$

여기서 RMSE, OBS, SR, n은 각각 Root Mean Square Error, 일사량 측정 자료, AP_{Frere} 또는 AP_{Choi} 를 사용하였을 때의 일사량 추정값, 자료의 수이다. 대관령을 제외한 모든 지역에서, CCC_{Frere} 값이 CCC_{Choi} 값보다 큰 경향을 보였다. 또한, NRMSE의 값의 경우에도, AP_{Frere} 계수를 사용하여 예측된 일사량이 지역별로 예측된 계수를 사용한 경우보다 더 낮은 값을 가졌다.

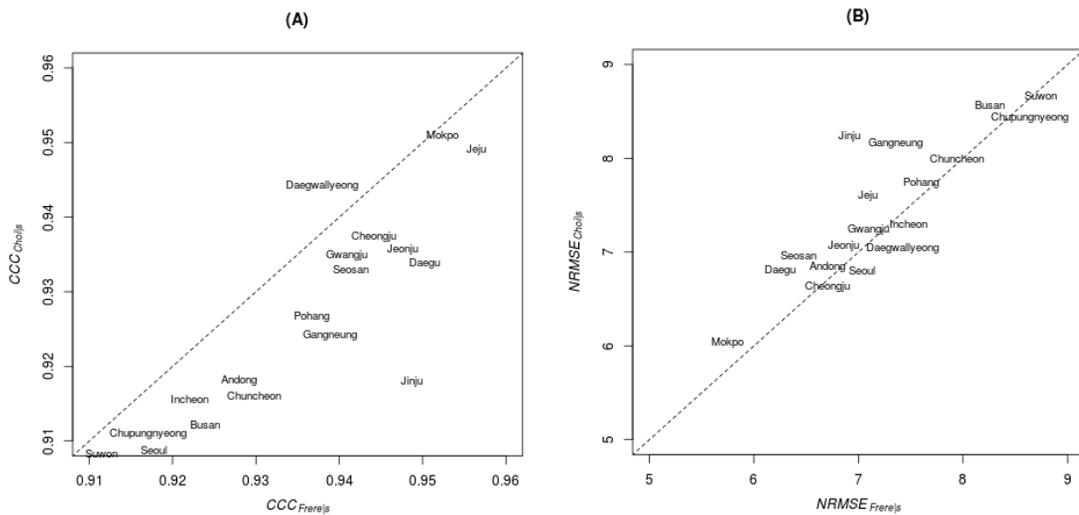


Fig. A1. Comparison of CCC (A) and NRMSE (B) between measured and estimated solar radiation using AP_{Frere} and AP_{Choi} .