

# 일조시간을 이용한 대구지방 광합성 광자선속밀도의 추정

서 계 홍

대구대학교 자연과학대학 생물학과

## Using Sunshine Duration to Estimate Photosynthetic Photon Flux Density at Taegu, Korea

Suh, KyeHong

Department of Biology, Taegu University

### ABSTRACT

The daily photosynthetic photon flux density incident on a horizontal surface was estimated with sunshine duration through daily global radiation at Taegu in Korea. The constant and coefficient of Ångstrom equation for global radiation were calculated as 0.1763 and 0.5012, respectively. The conversion factor from daily global radiation to daily photosynthetic photon flux density was determined as 2.2359.

**Key words:** Photosynthetic photon flux density, Sunshine duration

### 서 론

태양복사는 광합성과정을 통하여 식물의 생육에 중요한 역할을 한다. 광합성은 엽록소에 흡수된 가시광선에 의하여 진행되는 광화학 반응이므로 태양의 복사량은 광합성량의 추정에 필수적이다. 따라서 태양복사량은 BARCOS (de Wit *et al.* 1978, Goudriaan *et al.* 1984), FORGRO (Mohren *et al.* 1984), MAESTRO (Wang 1988), BIOMASS (McMurttrie *et al.* 1990a, b), FOREST-BGC (Running and Coughlan 1988), BLUEGRAMA (Detling *et al.* 1979) 등의 광합성 및 증발산량을 묘사하는 모델에서 초기 입력 자료가 되고 있다. 그런데 이들 모델을 특정 지역의 기상환경에 적용하려면 그 지역의 태양복사량에 관한 자료가 입력되어야 한다. 태양의 복사량은 여러 단위로 나타낼 수 있으나 400~700 nm 파장 범위의 광합성 광자선속밀도(Photosynthetic photon flux density, PPF)가 광합성률을 가장 잘 반영한다 (Jones 1992).

광합성 광자선속밀도에 관한 자료를 기상청의 기상자료로부터 얻을 수 있다면 시간 및 소요경

비의 면에서 가장 경제적인 것이다. 한국 기상청의 기상자료 중 광합성 광자선속밀도에 근사한 자료는 Eppley 일사계를 이용하여 나지의 수평면에 1일 동안 입사된 태양복사량인 수평면일사량으로, 전국 33개 측후소 및 38개 관측소 중 22개 측후소에서만 측정되고 있다 (기상청 1989). 그런데 Eppley 일사계는 400~3000 nm 파장 범위를 감지하므로 (Percy 1992), 수평면일사량은 400~700 nm 파장 범위의 광합성 광자선속밀도로 환산할 필요가 있다.

한편 수평면일사량이 측정되지 않는 지역에 대하여는 총 71개 지역의 측후소 및 관측소 모두에서 측정하고 있는 일조시간을 이용하여 수평면일사량의 추정이 가능하다. 잠재 수평면일사량 ( $I_0$ )에 대한 실제 수평면일사량( $I$ )의 비율과, 잠재 일조시간( $T_0$ )에 대한 실제 일조시간( $T$ )의 비율 사이에는 선형 관계가 있으며 이를 묘사한 수식을 Ångstrom equation이라 한다 (Jones 1992). 하지만 Ångstrom equation을 이용하려면 한국의 대기환경에서 측정된 자료로 식의 계수를 결정하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 이미 개발되었거나 차후 개발될 광합성 및 증발산에 관한 모델을 한국의 기상환경에 적용시킬 때에 초기 입력자료로 이용될 광합성 광자선속밀도를 한국의 일조시간 및 수평면일사량 자료로 추정하기 위하여 1) Ångstrom equation의 계수와 2) 수평면일사량과 광합성 광자선속밀도 사이의 환산계수를 결정하고자 한다.

## 방 법

### Ångstrom equation의 계수 결정

Ångstrom equation은 잠재 수평면일사량( $I_0$ )에 대한 실제 수평면일사량( $I$ )의 비율과, 잠재 일조시간( $T_0$ )에 대한 실제 일조시간( $T$ )의 비율 사이의 선형 관계를 나타내는 직선식이다 (식 1).

$$I/I_0 = a + b \times T/T_0 \dots\dots\dots \text{식 (1)}$$

이 직선식의 절편 (a)과 기울기 (b)의 결정에 필요한 실제 수평면일사량과 일조시간의 자료는 대구측후소(35°53'N, 128°37'E, 해발고도 57.8 m)에서 측정되어 1989년도 기상월보에 수록된 364일분의 자료를 이용하였다.

잠재 수평면일사량( $I_0$ )은 지구의 대기권 밖에 도달한 태양의 복사에너지가 대기에 의하여 감소되지 않고 모두 지표에 이룬다고 가정하였을 때 단위면적의 수평면에 하루동안 유입되는 복사에너지의 양으로 정의하였다. 지구의 대기권 밖에 유입되는 태양 복사에너지(C)의 평균값 값은  $1353 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ 이며 지구와 태양 사이의 거리에 따라 식 (2)와 같이 3.35%의 범위에서 변하는 것으로 알려져 있다 (Robinson 1966).

$$C = 1353 \{1 + 0.0335 \cos(2\pi/365 \cdot D)\} \dots\dots\dots \text{식 (2)}$$

여기서 D는 해당일의 연중 날짜수(Julian date)이다.

태양상수는 태양광의 진행방향에 수직인 단위면적에 1 초 동안 유입되는 복사에너지이므로 지역 및 시간에 따라 변하는 태양의 고도( $\alpha$ , 식 3)로 보정하면 (Anderson 1971), 수평면에 입사가능한 최대의 순간 복사에너지 ( $I_s, \text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ )는 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$\sin(\alpha) = \sin(\varphi)\sin(\sigma) + \cos(\varphi)\cos(\sigma)\cos\{2\pi(H-12)/24\} \dots\dots\dots \text{식 (3)}$$

$$I_s = C \cdot \sin(\alpha) \dots\dots\dots \text{식 (4)}$$

여기서  $\varphi$ 는 해당지역의 위도 (대구 35°53'), H는 해당 지역에 태양이 남중할 때를 12:00로 하는 지방시(local time, hour), 그리고  $\sigma$ 는 해당일 태양의 inclination (식 5)이다.

$$\sigma = -23.45\pi/180 \cos\{2\pi/365 \cdot (D+9)\} \dots\dots\dots \text{식 (5)}$$

잠재 일조시간( $T_0$ , hour)은 해당 일의 일출부터 일몰까지의 시간이다. 본 연구에서는 태양의 고도를 나타내는 식 (3)의 값을 영이 되게 하는 두 개의 시각을 각각 일출 및 일몰 시각으로 간주하였다 (식 6).

$$T_0 = 2 \arccos \{-\tan(\varphi) \tan(\sigma)\} \cdot 24/2\pi \dots\dots\dots \text{식 (6)}$$

식 (4)에 나타낸 순간 복사에너지( $I_s$ )는 단위면적의 수평면에 1 초 동안 유입되는 복사에너지의 양이므로 해당일 하루동안 유입가능한 총량인 잠재 수평면일사량( $I_0$ ,  $J \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}$ )은 식 (4)를 일출부터 일몰시까지 정적분한 식 (7)을 이용하여 계산하였다.

$$I_0 = \sin(\varphi) \cdot \sin(\sigma) \cdot T_0 + \cos(\varphi) \cdot \cos(\sigma) \cdot 24/\pi \cdot \sin(\pi \cdot T_0/12) \dots\dots\dots \text{식 (7)}$$

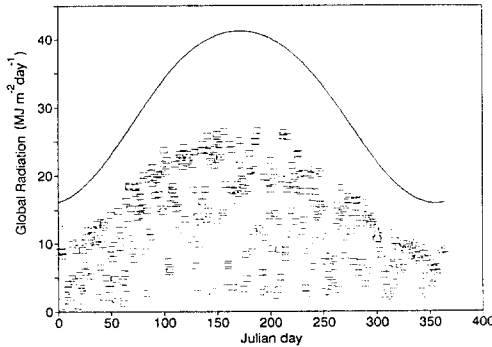
이상에서 기술한 방법에 따라 계산한 잠재 수평면일사량( $I_0$ ) 및 일조시간( $T_0$ )과 기상월보에 수록된 실제 수평면일사량(I) 및 일조시간(T)의 자료를 최소자승법으로 회귀분석하여 Ångström equation (식 1)의 계수를 결정하였다.

**일 광합성 광자선속밀도와 수평면일사량의 환산계수**

수평면에 조사되는 광합성 광자선속밀도와 수평면일사량은 각각 광합성 광자선속밀도 감지기 (quantum sensor, type QS, Delta-T Devices, U.K.) 및 태양 광에너지 감지기 (solar energy sensor, type ES, Delta-T Devices, U.K.)를 이용하여 측정하였다. 두 감지기는 경북 경산군 내리동 소재 대구대학교 경산 교정 (35°53'45" N, 128°50'56", 해발고도 70 m)에 수평으로 설치되었다. 1989년 중 지속적인 강우 및 강설, 결로 등의 측정 방해 요인이 작았던 156일 동안 일출시부터 일몰시까지 매 5분마다 측정된 각각의 값을 감지기에 연결된 자료기록기 (delta logger, Delta-T Devices, U.K.)에 일시 저장한 후 휴대용 컴퓨터로 전송받아 당일 조사된 총량으로 환산하였다. 환산된 매일의 수평면일사량 및 일 광합성 광자선속밀도 자료를 최소자승법에 따라 회귀분석하여 일 광합성 광자선속밀도와 수평면일사량의 환산계수를 결정하였다.

**결과 및 고찰**

기상청의 기상월보에 수록된 대구지방 1989년의 364일 중 수평면일사량의 최대 및 최소값은 각각 7월 7일의 26.61  $MJ \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}$  및 1월 7일의 0.72  $MJ \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}$ 이었다 (Fig. 1).



**Fig. 1.** Annual trends in the actual (empty square) and potential (solid line) global radiation incident on a horizontal surface at Taegu in Korea in 1989.

364일 동안 지상에 입사된 수평면일사량의 총합은 4,509.59 MJ/m<sup>2</sup>로서 같은 기간 중 잠재 수평면일사량 10,672.43 MJ/m<sup>2</sup>의 42.25%에 해당하였다. 1989년 수평면일사량의 일평균 값은 12.39 MJ·m<sup>-2</sup>·day<sup>-1</sup>이었다.

한편 동 기간 중 최대 일조시간은 6월 11일의 12.9 hr/day로 잠재일조시간 14.38 hr/day의 89.69%이었다. 잠재 일조시간에 대한 실제 일조시간의 비가 최대인 것은 1월 21일의 96.77%로 당일의 잠재 및 실제 일조시간은 각각 9.92 및 9.6 hr/day이었다. 364일 동안의 총일조시간은 2,115.5 hr이었으며 이는 같은 기간 중의 잠재 일조시간 4,365.67 hr의 48.46%에 해당하였

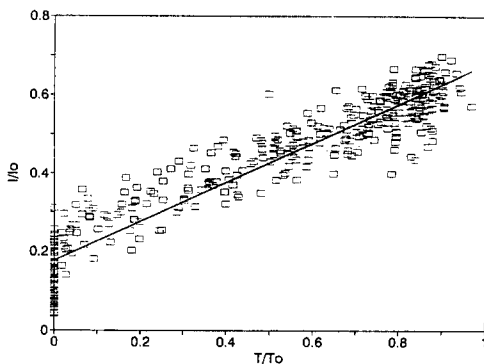
다. 1989년 일조시간의 일평균 값은 5.81 hr/day이었다.

잠재 일조시간에 대한 실제 일조시간의 비( $T/T_0$ )와, 잠재 수평면일사량에 대한 실제 수평면일사량의 비 ( $I/I_0$ ) 사이의 관계를 나타내는 Ångstrom equation은  $I/I_0 = 0.1763 + 0.5012 \times T/T_0$  ( $r^2=0.8908$ ,  $n=364$ )로 결정되었다 (Fig. 2). 이 직선식의 상수(0.1763) 및 계수(0.5012)는 이미 보고된 영국 중부 지방의 0.24 및 0.525보다는 작은 값이었다 (Thompson *et al.* 1982).

수평면일사량( $I$ , MJ·m<sup>-2</sup>·day<sup>-1</sup>)과 일 광합성 광자선속밀도(PPFD<sub>d</sub>, mol·m<sup>-2</sup>·day<sup>-1</sup>) 사이에는  $PPFD_d = 2.2359 \times I$  ( $r^2=0.9948$ ,  $n=156$ )의 관계가 있었다 (Fig. 3).

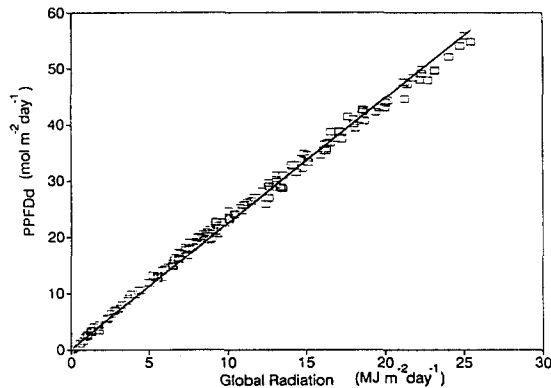
따라서 수평면일사량이 측정되고 있는 지역에 대하여는 해당 지역의 수평면일사량 자료에 환산계수 2.2359를 곱하면 일 광합성 광자선속밀도로 환산할 수 있다. 한편 수평면일사량이 측정되지 않는 지역에 대하여는 우선 해당 지역의 일조시간을 Ångstrom equation에 대입하여 수평면일사량을 추정하고 이 값에 환산계수 2.2359를 곱하면 일 광합성 광자선속밀도 값을 얻을 수 있게 된다.

한편 해당 일의 기상상태에 의하여 태양의 복사에너지가 감소된 비율( $I/I_0$ )을 광합성 광자선속밀도로 환산된 순간 복사에너지 (식 4)에 곱하면 나지의 수평면에 실제 입사되는 순간 광합성 광자선속밀도 (PPFD<sub>s</sub>, mol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)도 추산할 수 있다 (식 8).



**Fig. 2.** The relationship between the ratio of actual global radiation ( $I$ ) to potential global radiation ( $I_0$ ) and that of actual sunshine duration ( $T_0$ ) to potential sunshine duration ( $T_0$ ).  $I/I_0 = 0.1763 + 0.5012 \times T/T_0$  ( $r^2=0.8908$ ,  $n=364$ )

$$PPFD_s = I/I_0 \cdot 2.2359 \cdot C \cdot \sin(\alpha) \dots \dots \dots \text{식 (8)}$$



**Fig. 3.** The relationship between global radiation ( $I$ ) and daily photosynthetic photon flux density ( $PPFD_d$ ).  $PPFD_d = 2.2359 \times I$  ( $r^2=0.9948$ ,  $n=156$ )

여기서 환산계수 2.2359는 야외의 태양광에 대한 측정자료를 이용하여 결정된 것이므로 파장별 에너지분포 양상이 태양광과 크게 다른 대부분의 인공광원에 대하여 이 계수를 적용할 때에는 주의가 요구된다.

## 적 요

한국의 기상환경에서 나지의 수평면에 1일 동안 입사되는 광합성 광자선속밀도의 추정을 위하여 일조시간을 수평면일사량으로, 그리고 수평면일사량을 광합성 광자선속밀도로 환산하는 관계식의 계수를 결정하였다. 일조시간 및 수평면일사량의 기상청 자료를 최소자승법에 따라 분석한 결과 Ångström equation은  $I/I_0 = 0.1763 + 0.5012 \times T/T_0$ 에 회귀되었으며, 수평면일사량을 광합성 광자선속밀도로 전환하는 계수는 2.2359로 결정되었다.

## 인용 문헌

기상청. 1989. 기상월보

Anderson, M.C. 1971. Radiation and crop structure. In Z. Sestak, J. Catsky and P.G. Jarvis (eds.), Plant Photosynthetic Production: Manual and Methods. Dr W. Junk N. V. Publishers, The Hague. pp.412-466.

De Wit, C.T., J. Goudriaan, H.H. Van Laar, F.W.T. Penning de Vries, R. Rabbingge and H. van Keulen. 1978. Simulation of Assimilation, Respiration and Transpiration of Crops. PUDOC, Wageningen, The Netherlands.

Detling, J.K., W.J. Parton and H.W. Hunt. 1979. A simulated model of *Bouteloua gracilis* biomass dynamics on the North American shortgrass prairie. *Oecologia* 38:167-191.

Goudriaan, J., H.H. van Laar, H. van Keulen and W. Louwerse. 1984. Simulation of the effect of increased atmospheric  $CO_2$  on assimilation and transpiration of a closed crop canopy. *Wissenschaftliche Zeitschrift der Humboldt Universität zu Berlin, Mathe-*

- matisch-Naturwissenschaftliche Reihe XXXII. pp.352-356.
- Jones, H.J. 1992. Plant and Microclimate. Cambridge University Press, Cambridge. 428p.
- McMurtrie, R.E., D.A. Rook and F.M. Kelliher. 1990a. Modelling the yield of *Pinus radiata* on a site limited by water and nitrogen. Forest Ecology and Management 30:381-413.
- McMurtrie, R.E., M.L. Benson, S.W. Running, T. Talsma, W.J.B. Crane and B.J. Myers. 1990b. Water /nutrient interactions affecting productivity of stands of *Pinus radiata*. Forest Ecology and Management 30:415-423.
- Mohren, G.M.J., C.P. Van Gerwen and C.J.T. Spitters. 1984. Simulation of primary production in even-aged stands of Douglas-fir. Forest Ecology and Management 9:27-49.
- Pearcy, R.W. 1989. Radiation and light measurements. In R.W. Pearcy, J. Ehleringer, H. A. Mooney and P.W. Rundel (eds.), Plant Physiological Ecology. Chapman and Hall Ltd., London. pp.97-116.
- Robinson, N. 1966. Solar Radiation. Elsevier, New York. 339p.
- Running, S.W. and J.C. Coughlan. 1988. A general model of forest ecosystem processes for regional applications. I. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes. Ecological Modelling 42:125-154.
- Thompson, N., J.A. Barrie and M. Ayles. 1982. The Meteorological Office Rainfall and Evaporation Calculation System: MORECS (July 1981). Hydrological Memorandum 45, Meteorological Office. Bracknell: Meteorological Office. Great Britain.
- Wang, Y.P. 1988. Crown Structure, Radiation Absorption, Photosynthesis and Transpiration. Dissertation. University of Edinburgh. Edinburgh.

(1995년 12월 15일 접수)