韓作誌(Korean J. Crop Sci.) 36(3) : 204~208(1991)

綜觀氣象資料에 의한 純輻射量 推定

李泌雨* · 金柄瓚** · 明乙在*

Estimation of Daily Net Radiation from Synoptic Meteorological Data

Byun Woo Lee*, Byung Chan Kim** and Eul Jae Myung*

ABSTRACT : Five models for net radiation estimation reported by Linacre(1968), Berljand(1956), Nakayama et al.(1983), Chang(1970) and Doorenbos et al.(1977) were tested for the adaptability to Korea. A new model with effective longwave radiation term parameterized by air temperature, solar radiation and vapor pressure was formulated and tested for its accuracy. Above five models with original parameter values showed large absolute mean deviations ranging from 0.86 to 1.64 MJ/m²/day. The parameters of the above five models were reestimated by using net radiation and meteorological elements measured in Suwon, Korea. These five models with new parameter values showed absolute mean deviations ranging from 0.74 to 0.88 MJ/m²/day. The following model was newly formulated ;

$$Rn=(1-\alpha)Rs-\sigma T_k^4(0.0103\ Exp(0.0731\ Rs)-0.0475\sqrt{e_a}+0.2478)$$
$$(R^2=0.997,\ n=63)$$

where α=albedo, σ=Stefan-Boltzmann constant, Rs=solar radiation in MJ/m²/day, T_k=air temperature in Kelvin and e_a=vapor pressure in mb. This model revealed 0.4988 MJ/m²/day in absolute mean deviation when applied to an independent set of meteorological data.

純輻射量은 基準 表面에 입사한 全短波輻射量에서 短波反射量과, 表面의 長波輻射量과 大氣長波輻射量의 差 즉 有效長波輻射를 뺀 것으로서 基準表面에서의 可用輻射에너지를 나타내는 것이다. 순복사량은 경지의 증발산, 지표부근의 기온, 토양의 온도, 植物群落의 微氣候 등을 지배하는 중요한 요인이다. 따라서 이들의 추정에는 純輻射量에 대한 정확한 측정자료가 우선적으로 필요하다.

그런데 純輻射量을 계속적으로 관측하는 데는 측기의 설치 및 관리에 많은 비용이 소요될 뿐만 아니라 관측의 정확도를 계속 유지하는데 어려움이 있으므로 기상요소들로부터 純輻射量을 추정하기 위한 모델들이 많은 연구자들에 의하여 보고되어 왔다. 이들 모델 중에는 일사량과의 단순회귀모델에 의한 것이 많으며(Rosenberg, 1983), 일부는 輻射收支式을 기본으로 하여 각 복사수지항을 기상변수들로 매개변수화하여 조합구성한 모델들도 다수 보고되어 있다(Linacre, 1968 ; 中山 等, 1983 ; Chang, 1970 ; Doorenbos et al, 1977). 이들 모델들에 의하여 추정된 純輻射量은 계절, 장소에 따라서 精度가 다르다는 것이 지적되고 있다(朱超 等, 1987). 그러나 우리나라에서는 純輻射量의 추정에 관한 연구는 전무한 실정으로 이들 모델의 적용성에 대한 검토가 이루어져 있지 못하다.

따라서 본 연구는 기존에 보고된 5개의 모델을 선정하여 이들 모델의 純輻射量 推定 精度를 수

* 서울大學校 農科大學 (College of Agriculture, Seoul National Univ., Suwon 441-744, Korea)
** 氣象廳 水原側候所 (Suwon Weather Forecasting Office, Korea Meteorological Administration, Suwon 441-100, Korea)

〈'91. 3. 15 接受〉

원에서의 실측치를 이용하여 검토하였으며 또한 일사량, 기온, 증기압을 변수로 한 日間 純輻射量 추정모델을 작성하여 기존의 모델들과 추정정도를 비교 검토하였다.

材料 및 方法

純輻射量은 BEARN System(Bilan D'Energie Automatique Regional Numerique, INRA, France)에 부속되어 있는 純輻射計(Crouzet type, 測定 波長帶 ; 300-50, 000nm, dome 內部通風)을 지상 2m에 설치하여 측정하였다. 1987년에는 6월 11일부터 9월 20일까지 기상청 수원측후소 수도포장(품종, 서광)에서 관측하였으며 1988년에는 8월 19일부터 10월 11일까지 동 측후소의 잔디露場에서 측정하였다. 수도포장은 50 m×40m, 노장은 35m×30m 정도이며 그림자나 반사에 의해서 측정에 지장을 줄 만한 장애물은 없었다. 수도포장의 albedo는 管型日射計(英弘精密 MS 33)를 지상 1.5m에 거꾸로 설치하여 측정하였다. 일사량, 온도, 증기압, 일조시간, 운량 등은 동 측후소의 종관기상관측자료를 이용하였다. 한편 일사량은 새로 구입한 英弘日射計(MS 60)로 일정기간 동일한 위치에서 관측하여 수원측후소의 일사관측자료와 비교하고 수원측후소 일사계를 感度補正하여 이용하였다. 加照時間(N)과 24시간 대기권외 일사량(Ro)은 Iqbal[4]에 따라 다음과 같이 계산하여 이용하였다.

$$N = 2/15 \cos^{-1}(-\tan\Phi \tan\delta)$$

여기서 Φ는 緯度이며, δ는 태양赤緯로서 $\delta = 23.45\sin[360(JD+284)/365]$ (JD=Julian day)에 의하여 계산하였다.

$$Ro = (24/\pi)\ Isc\ Eo \cos\Phi \cos\delta [\sin\omega_s - (\pi/180)\omega_s \cos\omega_s]$$

여기서 Isc는 태양상수(4.921MJ/m²/hr), ω_s는 日南中時刻으로부터 일출, 일몰시까지의 時角(hour angle)이며 Eo는 離心率補正項(Eccentricity correction factor)으로서 다음과 같이 구하였다.

$$Eo = 1 + 0.033\cos(2\pi JD/365)$$

본 연구에서 검토된 純輻射量 추정모델은 표 1에서와 같은 5개의 모델이었다. 이들 모델에 상기의 기상자료들을 대입하여 1988년 8월 11일~8월 15일까지의 純輻射量을 추정하여 실측된 純輻射量과 비교하였으며, 또한 同 자료들을 이용하여 각 모델의 parameter들을 새로 추정하여 이들의 적용성들을 독립자료(수도포장 1987년 8월 15일~9월 20일, 노장잔디밭 1988년 8월 19일~10월

Table 1. Models for net radiation estimation adopted for the current study.

Model	Equation	Reference
Model 1	$Rn = (1-\alpha)Rs - 0.0959(0.2+0.8\ n/N)(100-T_a)$	Linacre(1968)
Model 2	$Rn = (1-\alpha)Rs - \sigma T_k^4\ (0.39-0.058\sqrt{e_a})(1-0.63\ C^2)$	Berljand(羽生 等, 1978)
Model 3	$Rn = (1-\alpha)Rs - \sigma T_k^4[(286.18+202.60\ Rs/Ro) - (45.24+10.92\ Rs/Ro)\sqrt{e_a}]$	Chang(1970)
Model 4	$Rn = (1-\alpha)Rs - 60.293\ (0.246-0.158\times10^{-10}\ T_k^4)$	中山 等(1983)
Model 5	$Rn = (1-\alpha)Rs - \sigma T_k^4)(0.1+0.9\ n/N)(0.56-0.079\sqrt{e_a})$	Doorenbos et al (1977)

NOTE ; Rn : Net radiation(MJ/m²/day)
Rs : Global solar radiation(MJ/m²/day)
n : Sunshine duration(hr/day)
N : Possible sunshine duration(hr/day)
Ta : Daily mean air temperature(℃)
T_k : Absolute daily mean air temperature(°K)
e_a : Daily mean vapor pressure(mb)
α : Albedo
σ : Stefan-Boltzmann constant(4.8995×10^{-9}MJ/m²/day/K⁴)
C : Cloud cover(0.0~1.0)
Ro : Extraterrestrial radiation(MJ/m²/day)

11일 純輻射量관측자료)를 이용하여 검토하였다.

結果 및 考察

1. 旣存 모델들의 推定精度

표 1에 나타나 있는 5개 모델의 계수를 그대로 적용하여 추정한 純輻射量과 수원의 기상자료와 실측 純輻射量을 이용하여 계수만을 다시 추정한 모델들(표 2)로부터 추정한 純輻射量 및 실측 純輻射量(1987년 6월 11~8월 15일 수도포장)과의 평균편차와 상대평균편차를 나타낸 것이 표 3이다. 표 3에서 보는 바와 같이 이들 모델들을 변형하지 않고 그대로 이용하였을 경우 실측치와의 평균편차는 모델에 따라 0.86~1.64MJ/m²/day였으며 상대평균편차로는 8.75~16.6%로서 추정의 정확도가 낮아 이들 모델을 변형없이 그대로 이용하는 데는 문제점이 있는 것으로 판단되었다. 한편 수원측후소 수도포장에서 1987년 6월 11일~8월 15일까지 관측한 純輻射量과 그외의 기상요소들을 적용하여 표 1의 5개 모델의 계수만을 다시 추정한 것이 표 2이다. 이들 모델들의 R^2는 0.992~0.997로 결정계수가 매우 높았으며 평균편차와 상대평균편차(표 3)는 각각 0.514~0.758MJ/m²/day 및 5.2~7.7%범위로서 원래의 모델 추정정도보다 높았다. 그런데 이들 모델들을 실제에 적용하기 위해서는 모델의 계수 추정에 이용되지 않은 독립자료를 이용하여 추정정도가 검토되어야 한다. 1987년 8월 16일부터 9월 20일까지 수도포장에서 관측된 純輻射量자료 및 잔디노장에서 1988년 8월 19일부터 10월 11일까지 관측된 純輻射量자료와 同 기간 중의 추정 純輻射量과의 평균편차와 상대평균편차를 표 4에 나타내었다. 계수를 수정한 모델들의 평균편차는 0.74~0.882MJ/m²/day이며 상대평균편차는 7.99~9.52%로서 계수를 다시 추정하기전의 원래 모델이 나타내는 오차(표 3)보다는 작았으나 비교적 큰 오차를 나타내었다.

Table 3. Absolute mean deviation(MD, MJ/m²/day), and relative mean deviation (RMD, %) of original(Org ; Table 1.) and modified (Mod ; Table 2.) models.

Model	MD		RMD	
	Org.	Mod.	Org.	Mod.
Model 1	1.576	0.758	16.04	7.7
Model 2	0.860	0.562	8.75	5.7
Model 3	1.206	0.514	12.28	5.2
Model 4	1.636	0.757	16.64	7.7
Model 5	1.324	0.571	13.48	5.8

NOTE ; $MD=\Sigma \mid R_{n\ obs}-R_{n\ est} \mid /N$
$RMD=(MD / \overline{R_{n\ est}}) * 100$

Table 4. Mean deviation(MD, MJ/m²/day) and relative mean deviation(RMD, %) of the models when applied to the data independent of those used in the parameter estimation.

Model	MD	RMD
Model 1	0.7804	7.99
Model 2	0.8821	9.52
Model 3	0.7851	8.47
Model 4	0.7425	8.01
Model 5	0.8146	8.79

* Models are the same as in table 2.

2. 純輻射量 推定 모델의 作成 및 檢證

純輻射量은 일반적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Rn=(1-\alpha)Rs-Rnl$$

여기서는 α는 albedo, Rs는 태양복사, Rnl은 유효장파복사로서 지표에서 나가는 장파복사(Rnl↑)와 지표로 들어오는 장파복사(Rnl↓)의 差,

Table 2. Models (shown in Table 1) with reestimated parameters in Suwon.

Model	Modified equation	R^2
Model 1	$Rn=(1-\alpha)Rs-0.959(0.14+0.42\ n/N)(100-T_a)$	0.992
Model 2	$Rn=(1-\alpha)Rs-\sigma T_k^4\ (0.45-0.078\sqrt{e_a})(1-0.547\ C^2)$	0.996
Model 3	$Rn=(1-\alpha)Rs-\sigma T_k^4\ [(179.07+613.19\ Rs/Ro)-(32.14+98.73\ Rs/Ro)\sqrt{e_a}]$	0.997
Model 4	$Rn=(1-\alpha)Rs-60.293\ (0.246-0.158\times10^{-10}\ T_k^4)(0.135+0.413\ n/N)$	0.992
Model 5	$Rn=(1-\alpha)Rs-\sigma T_k^4\ (0.65+0.90\ n/N)(0.302-0.0517\sqrt{e_a})$	0.996

* Symbols are the same as in Table 1.

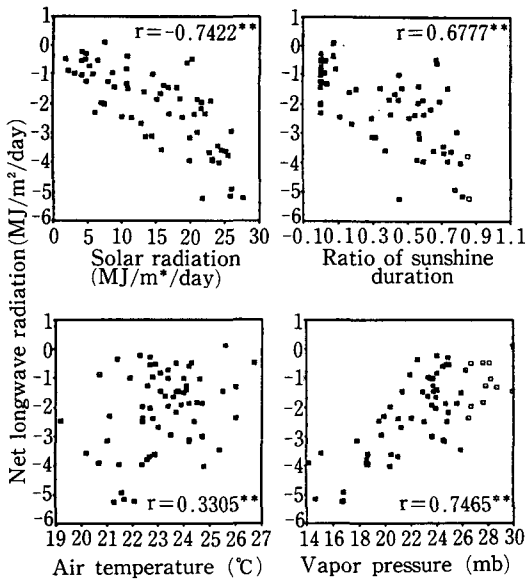

Fig 1. Relationship between daily effective longwave radiation and several meteorological elements.

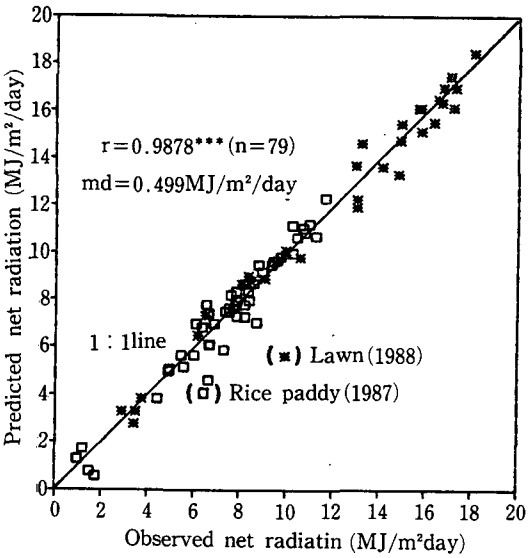

Fig. 2. Observed vs predicted net radiation by the model formulated in the current study.

즉 $Rnl = Rnl\downarrow - Rnl\uparrow$ 이다.

유효장파복사는 표면의 온도, 대기중의 수증기, 운량, 일조시간 등에 따라서 달라지므로 대부분의 순복사 추정 모델에서 Rnl을 대기온도, 수증기압, 운량, 일조율, 일사율 중에서 일부요소를 媒介變數로 하여 표현하고 있다(Linacre, 1968 ; Chang, 1970 ; 中山 等, 1983 ; Doorenbos et al. 1977).

그림 1은 1987년 6월 11에서 8월 15일까지 수도포장에서 측정한 유효장파복사 {$Rnl=(1-\alpha)Rs-Rn$}와 일사량, 일조율, 기온, 증기압과의 관계를 나타낸 것이다. Rnl은 일사량 및 일조율과는 고도로 유의한 負의 相關이 인정되었으며 기온 및 증기압과는 고도로 유의한 正의 相關이 인정되었다. 그런데 이들 기상요소는 모두 Rnl과 직선적인 관계보다는 곡선적인 관계가 있는 것으로 보이며, Rnl과 일사량(Rs)은 $Rnl=-0.2005\ Exp(0.1103\ Rs)-0.6875$ ($R^2=0.884$, n=63), Rnl과 일조율(RSD)사이에는 $Rnl=-Exp(0.243-1.378\ RSD)+0.1627$ ($R^2=0.846$, n=63), Rnl과 증기압(e_a)사이에는 $Rnl=-14.494+2.591\sqrt{e_a}$ ($R^2=0.862$, n=63)의 식으로 표현할 수 있었다. 그런데 Rs와 RSD사이에는 매우 높은 상관관계가 있으므로 이들 중 R^2값이 높은 Rs만을 추정식에 도입하여 다음과 같이 model을 구성하였다. 즉,

$$Rn=(1-\alpha)Rs-\sigma T_k^4\{\ a\ Exp(bRs)\ -c\sqrt{e_a}+d\}$$

위의 model의 a, b, c, d는 각 변수들의 계수로서 SAS(Statistical Analysis System)의 Proc NLIN의 Marquardt method를 이용하여 추정하였다. 계수의 추정에는 수도포장에서 1987년 6월 11일~8월 15일까지 측정한 純輻射量, albedo 및 동 기간의 노장 관측자료를 이용하였다. 변수의 계수들은 a=0.01028, b=0.0731, c=0.0475, d=0.2478로 추정되었으며 이 모델의 결정계수(R^2)는 0.997 이었다. 한편 이 모델의 적용성을 검토하기 위하여 앞에서와 같이 모델의 계수추정에 이용되지 않았던 1987년 8월 16일~9월 20일까지는 수도포장에서, 1988년 8월 19일~10월 11일까지 잔디노장에서 측정된 純輻射量과 추정 순복사량을 비교하였다(그림 2). 실측 복사량과 추정복사량과는 r=0.9878의 매우 높은 상관을 보였으며 평균편차는 0.4988MJ/m²/day, 상대평균편차는 5.38%로서 기존의 모델 및 parameter를 재추정한 이들 모델의 오차에 비하여 크게 낮은 것으로 나타났다. 그런데 이 추정 모델의 작성 및 검증에 이용된 자료는 6월에서 10월사이에 관측된 것으로서 이 기간 동안에 대해서는 재검증을 하지

않더라도 실제 적용이 가능 할 것으로 판단되나 그 외의 달에 대해서는 모델의 검증이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

摘 要

Linacre(1968), Berljand(1956), 中山 等(1983), Chang(1970), Doorenbos et al.(1977) 등이 보고한 5개의 純輻射量추정 모델로 추정한 純輻射量과 실측한 純輻射量을 비교하여 이들 모델에 대한 우리나라에서의 적용성을 검토하였으며, 또한 日射量, 氣溫, 蒸氣壓을 매개변수로하는 純輻射量 추정모델을 작성하여 추정정도를 검증하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 상기의 5개 모델의 parameter값을 그대로 이용하여 추정한 純輻射量은 평균편차로 0.86~1.64MJ/m²/day, 상대평균편차로 8.75~16.64%의 큰 추정오차를 나타내었다.

2. 실측 純輻射量과 기상요소들을 이용하여 이들 모델의 계수를 재추정하여, 계수추정에 이용하지 않은 독립자료를 이용하여 검증한 결과 평균편차로 0.74~0.88MJ/m²/day, 상대평균편차로 7.99~9.52%의 오차를 나타내었다.

3. 일사량(Rs), 알베도(α), 기온(T_k), 증기압(e_a)를 매개변수로 하는 다음과 같은 純輻射量 추정모델을 작성하였다.

$$Rn=(1-\alpha)Rs-\sigma T_k^4\{0.0103\,Exp(0.0731\ Rs)-0.0475\ \sqrt{e_a}+0.2478\}$$
$$(R^2=0.997,\ n=63)$$

4. 이 모델을 독립자료를 이용하여 검증한 결과 이 모델은 평균편차로 0.4988MJ/m²/day, 상대평균편차로 5.38%의 오차를 나타내어, 상기의 기존모델중 가장 추정정도가 높았던 中山 等(1983)의 평균편차 0.7425 MJ/m²/day, 상대평균편차 8.01%보다 추정오차가 적었다.

引 用 文 獻

1. Chang, Jen-Hu, 1970. Global distribution of net radiation according to a new formula. Ann. Assn. Amer. Geogr. 60 : 340-351.
2. Doorenbos, J. and W.O., Pruitt, 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 24, FAO, Rome, Italy.
3. 羽生壽郎・中川行夫・山本良三・坂上務・矢吹萬水・堂腰純, 1978. 農業氣象學. 文永黨 : 13-16.
4. Iqbal, M, 1983. An Introduction to Solar Radiation. Academic Press. 390P.
5. Linacre, E. T., 1968. Estimating the net radiation flux. Agr. Meteor. 5 : 49-63.
6. 中山敬一・羽生壽郎・金 久, 1983. 日射量による純放射量の推定. 農業氣象 38(4) : 415-418.
7. Rosenberg, N. J., B. L. Blad and S. B. Verma, 1983. Microclimate, The biological environment. 2nd edition, John wiley & Sons : pp42-59.
8. 朱超群・鳥谷均・古藤田一雄・吉野正敏, 1987. 正味放射量の季節變化とその推定. 農業氣象 43(1) : 45-51.