Short communication

<https://doi.org/10.7745/KJSSF.2019.52.3.178>

pISSN : 0367-6315 eISSN : 2288-2162

Feasibility of Evaluation Methods for Reference Evapotranspiration in Plastic House

Hee-Rae Cho, Kang-Ho Jung^{1*}, and Seung-Oh Hur²

Soil & Fertilizer Division, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Korea

¹Planning & Coordination Division, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Korea²Climate change & Agroecology Division, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Korea

*Corresponding author: stealea@korea.kr

ABSTRACT

Received: May 27, 2019

Revised: June 25, 2019

Accepted: July 2, 2019

Irrigation demands (ID) of crops were, traditionally, determined with weather condition and crop characteristics estimated by reference evapotranspiration (ET_0) and crop coefficients (K_c), respectively. In plastic house, the cultivation condition related to water consumption should be considered at establishing irrigation requirement. We assumed two scenarios to reflect cultivation condition on irrigation demands (ID): i) $ID = ET_0 \times K_{cp}$ and ii) $ID = ET_{op} \times K_{cp}$ when ET_{op} and K_{cp} indicate ET_0 measured in plastic house (PH) and K_c for crops cultivated in pH, respectively. The former evaluates ID based on ET_0 in open field (OF) and the latter does ID with ET_0 in pH. The ET_0 was estimated by water balance (WB) equation using lysimeter and FAO Penman-Monteith (FAO PM) equation during Jun. 16th to Oct. 31th. The FAO PM method was found to describe well ET_0 in OF during Jun. to Sept., but to overestimate in OF & PH during Oct. because of low temperature for grass growth in Korea. The value of solar radiation and ET_0 calculated by FAO PM were high correlation between OF and PH during Jun. to Sept., but different with period, Jun. 16-Jul. 11(1st) and Aug. 22-Sept. 30(2nd). The values of solar radiation were similar during 1st, but lower 35% in PH than OF during 2nd period, on average. The ET_0 was lower 18% in PH than OF during 1st (3.15 mm day⁻¹ in OF, 2.55 mm day⁻¹ in PH) and lower 46% in PH than OF during 2nd period, on average (3.66 mm day⁻¹ in OF, 2.00 mm day⁻¹ in PH). It resulted from reduced solar radiation intercepted by plastic film. Based on the results, we concluded that FAO PM eq. was recommendable in calculating ET_0 and calculation of ID based on i) ET_0 was more acceptable than using ii) ET_{op} . Furthermore, establishing K_{cp} pairing ET_0 would be the next step to complement evaluating ID in pH.

Keywords: FAO Penman-Monteith equation, Irrigation, Plastic house, Reference evapotranspiration, Solar radiation

(a) Jun. 16 - Jul. 11

(b) Aug. 22 - Sept. 30

Correlation of reference evapotranspiration (ET_0) between open field (OF) and plastic house (PH) during (a) June 16 to July 11 and (b) August 22 to September 30.

[†]Correlation coefficient (r) was determined by Pearson correlation analysis ($p < 0.001$).

Introduction

시설재배 농업은 2017년 기준 전체 농가의 약 9%, 전체 농경지 면적의 5%이나 소득은 전체의 62%로 면적 및 농가 수 대비 농가경영의 상당한 규모를 이룬다 (<http://kosis.kr>). 시설재배 규모에 부합한 생산 시스템을 이루기 위해서는 시설작물 재배에 대한 물관리 정보구축이 필요하다. 작물 관개량은 기준증발산량과 작물계수의 곱으로 구하며, 기준증발산량 산정식들 중 FAO Penman-Monteith (FAO PM) 식 (Allen et al., 1998)은 전 세계적으로 다양한 기후조건 (Walter et al., 2000; Droogers and Allen, 2002; Lage et al., 2003; Fontenot, 2004)에서 적합한 방법으로 평가된다. FAO PM 식은 일사량, 기온, 습도, 풍속 등 기상요소를 인자로 하며, 이 중 일사량 데이터가 가장 영향을 끼친다 (Allen et al., 1998). 국내에서는 노지 22개 작물, 33개 작형에 대해 작물계수, 관개시기, 1회 관개량 등 물관리 정보가 구축되었다 (Eom et al., 1999). 시설재배지의 작물 관개량 연구에서는 오이, 상추 등에 대한 물 소모량 실측 연구 (Nam et al., 1997), 환경요인과 오이 증발산량 간에 회귀식 추정 연구 (Heo, 1997) 등이 있었으나 이는 실험조건에서의 관개량 산정에 국한된다. 시설재배지 관개에서는 온실 환경에 대한 고려가 필요하다. Lee and Oh (2001)는 시설재배지내 기상인자를 고려하여 다중회귀분석으로 기준증발산량 산정 모형을 개발하였다. 이 모형을 적용하기 위해서는 다양한 형태 및 구역의 온실에서의 내부 기상 측정이 필요하기 때문에 범용적으로 시설재배 내 기준증발산량을 산정하는 데에는 한계가 있다. 본 연구에서는 시설재배지의 작물 관개량 (Irrigation Demands, ID) 설정 방법으로 다음의 가정을 세워 가장 적합한 기준증발산량 산정 방법을 찾고자 하였다.

- (1) $ID = ET_0$ (노지에서 평가한 기준증발산량) $\times K_{cp}$ (시설재배지에서의 작물계수),
- (2) $ID = ET_{op}$ (시설재배지에서 평가한 기준증발산량) $\times K_{cp}$ (시설재배지에서의 작물계수)

이를 위해 기준증발산량 산정방법 및 노지-시설재배지 간 기준증발산량을 비교하였다.

Materials and Methods

연구대상 지역 및 토양특성 본 연구에서는 경기도 수원시 권선구 서둔동 (E 37° 26' 28" 95, N 126° 98' 75" 588)에 위치한 구 국립농업과학원 시험포장 내 노지 라이시미터 (가로*세로*높이 : 2*2*2 m)와 비닐하우스를 연구 대상으로 선정하였으며, 토양은 사양질이었다.

기준증발산량 산정 기준증발산량은 물수지식 (water balance)과 FAO Penman-Monteith (FAO PM) 식 (Allen et al., 1998)을 이용하였으며, 식은 아래와 같다.

$$ET = I + P - R - D + \Delta\theta \quad (\text{Eq. 1})$$

ET : 증발산량 (mm), I : 관개량 (mm), P : 강우량 (mm), R : 유거수량 (mm), D : 배수량 (mm),
 $\Delta\theta$: 일간 토양수분함량 변화 (mm)

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + r \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (\text{Eq. 2})$$

ET_0 : 기준증발산량 (mm day^{-1}), R_n : 순복사량 ($\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$),

G : 지중열류 ($\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$), T : 일평균기온 ($^{\circ}\text{C}$), u_2 : 풍속 (m s^{-1}),

e_s : 포화증기압 (kPa), e_a : 실증기압 (kPa),

Δ : 기온에 따른 포화수증기압 기울기 ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$), γ : 건습계 상수 ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

하우스 내 기상측정장비를 설치하여 온도, 습도, 풍속, 일사량 등을 측정하고, 수원 농업기상대의 자료를 이용하였다. 기준증발산량 산정을 위해 잔디를 식재하였으며, 수분 스트레스를 받지 않는 충분한 토양수분 조건을 유지하기 위해 노지와 비닐하우스 모두 수분장력 33 kPa 이내에서 관개를 실시하였다. 토양수분함량 측정은 주파수권역 반사 방식 (FDR, Frequency Domain Reflectometry) 센서 (Enviroscan, Sentek, Australia)를 이용하였고, 1 m 깊이에 대해서 일별 토양수분 감소량을 산정하였다. 노지에서는 6월 중순부터 10월 말까지 강우량, 관개량, 배수량을 측정하고 기준증발산량을 산정하였다. 시험포장은 평지로 유거수량을 0으로 가정하였고, 비닐하우스에서는 강우와 배수를 0으로 가정하였다. 비닐하우스에서는 고온으로 잔디 생육이 어려운 7월 중순에서 8월 하순 한 달을 제외한 6월 16일 - 7월 11일, 8월 22일 - 10월 31일 기간 동안 관개량 및 기준증발산량을 구하였다.

통계처리 6월 16일 - 7월 11일과 8월 22일 - 9월 30일, 두 기간으로 나누어 노지와 비닐하우스 간 일사량 및 FAO PM 식으로 추정된 기준증발산량에 대해 상관분석을 하였다. SAS 통계 프로그램을 이용하여 유의성을 검정하였다 (SAS, ver. 9.2, Cary, NC).

Results and Discussion

기준증발산량 산정방법 간 비교 연구기간 동안 노지와 비닐하우스 내 최저온도는 평균 15.4 - 15.8 $^{\circ}\text{C}$, 평균온도는 평균 67.9 - 72.3%로 비슷하였으나, 평균온도, 최고온도의 평균이 비닐하우스에서는 23.0 $^{\circ}\text{C}$, 37.8 $^{\circ}\text{C}$, 노지에서는 19.8 $^{\circ}\text{C}$, 24.8 $^{\circ}\text{C}$ 로 비닐하우스 내 최고기온이 13 $^{\circ}\text{C}$ 높았다 (Figs. 1 and 2). 물수지식에 의해 산정한 실측값과 FAO PM 식에 의한 추정값은 6월 중순 - 9월 말까지는 유사하였으나, 10월 이후 물수지식에 의한 실측값이 추정값에 비해 크게 낮아졌다. 노지에서는 6월 중순 - 9월 말에 실측값 및 추정값이 각각 3.87 mm day^{-1} , 3.76 mm day^{-1} 이었고, 10월에는 1.03 mm day^{-1} , 2.83 mm day^{-1} 이었다. 비닐하우스에서는 대체로 생육이 불량하였는데, 7월 중순부터 8월 하순까지 잔디생육 불량으로 기준증발산량을 측정할 수 없었고 이 기간을 제외한 6월 중순 - 9월 말에 실측값 및 추정값이 각각 1.89 mm day^{-1} , 2.22 mm day^{-1} 이었고, 10월에는 0.55 mm day^{-1} , 1.39 mm day^{-1} 이었다 (Table 1). 6 - 9월 중에는 노지에서 기준증발산량은 추정값이 실측값에 비해 3.0% 낮고, 비닐하우스에서는 14.9% 높아 FAO PM 산정방법은 노지 기준증발산량을 유사하게 모의하였으나, 10월에는 노지에서는 실측값이 추정값의 63.7%, 비닐하우스에서는 60.1%로 FAO PM 식이 기준증발산량을 과대평가하였다. FAO PM 산정방법은 기준작물에 대해 초장 12 cm로 균일한 길이를 유지하며 지표면을 완전히 덮어야 한다고 정의되어 있다. 한지형 잔디의 생육 적정 온도는 지상부 15 -

Fig. 1. Changes of Max. & Min. temperature in open field (OF) and plastic house (PH) during experimental periods.

Fig. 2. Changes of relative humidity in open field (OF) and plastic house (PH) during experimental periods.

Table 1. Comparison of reference evapotranspiration (ET_0) of calculation methods between FAO Penman-Monteith (FAO PM) and water balance (WB) in open field and plastic house.

Period	Open Field						Plastic House	
	FAO PM			WB			FAO PM	WB
	ET_0	ET_0	I	P	D	$\Delta \theta$	ET_0	ET_0
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Jun. 16 - Jul. 11	81.8 (3.15)	98.7 (3.80)	-	285.7	137.2	49.8	66.3 (2.55)	52.4 (2.01)
Jul. 12 - Aug. 21	173.7 (4.24)	184.4 (4.50)	5.3	379.1	200.0	-	-	-
Aug. 22 - Sept. 30	146.5 (3.66)	131.2 (3.28)	5.1	193.7	67.6	-	80.0 (2.00)	72.2 (1.80)
Oct. 1 - 31	87.6 (2.83)	31.8 (1.03)	31.0	2.0	1.2	-	43.0 (1.39)	17.2 (0.55)
Total	489.6	446.1	41.4	860.5	406.0	49.8	189.3	141.8

[†]() indicates daily value.

[†]I : Irrigation, P : Rainfall, D : Drainage, $\Delta \theta$: Soil moisture decrement.

24°C, 지하부 10 - 18°C이며 (Beard, 1972), 30°C 이상에서는 지상부와 지하부의 생육이 급격히 감소하고 하고현상이 나타나며 (Huang and Gao, 2000), 일평균기온이 10°C 이하로 내려가면 동해를 회피하기 위해 휴면에 들어가 생육이 부진해진다 (Youngner, 1961; Beard, 1972). 본 연구에서는 7월 중순 - 8월 하순에 비닐하우스 내 고온과 10월 이후에 노지 및 비닐하우스 내 저온으로 잔디생육이 불량하였으며, 이 시기에 잔디생육 장애로 증발산이 부진한 것으로 분석된다. 선행연구에서도 같은 결과를 보였는데, 한지형 잔디 (kentucky blue grass)를 기준작물로 하여 연중 시설재배지 내 기준증발산량을 산정한 결과, Blaney-Criddle 공식에 의한 추정값이 실측값보다 높았다 (Lee and Oh, 2001). 선행연구에서는 이에 대한 원인이 언급되지 않았으나 공통적으로 추정값이 실측값보다 높은 경향을 나타내었다. 따라서 FAO PM 식은 우리나라 노지에서 9월까지 기준증발산량 값을 유사하게 모의하며 노지에서 10월 이전에 한하여 기준증발산량 평가방법으로 FAO PM 식을 채택할 수 있다.

노지와 하우스의 기준증발산량 비교 FAO PM 식으로 추정한 기준증발산량의 노지와 비닐하우스 간에 비교한 결과, 모니터링 기간 중 경향은 비슷하게 나타났으나, 기간에 따라 다른 양상을 보였다 (Fig. 3). 앞의 결과에서 FAO PM 식이 기준증발산량을 과대평가하는 10월을 제외하고 전반기 (6월 16일 - 7월 11일)와 후반기 (8월 22일 - 9월 30일)로 나누어 기준증발산량을 평가하였을 때, 전반기에 노지 3.15 mm day⁻¹, 비닐하우스 2.55 mm day⁻¹, 후반기에 노지 3.66 mm day⁻¹, 비닐하우스 2.00 mm day⁻¹이었다 (Table 1). FAO PM 식에서 기준증발산량을 값을 결정하는 요인으로 온도, 습도, 일사량, 풍속 등이 있는데, 이 중에 일사량이 기준증발산량에 가장 큰 영향을 끼친다 (Allen et al., 1998). 본 연구기간 중 노지와 비닐하우스의 최저온도와 평균습도는 비슷하였으며, 평균온도와 최고온도는 비닐하우스에서 평균 3.2°C, 13°C가 높았다. 따라서 노지보다 비닐하우스에서 기준증발산량이 낮은 원인을 일사량에서 찾아볼 수 있다. 노지와 비닐하우스 간에 일사량 (Fig. 4) 및 FAO PM 식으로 추정한 기준증발산량 (Fig. 5)은 유의한 상관관계가 나타났고, 기간에 따라 차이를 보였다. 일사량은 전반기에는 비닐하우스와 노지가 비슷하였으며, 후반기에는 비닐하우스가 노지의 65.3%이었다. 비닐하우스의 기준증발산량은 전반기에는 노지의 81.8%였으며, 후반기에는 노지의 54.0%이었다. 비닐하우스의 피복자재는 시간경과에 따라 환경요인에 의해 투과율이 감소할 수 있다. 비닐하우스 피복자재로 사용되는 연질필름은 고온-저온의 반복과 태풍, 눈비 등의 노출에 따라 강도 및 기능성이 떨어진다 (Chun et al., 2007). Kwon et al. (2001)은 7일 및 30개월 경과시 비닐하우스의 피복재료에 따라 광합성 유효광

Fig. 3. Changes of reference evapotranspiration (ET_0) calculated by FAO Penman-Monteith (FAO PM) eq. in open field (OF) and plastic house (PH) during June 16 - October 31.

(Photosynthetically active radiation, PAR, 400 - 700 nm)의 투과율은 6 - 12% 감소되었다고 하였다. 이와 같은 근거를 바탕으로 전반기에 비해 후반기에 노지와 비닐하우스 간의 일사량 차이가 커지고 기준증발산량의 차이도 크게 나타난 것으로 사료된다. Hong et al. (2014)은 시설재배지 연중 증발산량 모니터링에서 시설재배지 내부 일사량은 외부 일사량의 약 46% 라고 하였고, Cho et al. (1997)는 피복자재에 따라 다소 차이가 있으나 (49 - 54%) 내부 일사량은 외부 일사량의 약 54% 라고 하였다. 시설재배지에 사용되는 피복자재에 따라 투과율에 차이가 있으나, 시설재배지 내부 일사량이 노지 일사량의 55% 내외였다. Lee and Oh (2001)는 시설재배지 내 기준증발산량 추정식으로 Penman 공식과 Blaney-Criddle 공식을 적용하였는데 내부기상자료보다 외부기상자료를 활용하는 것이 실측값에 가깝다고

Fig. 4. Correlation of solar radiation between open field (OF) and plastic house (PH) during (a) June 16 to July 11 and (b) August 22 to September 30.

[†]Correlation coefficient (r) was determined by Pearson correlation analysis ($p < 0.001$).

Fig. 5. Correlation of reference evapotranspiration (ET_0) between open field (OF) and plastic house (PH) during (a) June 16 to July 11 and (b) August 22 to September 30.

[†]Correlation coefficient (r) was determined by Pearson correlation analysis ($p < 0.001$).

보고하였다. 피복자재의 투과율 변화에 따라 일사량 및 기준증발산량이 변동되기 때문에 비닐하우스 내 기상요인으로 FAO PM 식에 의해 기준증발산량을 산정하는 것은 신뢰도가 떨어진다. 비닐하우스와 노지의 기준증발산량은 유사한 경향을 보이며 고도의 유의한 상관관계를 갖으므로 비닐하우스 기준증발산량 평가시 노지에서 평가한 기준증발산량을 채택할 수 있다. 본 연구에서는 다양한 형태, 규격, 작기를 갖는 시설재배 환경에서 시설작물의 관개량 설정을 위해 적합한 기준증발산량 산정방법을 찾고자 하였다. 앞의 결과들을 종합하여 볼 때, 시설작물 관개량 산정시 기준증발산량은 첫번째 가정으로 세운 ‘노지에서 평가한 기준증발산량’을 사용하며 이 때 기준증발산량 산정방법은 FAO PM 식이 적합하다고 평가한다. 따라서 앞으로 시설작물의 관개량 산정은 ‘ ET_0 (노지에서 평가한 기준증발산량) $\times K_{cp}$ (시설재배지에서의 작물계수)’로 구할 수 있으며, 노지 기준증발산량에 기준한 시설재배지에서의 작물계수 설정 연구가 필요하다. 또한 10월 이후 FAO PM 식은 우리나라에서 기준증발산량을 과대평가하였는데, 비닐하우스에서는 연중 작물재배가 이루어지는 여건을 고려할 때 비닐하우스에서 10월 이후 적용 가능한 기준증발산량 평가방법에 대한 후속연구가 필요하다.

Conclusions

시설작물 관개량 설정을 위해 노지에서 평가한 기준증발산량을 채택하되, 이 때 산정방법은 FAO PM식이 적합하다고 평가하였다. 다만 우리나라에서 10월 이후에는 FAO PM식이 기준증발산량을 과대평가하는 면이 있기 때문에 10월 이전에 한정하여 적용할 필요가 있다. 노지와 비닐하우스 내 일사량 및 기준증발산량은 고도의 유의한 상관관계를 갖으나 투과율 변화에 따라 특성이 달라졌다. 일사량은 전반기(6월 16일 - 7월 11일)에는 노지와 비닐하우스에서 비슷하나, 후반기(8월 22일 - 9월 30일)에는 노지의 65.3%이었고, 기준증발산량은 전반기에는 노지의 81.8%, 후반기에는 노지의 54.0%이었다. 이는 시간경과에 따라 피복자재의 투과율 감소로 일사량이 감소하며 이를 인자로 계산하는 기준증발산량도 영향을 받기 때문이다. 따라서 시설재배지 내 기상요인으로 산정한 기준증발산량을 기준값으로 적용하기에 한계가 있다.

Acknowledgement

This study was conducted by support of NIAS, RDA research and development project (Project no. PJ01089903).

References

- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration. FAO, Rome.
- Beard, J.B. 1972. Turfgrass : Science and culture. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- Cho, I.H., S.J. Jo, T.Y. Kim, N.Y. Heo, and Y.S. Kwon. 1997. Effects of covering materials on light environment in protected horticulture. (6)1:87-91. In proceedings of Korean Soc. for Bio-Environment Control conference. The Korean society for Bio-Environment Control, Jinju, Korea.
- Chun, H., Y.J. Choi, Y.H. Choi, H.J. Kim, S.Y. Lee, C.S. Jeong, Y.S. Shin, and C.D. Choi. 2007. Microclimate of greenhouses covered with functional film. J. Bio-Environment Control. 16(2):96:100.
- Droogers, P. and R.G. Allen. 2002. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions.

- Irrigation and Drainage systems. 16:33-45.
- Eom, K.C., D.S. Oh, K.C. Song, I.S. Jo, and D.W. Seo. 1999. A guide book for water management of upland crops. Natio. Insti. of Agri. Sci. and Tech., RDA, Suwon, Korea.
- Fontenot, R.L. 2004. An evaluation of reference evapotranspiration models in Louisiana. M.S. Thesis, Louisiana State Uni. Louisiana, USA.
- Heo, N.Y. 1997. The reasonable water management in protected horticulture. 55-103. In symposium of irrigation and fertilizer in protected horticulture. The Korean society for Bio-Environment Control, Jinju, Korea (in Korean).
- Hong, E.M., J.Y. Choi, W.H. Nam, M.S. Kang, and J.R. Jang. 2014. Soil moisture extraction characteristics of cucumber crop in protected cultivation. Korean J. Soc. Agricultural Engineers. 56(2):37-46.
- Huang, B. and H. Gao. 2000. Growth and carbohydrate metabolism of creeping bentgrass cultivars in response to increasing temperature. Crop Sci. 40(4):1115-1120.
- Kwon, J.K., Y.H. Choi, D.K. Park, J.H. Lee, Y.C. Um, and J.C. Park. 2001. Optical and physical properties of covering materials for plastic greenhouse. J. Bio-Environment control. 10(3):141-147.
- Lage, M., A. Bamouh, M. Karrou, and M. El. Mourid. 2003. Estimation of rice evapotranspiration using a microlysimeter technique and comparison with FAO Penman-Monteith and Pan evaporation methods under Moroccan conditions. Agronomie. 23:625-631.
- Lee, N.H. and S.T. Oh. 2001. A model for estimating reference crop evapotranspiration in the greenhouse. J. Korean Soc. Agri. Engineer. 43(4):50-56.
- Nam, S.W., N.H. Lee, W.J. Jeon, H.C. Hwang, S.G. Hong, and Y.J. Heo. 1997. Evapotranspirations of lettuce and cucumber by cropping systems in greenhouse. J. Bio. Fac. Env. 6(3):168-175.
- Walter, I.A., R.G. Allen, R. Elliott, M.E. Jensen, D. Itenfisu, B. Mecham, T.A. Howell, R. Snyder, P. Brown, S. Echings, T. Spofford, M. Hattendorf, R.H. Cuenca, J.L. Wright, and D. Martin. 2000. ASCE's standardized reference evapotranspiration equation. 209-215. In Proceedings of Watershed management and operations management 2000. Colorado, USA.
- Youngner, V.B. 1961. Growth and flowering of Zoysia species in response to temperatures, photoperiods, and light intensities. Crop Sci. 1(2):91-93.