Protected Horticulture and Plant Factory, Vol. 24, No. 1:1-7, March (2015)
DOI http://dx.doi.org/10.12791/KSBEC.2015.24.1.001

pISSN 2288-0992
eISSN 2288-100X

파프리카 재배에서 계절별 광환경 조건과 증산량 예측에 근거한 관수공급 기준 제시

신종화 · 손정익*
서울대학교 식물생산과학부 및 농업생명과학연구원

Irrigation Criteria based on Estimated Transpiration and Seasonal Light Environmental Condition for Greenhouse Cultivation of Paprika

Jong Hwa Shin and Jung Eek Son*
Department of Plant Science and Research Institute of Agriculture and Life Science, Seoul National University, 599 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 151-921, Korea

Abstract. Irrigation control plays an important role in improving productivity of paprika which is very sensitive to moisture condition. Among environmental factors, light intensity and distribution are not easily controlled and showed a big difference depending on season and region. For adequate irrigation control, therefore, transpiration and irrigation amounts considering light environmental data should be estimated. In current study, modified transpiration model was used for more precise estimation of transpiration. Seasonal transpiration and irrigation amounts at different regions were compared by using light environmental data provided from Korea Meteorological Administration. The transpiration amount in summer was rather smaller than those in spring and autumn seasons in Korea due to large deviations in light intensity as well as rainy period in summer. Irrigation system capacities at various regions could be recommended by using the transpiration amount in the spring having the longest photoperiod in the year. These results will be useful to the design of irrigation system and optimization of input energy in greenhouse.

Additional key words : daily light distribution, greenhouse, irrigation capacity, irrigation design, transpiration model

서 론

파프리카 재배에서 수분관리는 생산량과 밀접한 관련을 가지는 주요한 제어 요인이다. 수분관리는 여러 가지 요인에 영향을 받으며, 온도, 습도, 광도 등에 크게 영향을 받는다. 시설재배를 통해 온도와 습도는 어느 정도 목표 범위에 맞게 조절할 수 있지만, 광 조건은 재배 위치 및 계절에 따라서 일정하지 않기 때문에 조절이 용이하지 못하다. 따라서 안정적인 작물재배를 위한 수분관리를 위해서는 계절 별 광환경 조건을 고려한 증산량 및 이에 근거한 적정 관수 공급량 예측이 필요하지만, 이에 관한 충분한 자료 분석이 미비한 실정이다. .

이러한 관수조절에 필요한 관수량은 작물이 필요한 수분량의 예측을 통해 추정하고 있다. 일반적으로 Penman-Monteith의 모델에 기반한 예측식(Jolliet, 1994; Jolliet과 Bailey, 1992; Medrano 등, 2005; Ta 등, 2011)이 이용되어 왔다. 실용적으로는 적산광에 근거한 관수 방법은 기본적으로 작물이 받는 광도가 증가할수록 증산량 또한 많아진다는 가정에 따라 관수량을 추정하는 것이며, 이러한 방법에 대한 신뢰성이 검증되어 현재 많은 농가에서 활용되고 있는 관수방법이다(Qiu 등, 2011; Shao 등, 2010; Ta 등, 2011). 하지만 일정 수준 이상의 광도 조건에서는 증산량이 광도의 증가에 비례하여 증가하지 않는다고 보고되었고, 특히 우리나라의 여름과 같이 광도의 편차가 큰 일조 조건에서는 증산량 추정에 따른 관수량 추정 오차가 더욱 커질 수 있다(Shin 등 2014). 따라서 Shin 등(2014)은 보다 정밀한 증산량 추정을 위하여 광도 보정식을 적용한 바 있다.

실제로 시설재배를 위한 작물의 수분 사용량 추정은 농가의 시설 용량 설정에 매우 중요한 요인이 될 수 있으므로 보다 정밀한 수분 사용량의 계산이 요구된다. 일반적으로 파프리카의 경우 배지의 염류집적을 피하기 위하여 배지에 따른 배액율을 기준으로 관수량을 설정하고 있으며, 작물 개체 기준의 관수량과 재배시설 규모에 의해 전체 관수량이 결정된다(Ucar 등, 2011; Zeng 등,

*Corresponding author: sjeenv@snu.ac.kr
Received January 16, 2015; Revised February 02, 2015; Accepted February 03, 2015

2009). 우리나라의 경우 계절간 광주기의 편차가 크고, 지역간 일중 누적 광량이 다르므로 지역에 따른 기후 데이터를 활용한 재배시설 규모와 재배조건에 맞는 체계적인 관수관리 기술과 관수시설 설치기준의 제시가 요구된다. 최근 시설재배에 양액을 재사용하여 작물을 재배하는 순환식 수경재배 방법이 적용됨에 따라 관수시설 설비의 규모는 축소될 수 있는 가능성이 있지만(Ehret 등, 2005; Raviv 등, 1998; Zekki 등, 1996), 이와 같은 관수설비의 설치를 위한 설정 기준은 아직 정비되어 않다. 따라서 본 연구에서는 파프리카의 재배에 적합한 증산 예측을 통하여 작물의 수분 이용량을 추정하고, 각 지역의 환경조건에 적합한 관수량을 제시하고자 하였다. 또한 대표 지역의 관수시설의 설비기준 용량을 제시하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 증산량 추정

증산량은 Penman-Monteith의 증발산 모델을 파프리카에 맞게 변형한 Shin 등(2014)에 의한 증산량 추정식을 이용하여 추정하였다(Eq. 1).

$$Tr = a \times [1 - \exp(-k \times LAI)] \times RAD + b \times LAI \times VPD \quad (1)$$

식에서 계수 a, b, k 는 각각 0.26, 0.09kg/day, 0.84이며, 기본적으로 LAI(m^2/m^2)는 파프리카에서 과실 생산을 위한 목표 엽면적인 3을 기준으로 작물 1개체의 증산량을 추정하였다. LAI는 증산에 영향을 주는 주요 변수 중에 하나이므로 LAI의 증가에 따른 증산량의 변화를 추정하였다. 작물의 재식 간격은 3주/m^2로 설정하였다. 수증기압포차(VPD, vapor pressure deficit)는 파프리카 재배의 온실환경 관리 기준에 따라 Eq. 2를 이용하여 계산하였으며, 범위는 0-0.040kPa이었고, 파프리카 재배의 제어 기준인 26°C, 80% 수준에서의 VPD값 0.019kPa를 증산 추정에 사용하였다.

$$VPD = 610.7 \times [(100 - RH)/100] \times 107.5^{T/(237.3+T)} \quad (2)$$

광도(RAD, radiation)는 기상데이터를 활용하였으며, 기상청으로부터 총수평면 일사량(MJ/m^2) 데이터를 제공받아 증산 추정에 이용하였다. 일 중의 광도 변화에 따른 보정은 여름기간(2013년6월~2013년 8월)과 겨울기간(2013년 12월~2014년 2월)에 서울대학교 부속실험농장(수원)에서 측정한 광도 데이터에 Shin 등(2014)의 연구결과에 따른 보정식을 적용하여 보정 계수를 산출하고 여름 기간의 증산 추정에 사용하였다.

2. 관수량 설정

작물에 공급하는 관수량은 작물의 증산량을 필요수량으로 간주하고, 이에 따른 배액율을 기준으로 설정하였다. 배지의 염류집적을 최소화하기 위하여 양분 공급량의 30%가 배액으로 배출되도록 양분 공급량을 계산하였다. 양분 공급량은 증산량(Tr)과 배액량(Dr)의 합이므로 다음의 식에 의하여 작물 증산량에 따른 양분공급량을 계산하였다(Eq. 3).

$$Dr/(Tr + Dr) \times 100 = 30\% \quad (3)$$

따라서 위의 증산량 추정식에서 예측한 작물 증산량의 1.43배에 해당하는 양분을 공급하는 것을 관수의 기준으로 설정하였고, 배액율의 기준은 일누적 관수량에 대한 일누적 배액량을 총량 비율로 계산하였다. 위에서 언급한 내용과 마찬가지로 증산량 추정을 위한 LAI와 VPD 변수는 각각 3m^2/m^2 와 0.019kPa를 기준으로 계절별 관수량을 계산하였고, 관수량이 최대가 될 수 있는 경우는 각각 6m^2/m^2 와 0.040kPa일 경우를 가정하여 최대 관수량을 산정하였다. 그리고 앞서 언급한 기준에 따라 기상데이터를 활용하여 지역에 따른 주당 일별 관수량을 계산하였다.

3. 지역 별 증산량 추정과 관수량 설정

전체 관수 기준 제시를 위하여 기상청의 1981년 1월 1일부터 2010년 12년 31월까지 기간 동안의 일사량 관측이 가능한 관측소가 위치한 서울, 인천, 수원, 대전, 광주, 부산, 제주, 울릉도 외 65 지점(총 73개 지점)의 일조시간(hr)과 총수평면 일사량(MJ/m^2) 데이터를 평균하여 각 지역별 증산량 추정과 관수기준 제시에 사용하였다. 또한 우리나라의 경우 계절 별 광주기에 따른 관수 적용시간이 다르게 적용되므로 봄(3~5월), 여름(6~8월), 가을(9~11월), 겨울(12~2월)의 4계절로 구분하여 데이터를 제시하였다. 추정된 증산량과 위에서 설정한 관수 기준에 따른 지역 별 데이터는 Surfer 10 (Golden Software, USA) 프로그램을 활용하여 등고선 형태의 그림으로 나타내었다.

4. 재배규모에 따른 관수시설 설치 기준

관수시설의 경우 재배면적과 재식밀도 및 작물의 생육단계가 시설 장비의 용량 결정에 큰 영향을 준다. 따라서 기본적으로 10a 면적에 일반적인 상업농가에서의 재식밀도인 3주/m^2 간격으로 파프리카를 재식하여 순환식 수경재배 방식에 따라 재배한 경우를 기본으로 하여 대표적인 12개 지역(서울, 춘천, 대관령, 강릉, 수원, 군산, 전주, 제주, 창원, 진주, 정읍, 구미)의 관수시설 장비 설

치 기준을 제시하고자 하였다. 순환식 수경재배 방식의 적용에 따라 최대 5회 관수 공급을 위한 탱크 용량과 재사용 양액의 처리용량을 관수시설 장비 설치기준 항목으로 설정하였다. 작물의 생육단계는 엽면적이 최대 $6m^2/m^2$ 가 되었을 경우를 가정하여 최대 관수량을 설정하였다. 우리나라의 경우 계절에 따라 광주기가 다르므로 관수 적용 기간이 다르게 적용된다. 따라서 전국(73지점)의 월별 일조시간(hr) 데이터(Fig. 1)를 이용하여 일조시간이 가장 긴 5월을 최대 관수시설 설치기준에 적용하였다.

결과 및 고찰

1. 증산량 추정

시설환경 내에서 서로 다른 8, 12, 16MJ/m^2/day의 광도 수준에 대한 증산과 LAI의 관계는 Fig. 2와 같다. 일반적으로 광도의 증가에 대한 증산의 변화는 Eq. 1에서

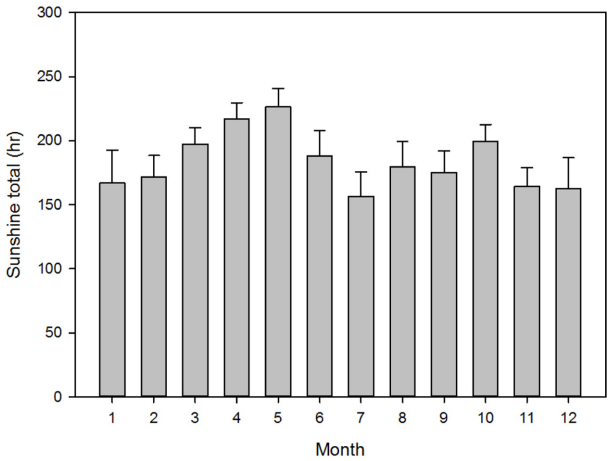

Fig. 1. Monthly sunshine total in Korea (1981-2010). Vertical bars present mean ±SE (n = 73).

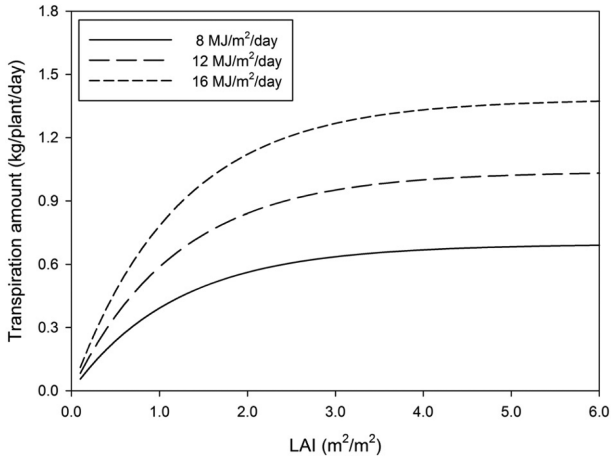

Fig. 2. Relationship between transpiration amount and LAI at the different radiation levels.

와 같이 비례적인 관계로 증가하였다. 온도와 습도에 의한 VPD는 Eq. 2에서와 같이 온도가 상승할수록, 상대습도가 감소할수록 증가하였다. 그러나 이와 같은 VPD가 전체 증산량에 기여하는 정도는 0.1% 미만이므로 온도와 습도가 목표 범위에서 유지되는 시설재배 환경에서 증산 추정을 위한 VPD항은 무시할 수 있는 수준이라 사료되었다.

LAI가 증가함에 따라 증산 또한 증가하는 경향을 보였으나, LAI $3m^2/m^2$ 이상의 수준에서는 그 증가 폭이 두드러지게 감소하였다(Fig. 2). 이는 Hellemans(2006)이 보고한 바와 같이 수직 생장을 하는 파프리카 작물의 특성상 작물이 생육함에 따라 군락내의 광투과량이 감소하여 증산의 증가율 또한 감소한 것으로 판단된다. 또한 작물의 생장에 따른 하엽의 증산효율이 떨어지므로 증산량 증가율의 감소폭이 더욱 커졌다고 할 수 있다(Hellemans, 2006). 따라서 파프리카 작물의 증산 추정에서 환경변수 이외에 작물의 생육변수도 증산량의 변화에 깊이 관여하므로 중요하게 고려되어야 할 사항으로 간주된다.

여름철(6-8월)과 겨울철(12-2월) 일평균 광도와 광도의 편차는 여름철이 겨울철에 비해 크게 나타났다(Fig. 3A). 우리나라의 경우 여름과 겨울철 광주기가 달라 총

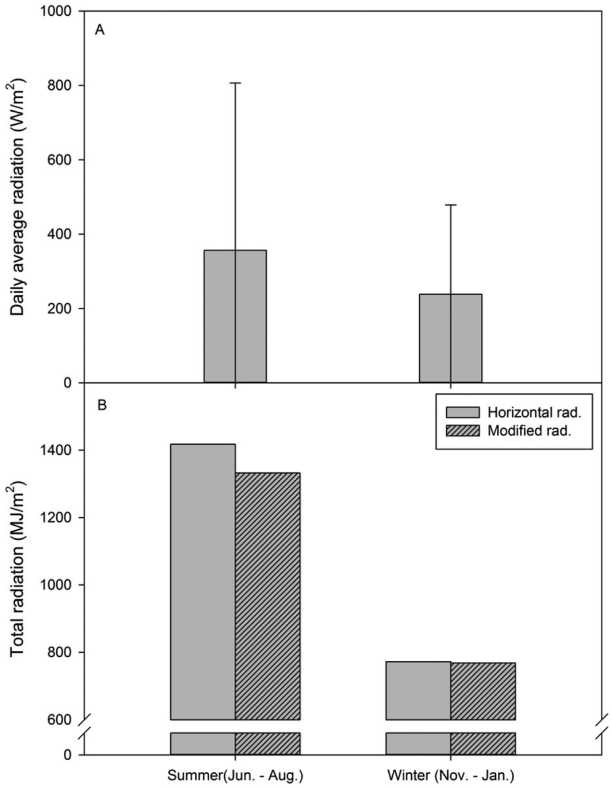

Fig. 3. Comparisons of daily average radiation (A) and total radiation (B) in summer and winter seasons at the Experimental Farm of Seoul National University in Suwon. Vertical bars present the range of light intensity during the day (A).

누적 광량이 다르고, 여름철 태양고도가 높고 상대적으로 겨울철에 비해 구름의 양이 적기 때문에(Blanke, 2007; Kwon 등, 2008) 하루 중의 광도 편차가 여름철에 더욱 크게 나타난 것으로 생각된다. 같은 기간 동안의 누적 광량 비교에서도 여름철이 겨울철에 비해 높게 나타났다(Fig. 3B). 그러나 Shin 등(2014)이 보고한 바와 같이 실제 증산에 기여하는 광도수준에서의 비교는 계절적 차이가 수평면일사량 기준의 누적광량 만큼 크지 않았다. 상대적으로 광도 편차가 적은 겨울철에는 그 차이가 크지 않았지만, 그 반대의 경우인 여름철 누적 수평일사량(Horizontal rad) 과 Shin 등(2014)의 보정식에 의한 수정된 누적일사량(Modified rad)은 6%까지 차이를 보였다(Fig. 3B). 즉, 작물이 실제 사용하는 수분량을 정확하게 예측하기 위해서는 계절 별 증산추정의 주요 환경변수인 광도에 대한 보정이 요구된다. 본 실험에서는 앞서 언급한 내용과 같이 계절에 따른 보정된 광도의 적용으로 증산량을 기존의 증산추정 방법보다 정확하게 추정하였다고 할 수 있다.

2. 지역 별 증산량 추정

우리나라의 30년 연평균 광도 데이터를 이용하여 계절별로 증산량을 비교한 결과, 전반적으로 증산량은 봄(3-5월)에 가장 높았으며 겨울(12-2월)이 가장 낮았고 여름에 비해 가을(9-11월)이 다소 높았다(Fig. 4). 총 누적 광량은 여름(6-8월)이 가장 많았으나 고광도에 의한 증산효율의 저하와 여름철 장마로(Kwon, 2008) 인해 실제 증산량은 봄(3-5월)에 가장 크게 나타난 것으로 판단된다. 또한 봄과 가을은 각각 춘분과 추분을 기준으로 광주기가 길어지고 짧아짐에 따라 봄이 가을에 비해 증산량이 많은 것으로 판단된다. 일조가 좋지 못하고 광주기 또한 짧은 우리나라의 겨울철 기후 특성 때문에(Blanke, 2007), 겨울이 사계절 중 작물의 증산은 가장 적었고 지역간의 편차도 크지 않았던 시기인 것으로 사료된다. 이상의 결과로 미루어 볼 때, 계절의 구분과 지형의 특성에 따라 우리나라에서 대표적으로 행해지는 파프리카 재배의 두 가지 작기 유형 중 겨울에 파종하여 봄부터 수확에 들어가는 여름 작기는 강원도 일부 지역, 서해안 지역, 그리고 경상북부 일부 지역이 적합할 것으로 사료되며, 이와 대조적인 겨울 작기의 경우 경상남부 일부 지역과 동해안 일부 지역이 적합할 것으로 판단되었다.

3. 지역 별 관수량 설정

Fig. 4의 증산량 추정 데이터와 30년간의 연평균 광도 데이터를 이용하여 배액율(30%) 기준 관수 제어를 할 경우 연평균 작물 1주당 공급해 주어야 될 관수량을 지역별로 구분하여 계절별로 표시하면 Fig. 5A와 같다. 관

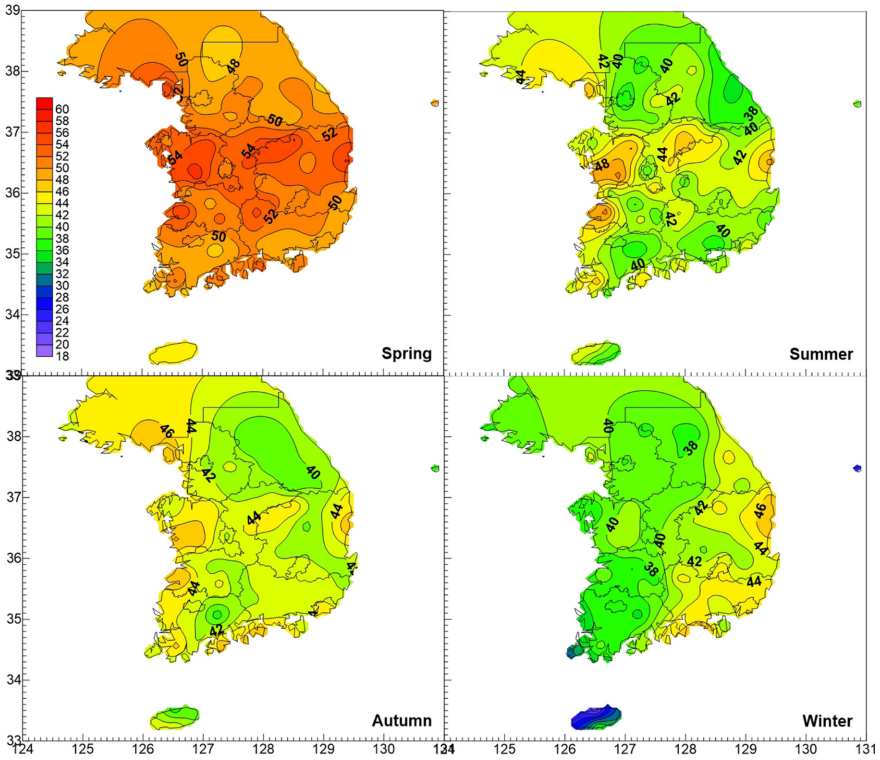

Fig. 4. Estimation of seasonal transpiration amounts using average radiation data of 30 years' (1981-2010) in Korea.

수량 데이터의 경우 Fig. 4의 지역별 증산량 데이터와 유사한 경향을 보였다. 제주도와 울릉도를 제외한 내륙 지역의 경우 작물 1주당 공급해 주어야 할 수분의 0.55-0.90kg 범위에서 지역 별로 차이를 보였다. 이를 통해 작물에게 공급해 주어야 할 수분량은 지역별로 최대 164%까지도 차이가 나는 것을 알 수 있었으며, 이로 인해 환경 데이터를 이용한 정밀한 관수조절이 필요하다.

Fig. 5B는 1년 중 증산효율이 가장 높은 5월(Fig. 1)의

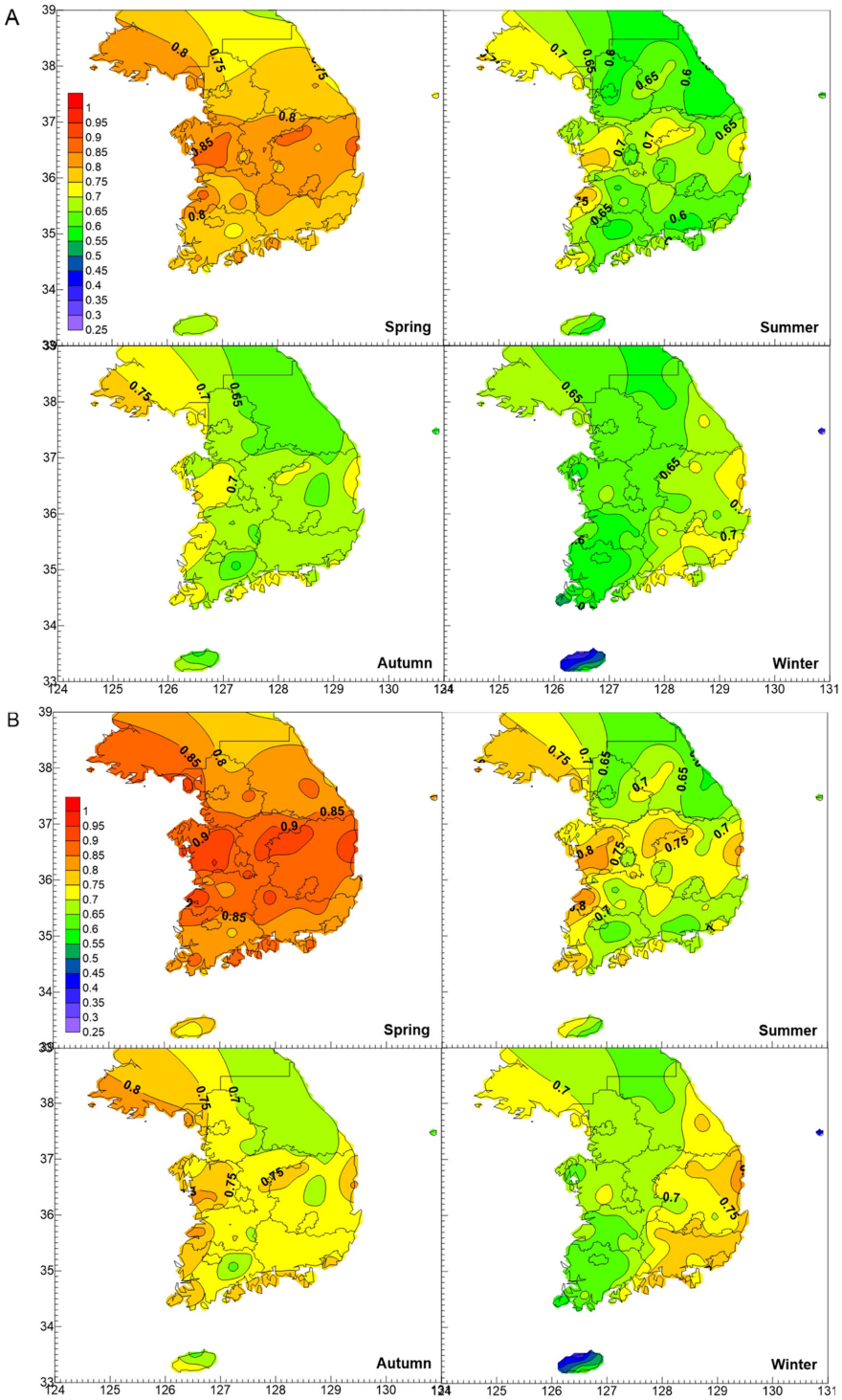

Fig. 5. Estimation of seasonal average (A) and maximum (B) required irrigation amounts per plant in Korea.

Table 1. Regional recommendations for irrigation system design.

Region	Maximum irrigation amount per event (L/plant)	Capacity of nutrient tank (t)	Processing capacity for reused nutrient solution (L/min)
Seoul	0.81	12.09	40.29
Chuncheon	0.84	12.63	42.11
Daegwallyeong	0.87	13.11	43.69
Gangneung	0.80	11.94	39.79
Suwon	0.84	12.63	42.11
Gunsan	0.82	12.25	40.82
Jeonju	0.82	12.26	40.85
Jeju	0.75	11.25	37.52
Changwon	0.80	12.05	40.17
Jinju	0.81	12.17	40.57
Jeongeup	0.87	13.08	43.60
Gumi	0.87	13.09	43.63

증산량 데이터를 이용하여 작물 1주당 공급해 주어야 될 관수량을 지역 별로 구분하여 계절 별로 나타내었다. 연평균 데이터에 비하여 지역간 작물 1주당 필요수량의 편차가 크게 나타났고, 제주도와 울릉도를 제외한 내륙의 데이터간 차이는 최대 173%까지 차이를 보였다. 이와 같은 데이터는 관수시설 설비용량 결정을 위한 주요한 데이터로 활용이 될 것으로 판단되고, 시설 설비에 있어서 작물의 필요수량을 충분히 고려한 적절한 시설용량의 설치기준이 지역별로 다르게 적용되어야 함을 시사한다. 또한 이와 같은 데이터는 실제 시설의 설계에 있어 참고 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

3. 관수시설 설계기준

위에서 제시된 최대 관수량 기준에 따라 대표 12개 지역별 10a 기준 양액 재사용 파프리카 재배 농가에 요구되는 양액공급 시설의 양액탱크 용량과 재사용 양액의 처리용량을 정리하면 Table 1과 같다. 재사용 양액 공급시설의 경우 공급된 양액이 배액된 후에 살균 및 정제 과정을 거치기 까지 시간이 걸리므로(Ahn과 Son, 2011), 이를 고려하여 5회 관수를 일시에 할 수 있도록 탱크 용량이 제시되었다. 또한 이 시기 동안 재처리 해야 될 배액의 양과 시간을 고려하여 재사용 양액의 처리용량이 제시되었다(Table 1). 그러나 배액량 기준 관수조절에서 배액량을 상향 조정할 경우, 위의 기준은 수정될 필요가 있으나, 관행으로 이용되고 있는 배지의 염류집적을 피하기 위한 30% 배액율 기준 관수조절을 할 경우 제시된 데이터는 최소 요구 설정 범위라 볼 수 있다. 이 또한 관수 설정을 위한 다양한 작물의 데이터베이스 축적이 필요함과 마찬가지로 관수방법과 배지의 특성을 고려한 관수공급 설비 기준에 대한 연구가 앞으로 더욱 필요할 것으로 판단된다.

적 요

파프리카는 수분에 민감한 작물이므로 작물의 생산성 향상을 위하여 적정 관수조절은 매우 중요하다. 광환경 조건은 시설재배에서 여러 환경 변수 중 조절이 용이하지 못하며, 지역 별, 계절 별 분포가 다르기 때문에 광환경 데이터를 이용한 증산과 관수의 추정이 필요하다. 본 연구에서는 파프리카의 정확한 증산 예측을 위하여 변형된 증산 추정식을 활용하였다. 또한 기상청의 광도 자료를 활용하여 지역 별 증산량과 관수량을 비교하였다. 우리나라의 경우 여름철 하루 중 광도의 편차가 심하고 장마기간이 있으므로 봄, 가을에 비하여 증산량이 오히려 낮았다. 그리고 광주기가 길어지는 봄에 증산량이 가장 많았으므로, 이 시기의 데이터를 이용하여 관수시설 용량을 지역별로 제시할 수 있었다. 이러한 결과는 시설재배에서 관수설비 기준제시를 위한 자료 및 투입에너지 최적화에도 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

추가 주제어 : 관수 설계, 관수 용량, 온실, 일중 광분포, 증산 모델

사 사

본 연구는 농촌진흥청의 간척지 적응 온실 환경설계기준 연구 과제(PJ009412)의 일환으로 수행되었음.

Literature Cited

Ahn, T.I. and J.E. Son. 2011. Changes in ion balance and individual ionic contributions to EC reading at different renewal

intervals of nutrient solution under EC-based nutrient control in closed-loop soilless culture for sweet peppers (*Capsicum annum* L. 'Fiesta'). Korean Journal of Horticultural Science and Technology 29:29-35.

Blanke, M.M. 2007. Cosmetic premium fruits despite wet summer climate - horticulture in South Korea. Erwerbs-Obstbau 49:23-29.

Ehret, D.L., J.G. Menzies, and T. Helmer. 2005. Production and quality of greenhouse roses in recirculating nutrient systems. Scientia Horticulturae 106:103-113.

Hellemans, B. 2006. Environmental control and Paprika growing technique. Substratus Res. Center, Netherlands.

Jolliet, O. 1994. Hortitrans, a model for predicting and optimizing humidity and transpiration in greenhouses. Journal of Agricultural Engineering Research 57:23-37.

Jolliet, O. and B.J. Bailey. 1992. The effect of climate on tomato transpiration in greenhouses-measurements and models comparison. Agricultural and Forest Meteorology 58:43-62.

Kwon, H.H., A.F. Khalil, and T. Siegfried. 2008. Analysis of extreme summer rainfall using climate teleconnections and typhoon characteristics in South Korea. Journal of the American Water Resources Association 44:436-448.

Medrano, E., P. Lorenzo, M.C. Sanchez-Guerrero, and J.I. Montero. 2005. Evaluation and modelling of greenhouse cucumber-crop transpiration under high and low radiation conditions. Scientia Horticulturae 105:163-175.

Qiu, R.J., S.Z. Kang, F.S. Li, T.S. Du, L. Tong, F. Wang, R.Q. Chen, J.Q. Liu, and S.E. Li. 2011. Energy partitioning and evapotranspiration of hot pepper grown in greenhouse with furrow and drip irrigation methods. Scientia Horticulturae 129:790-797.

Raviv, M., A. Krasnovsky, S. Medina, and R. Reuveni. 1998. Assessment of various control strategies for recirculation of greenhouse effluents under semi-arid conditions. Journal of Horticultural Science and Biotechnology 73:485-491.

Shao, G.C., N. Liu, Z.Y. Zhang, S.E. Yu, and C.R. Chen. 2010. Growth, yield and water use efficiency response of greenhouse-grown hot pepper under Time-Space deficit irrigation. Scientia Horticulturae 126:172-179.

Shin, J.H., J.S. Park, and J.E. Son. 2014. Estimating the actual transpiration rate with compensated levels of accumulated radiation for the efficient irrigation of soilless cultures of paprika plants. Agricultural Water Management 135:9-18.

Ta, T.H., J.H. Shin, T.I. Ahn, and J.E. Son. 2011. Modeling of transpiration of paprika (*Capsicum annuum* L.) plants based on radiation and leaf area index in soilless culture. Horticulture Environment and Biotechnology 52:265-269.

Ucar, Y., S. Kazaz, M.A. Askin, K. Aydinsakir, A. Kadayifci, and U. Senyigit. 2011. Determination of irrigation water amount and interval for carnation (*Dianthus caryophyllus* L.) with Pan Evaporation Method. Hortscience 46:102-107.

Zekki, H., L. Gauthier, and A. Gosselin. 1996. Growth, productivity, and mineral composition of hydroponically cultivated greenhouse tomatoes, with or without nutrient solution recycling. Journal of the American Society for Horticultural Science 121:1082-1088.

Zeng, C.Z., Z.L. Bie, and B.Z. Yuan. 2009. Determination of optimum irrigation water amount for drip-irrigated muskmelon (*Cucumis melo* L.) in plastic greenhouse. Agricultural Water Management 96:595-602.