Article

<https://doi.org/10.7745/KJSSF.2019.52.3.235>

pISSN : 0367-6315

eISSN : 2288-2162

Lysimetric Evaluation for Transpiration and Carbon Accumulation of Kimchi Cabbage (*Brassica rapa* L. ssp. *pekinensis*)

Young-jin Seo*, Hyo-hoon Nam, Won-cheol Jang, Jong-soo Kim¹, and Bu-yong Lee²

Bonghwa Herbal Crop Research Institute, Gyeongsangbuk-do A.T.A., Bonghwa 36229, Korea

¹Department of Agriculture Environment Research, Gyeongsangbuk-do A.T.A., Daegu 41404, Korea

²Department of Environmental Science, Catholic University of Daegu, Gyeongsan 38430, Korea

*Corresponding author: francisc@korea.kr

ABSTRACT

Received: May 29, 2019

Revised: July 14, 2019

Accepted: August 26, 2019

ORCID

Young-jin Seo

<https://orcid.org/0000-0001-5577-7376>

Hyo-hoon Nam

<https://orcid.org/0000-0001-6437-1212>

Won-cheol Jang

<https://orcid.org/0000-0002-6852-4367>

Jong-soo Kim

<https://orcid.org/0000-0001-8127-4270>

Bu-yong Lee

<https://orcid.org/0000-0003-3514-6694>

An accurate evaluation of transpiration is required for many applications in agricultural and environmental management because crop yields and plant growth are primarily water limited. This study was aimed to determine the transpiration of Kimchi cabbage (*Brassica rapa* L. ssp. *pekinensis*) using weighing lysimeter, to evaluate the relationship between transpiration of Kimchi cabbage and meteorological factors such as solar radiation, air temperature, etc.. Transpiration was increased as the leaf area increased with the growth stage. Also daily transpiration per unit leaf area was $0.46 \pm 0.13 \text{ g cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$ and there was no significant difference during cultivation period. The maximum transpiration was $132.9 \text{ g hour}^{-1}$ and diurnal changes of transpiration was highly correlated with solar radiation although the maximum transpiration was observed at $17 - 23^\circ\text{C}$ air temperature. The ratio of dry matter production to transpiration was 0.33% and carbon accumulation was 0.13%. This result shows that transpiration of Kimchi cabbage seem to be mainly governed by solar radiation energy in clear days and 96% of the water is discharged through transpiration for the heat dissipation. Therefore, weighing lysimeter can be used to measure transpiration accurately and may be useful in interpreting the plant growth.

Keywords: Kimchi cabbage, Lysimeter, Solar radiation, Transpiration

The transpiration of Kimchi cabbage follows the change of solar radiation.

Introduction

증산, 증발 등 물수지 (Water balance)의 구성요소를 정확하게 관측하는 것은 토양-식물-대기 계 (Soil-plant-atmosphere system)에서 수분의 이동을 이해하는데 매우 중요하다. 토양수분이 식물에 의해 수증기로 변화되어 대기 중으로 이동하는 증산은 증발과 더불어 작물 생산성과 환경에서 물 순환 특성을 결정하는 가장 중요한 요소이다 (Colaizzi et al., 2017; Djaman et al., 2018). 식물에서 증산과 이에 따른 잠열의 유·출입 (Latent heat flux)은 태양복사 에너지의 유입, 수분 이용 특성, 기상조건별 생리 반응, 대기로 수분의 이동 등의 인자에 크게 지배되는 것으로 알려져 있다 (Renner et al., 2019). 일사, 바람, 기온 및 습도 등 기상요소에 따라 증발산량이 결정되므로 증발산량 평가 기술에 대하여 연구가 오래 전부터 이루어졌다.

FAO (The Food and Agriculture Organization) 는 증발산량을 동일하게 산정하기 위해 Penman-Monteith (FAO PM)을 잠재 증발산량을 평가하는 기준 방법으로 권고하고 있으나 지역특성에 따른 차이가 발생하여 FAO-56 PM, Hargreaves equation, Penman-Kimberly 1996, FAO-24 Radiation 등의 방법 (Hur et al., 2006; Yun et al., 2009; Bakhtiari et al., 2011; Ghafouri-Azar et al., 2018; Li et al., 2018; Jeon et al., 2019; Seo et al., 2019; Yan et al., 2019) 과 전통적인 기상관측 장비를 활용한 Bowen Ratio 법 (Rana and Katerji, 2000), 대형증발계를 이용한 실시간 증발량을 평가 (Han and Lee, 2005) 등 많은 연구가 수행되었다. 미기상/통계학적 분석에 근거한 에디공분산 (Eddy-covariance) 방법은 넓은 지역의 연속적인 관측이 가능한 장점으로 증발산량 관측에 많이 활용되고 있으나 (Kwon et al., 2007; Hong et al., 2009; Kwon et al., 2009) 지표면의 수분상태에 따라 최대 3시간 정도 예측 오차가 발생할 수 있으며 (Renner et al., 2019), 위성자료 (Lim et al., 2010; Hu et al., 2018) 및 드론 원격정보 (Lee et al., 2016)를 이용하는 연구가 수행되었으나 조사지점의 기준 증발산량이 있어야 정확한 평가가 가능하다는 단점이 있다.

라이시미터는 실제 증발산량을 측정하는 유일한 방법으로 평가되며 (Schrader et al., 2013) 작물의 물 사용량 (Marek et al., 1988; Martin et al., 2001; Bello and Van Rensburg, 2017; Kim et al., 2018; Ok et al., 2018), 토양수분 이동 분석 (Seo et al., 2016; Seo et al., 2017), 측정 방법간 상관관계 분석 (Tyagi et al., 2000), 모델의 정확성 검증 (Steiner et al., 1989; Colaizzi et al., 2006)에 기준 증발산량 평가법으로 활용되었고, 순복사량 (Lee and Haginoya, 2011)과 해발고도의 영향 (Lee et al., 2012)을 분석한 결과 기상조건에 따른 증발산량 변화를 평가하는데 매우 유용하다고 하였다.

배추는 대표적인 채소 작물로 시원한 기후를 좋아하여 여름철에는 해발고도가 높은 고랭지에서만 재배되어 기상요소가 생산을 결정하는 가장 중요한 인자이다 (Wi et al., 2018). 배추의 생육, 생리장해 및 품질은 기상에 영향을 받으므로 온도시간 기반 생육단계 추정 (Kim and Yun, 2015), 기온 관측에 의한 엽면적 추정 과 생체량 예측 (Ahn et al., 2014), 기온 및 수분 변화에 따른 생리반응 조사 (Oh et al., 2014; Lee et al., 2015; Son et al., 2015), 생육도일 (Growing degree days)을 이용한 생육 예측 (Kim et al., 2015), 온도에 따른 광합성 반응 모형 제작과 생리반응 해석 (Moon et al., 2018) 등 배추 생장에 미치는 기상조건 연구가 주를 이루고 있다. 수분요구도가 높은 작물인 배추의 물 이용 특성에 대한 연구결과는 부족한 실정으로 기상조건에 따른 증산량을 평가하는 것은 중요하지만 현재까지 실시간 증산량 변화를 관측한 사례는 없고 개발된 모델은 환경조건에 따른 편차가 발생하고 있는 실정이다. 본 연구는 라이시미터를 이용하여 배추의 실시간 증산량 측정과 증산에 영향을 미치는 기상요소와의 관계를 구명하고 배추의 생장량을 조사하여 생장반응 모델개발을 위한 기초자료를 확보하고자 수행하였다.

Materials and Methods

시험토양 시험 토양은 상주토 (coarse loamy, mixed, mesic family of Dystric Fluventic Eutroudepts)에 해당하는 사양토를 사용하였다. 토양화학성은 국립농업과학원의 토양 및 식물체분석법 (NAAS, 2011)에 준하여 분석하였으며 토양의 화학적 특성은 Table 1과 같았다. pH는 6.8, 전기전도도 0.29 dS m⁻¹, 유기물 19.3 g kg⁻¹, 유효인산 329 mg kg⁻¹, 치환성 K는 0.42 cmol_c kg⁻¹, 치환성 Ca 7.12 cmol_c kg⁻¹, 치환성 Mg는 1.53 cmol_c kg⁻¹로 배추 재배에 적합한 토양 화학성을 나타내었다.

Table 1. Soil chemical properties used in this experiment before transplanting.

pH	EC [†]	OM	Av.P ₂ O ₅	Ex.Cation		
				K	Ca	Mg
1:5, H ₂ O	dS m ⁻¹	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹		
6.8	0.29	19.3	329	0.42	7.12	1.53

[†]EC, Electrical conductivity; OM, organic matter, Av.P₂O₅, available phosphate.

라이시미터 설치 라이시미터에서 배추 재배를 위하여 직경 34.6 cm, 높이 38 cm 크기의 스테인레스 재질로 된 원형 용기를 사용하였다. 태양복사에 의한 토양 온도 상승을 막기 위하여 용기 내부에 1 mm 두께의 발포 플라스틱인 폼아트와 폴리에틸렌 재질 완충재를 각각 부착하였고, 용기 외부에는 사각 알루미늄 기둥을 세우고 빛 차단용 필름이 부착된 폴리카보네이트 판을 설치하였다. 용기 하단에는 과잉의 수분 배출을 위하여 40 mm 배수구를 설치 하고 토양 유실을 방지하기 위해 직경 10 mm 이하의 자갈을 20 mm 높이로 깔고 토양 40 kg을 충전하였다. 수분증발을 막기 위하여 배추를 식재한 후 수분공급용 튜브를 매설하고 0.05 mm 두께의 폴리에틸렌 비닐로 피복하였고 지온상승을 막기 위하여 1 cm 정도 복토를 하였다. 용기 하단에는 0.01%의 분해능을 가지는 20 kg 용량의 로드셀 (HBS-20L, CAS, Korea) 3개를 설치하고 로드셀의 신호는 별도의 증폭없이 데이터로거 (CR 1000, Campbell Sci., USA)에 연결하여 매 1분마다 측정하고 10분 간격 관측된 자료의 평균값을 기록하였다 (Fig. 1).

Fig. 1. Lysimeter diagram for measuring a transpiration of Kimchi cabbage.

증산량 및 미기상 관측 증산량 관측은 경상북도농업기술원 봉화약용작물연구소 유리온실 (폭 9.6 m × 길이 21 m × 높이 5.4 m)에서 수행을 하였다. 봄배추로 많이 재배되고 있는 ‘춘광’ 품종 (사카다코리아)을 시험작물로 사용하였으며, 72공 플러그 트레이에 원예용 상토를 넣은 후 파종하고 20일간 육묘하였다. 3월 5일 라이시미터에 배추를 정식하고 일주일간 활착시킨 후 4월 22일까지 증산량을 측정하였다. 라이시미터에서 10분 간격으로 측정한 무게 감소분을 증산량으로 간주하였고 관수는 증산의 변화가 낮은 일몰 이후에 수분감소율을 고려하여 주기적으로 실시하였다.

미기상 관측센서는 온실 중간지점 라이시미터 부근의 1.5 m 높이에 설치를 하여 라이시미터의 증산 관측자료와 관계를 분석하였다. 외부 기상환경이 온실의 미기상에 미치는 영향을 조사하기 위하여 연구소 기상관측 포장에 설치된 미기상 관측자료와 비교를 하였다. 기온과 상대습도는 HMP 155 센서 (Vaisala, Finland), 일사량은 CMP 6 센서 (Kipp & Zonen, The Netherlands)를 사용하였다. 배추의 엽온은 적외선 온도센서 (SI-431, Apogee, USA)를 사용하였으며 엽면적에 따라 0.2 - 0.45 m 높이로 조정하여 측정하였다. 대기 및 배추 표면의 수증기압은 Tetens식을 이용하여 산출하였다. (Eq. 1)과 같이 온도에 따른 포화수증기압을 구한 후 (Eq. 2)처럼 상대습도를 곱하여 수증기압을 산출하였다. 배추 잎의 포화수증기압은 잎 표면온도를 측정하여 산출하였다. 수증기압 차이는 (Eq. 3)과 같이 대기의 수증기압에서 배추 잎 표면의 포화수증기압을 뺀 값으로 하였다.

$$P_s = 0.61078 \exp \left(\frac{17.269 T}{237.30 + T} \right) \quad (\text{Eq. 1})$$

$$P_a = \left(\frac{P_s \times RH}{100} \right) \quad (\text{Eq. 2})$$

$$VPD = P_{a_{\text{air}}} - P_{s_{\text{cabbage}}} \quad (\text{Eq. 3})$$

P_s : the saturation vapor pressure (kPa)

P_a : the vapor pressure (kPa)

T : Temperature (°C)

RH : Relative humidity (%)

VPD : Vapor pressure deficit (kPa)

식물체 및 엽면적 분석 배추의 탄소함량은 지상부와 지하부로 나누어 수확하고 수돗물로 세척한 후 80°C 열풍 건조기에서 48시간 건조시켰으며 건조된 시료를 분쇄하여 균질화 된 시료를 원소분석기 (Variomax Cube, Elementar, Germany)로 분석하였다.

배추의 엽면적 변화 분석을 위하여 5,616 × 3,744 Pixel의 출력 해상도를 가지는 디지털 카메라를 이용하여 정사영상을 촬영하였다. 엽면적 분석을 위해 Image J 소프트웨어 (NIH, USA)를 사용하여 이미지 분석을 하였으며 태양에 의해 잎 표면에서 반사되는 빛의 변이를 최소화하기 위하여 일몰 이후에 촬영하여 영상 이미지를 획득, 이미지 문턱값 (Threshold) 조절, Pixel 분석의 순으로 처리하여 엽면적을 구하였다.

Results and Discussion

재배기간의 기상 관측 배추 재배기간의 기상변화를 조사한 결과는 Fig. 2와 같았으며 3월 13일부터 4월 22일 까지 평균 기온은 14.8°C였고 최고기온은 49.6°C, 최저기온은 -1.8°C를 나타내었고 평균 일교차는 26.8°C로 최대 일교차는 42.2°C, 최저 일교차는 15.2°C로 재배기간 동안 일교차가 잘 나타나는 날씨상태를 보였다. 상대습도는 평균 41.9%로 다소 건조한 상태였으나 기온과 마찬가지로 일교차가 매우 잘 나타났다.

일사량은 4월 10일, 4월 14일, 4월 19일을 제외하고 전형적인 맑은 날의 뾰족한 종모양의 일사형태를 나타내었으며 일 최대 일사량은 4월 17일에 734 W m^{-2} 로 관측되었다. 배추 잎 표면에서 대기중으로 수증기 확산 정도를 평가하기 위하여 수증기압 차이를 분석한 결과, 배추 잎 표면과 대기중 수증기압 차이는 평균 1.45 kPa였고 최대 수증압 차이는 4월 19일에 7.93 kPa로 잎 표면에서 대기중으로 수증기가 확산되는 조건이 많았으나 최저 수증기압 차이는 -0.55 kPa로 일사가 없는 야간에 수증기가 잎으로 응결되는 조건도 형성되었다.

온실에서는 차광시설과 창호 등에 의한 그림자가 발생하게 된다. 온실내 설치된 일사계는 그림자에 의한 일사가 차단될 수 있으나 라이시미터에서 성장하는 배추는 일부만 그림자가 생겨 일사량 관측 자료와 배추로 유입되는 단파복

Fig. 2. Daily changes of air temperature (A), relative humidity (B), solar radiation (C) and vapor pressure deficit (D) during the experiment period.

Fig. 3. Correlation between the outside and the greenhouse for air temperature (A), solar radiation (B), respectively.

사량은 달라질 수 있다. 시설 내 구조물 종류에 따른 복사 특성과 환기여부에 따라 온도 변화는 외부 기온과 상이할 수 있으므로 봉화약용작물연구소의 기상을 대표하는 곳에 설치된 기상관측 포장의 자료와 온실 내 관측자료를 비교하였다 (Fig. 3).

온실 안의 기온과 외부 기온은 결정계수가 0.8113으로 선형적인 관계를 나타내었으며 기울기는 1.150으로 외부 기온보다 온실 안에서 높은 경향이였다. 일사량은 결정계수가 0.9424로 매우 높은 선형관계를 보였으며 기울기는 0.662로 온실 내로 유입되는 빛이 약 34% 정도 감소하는 것으로 나타났다.

배추 엽면적 변화 정식 전 배추의 엽면적은 9.3 cm^2 이었으며 재배기간중 경시적 엽면적 변화는 Fig. 4, Fig. 5와 같았다. 라이시미터 2개소에 설치된 배추의 엽면적은 3월 13일 (정식 10일)에 배추 1 처리는 18.6 cm^2 , 배추 2 처리 18.3 cm^2 이었고 3월 18일은 각각 $81.9, 72.8 \text{ cm}^2$, 3월 25일은 $339.5, 257.2 \text{ cm}^2$, 4월 4일은 $963.6, 726.4 \text{ cm}^2$ 였으며 4월 11일은 $1,067.3, 877.0 \text{ cm}^2$, 수확일인 4월 22일은 $1,424.3, 1192.6 \text{ cm}^2$ 로 3월 25일에서 4월 4일경 급격한 엽면적 증가가 있었다. 온실 구조물의 그늘에 의해 일사유입이 다소 낮은 배추 2 처리의 엽면적이 초기에는 다소 작았으나 생육일수 경과에 따라 엽면적 증가로 복사 차단용 폴리카보네이트 판에 배추 잎이 접촉되는 것을 방지하기 위하여 배추

Fig. 4. Changes in the leaf area of Kimchi cabbage grown in lysimeter during the experiment period.

Fig. 5. Kimchi cabbage growth for the experiment period.

하단을 끈으로 고정을 시켰는데 배추 상단에서 촬영한 평면 넓이가 상이하여 수확시에 배추 2 처리의 엽면적이 넓게 분석되었다.

일반적으로 작물 성장량을 정량적으로 예측하기 위해서 광합성이 이루어지는 엽면적의 경시적 변화를 추정하는데, 시간에 따라서 증가하는 작물의 생장은 세포의 증식 또는 성장을 평가하는 함수인 ‘Logistic growth function’을 주로 사용한다 (Byrne, 1981; Ahn et al., 2014). 본 연구에서도 배추의 엽면적 변화는 Fig. 4의 결과와 같이 재배기간에 따라 ‘Logistic growth function’와 잘 일치하는 증가를 나타내었으며 ($r^2 = 0.9964$), 4월 11일 이후에는 엽면적 증가로 재배용기를 완전히 피복을 하였다 (Fig. 5). 배추 1 처리, 배추 2 처리는 동일한 엽면적 증가를 보였다.

증산량 평가 배추의 경시적 증산율을 분석한 결과는 Fig. 6과 같았다. 일사가 없는 야간에는 증산이 거의 없었으며 일출과 함께 증가하고 다시 감소하는 일 변화 특성을 나타내었으며 생육기간 동안 유사한 양상을 나타내었다. 생육 초기인 3월 13일에서 3월 17일의 최대 증산율은 배추 1 처리에서 9.9 g h^{-1} , 배추 2 처리는 23.2 g h^{-1} 이었으나 평균 값은 각각 $0.8, 0.7 \text{ g h}^{-1}$ 로 비슷한 수준이었고 3월 18일에서 3월 25일까지는 최대 증산율이 각각 $18.1, 33.8 \text{ g h}^{-1}$ 이나 평균 값은 $1.8, 1.5 \text{ g h}^{-1}$ 로 유사한 경향을 나타내었다. 엽면적의 급격한 증가를 나타낸 3월 26일에서 4월 5일까지의 최대 증산율은 각각 $61.4, 61.6 \text{ g h}^{-1}$ 으로 크게 증가하였고 4월 6일부터 4월 11일은 $89.1, 82.5 \text{ g h}^{-1}$, 4월 12일에서 4월 22일은 $136.7, 129.0 \text{ g h}^{-1}$ 이었으며, 생육단계의 경과에 따른 배추의 엽면적이 증가함에 따라 증산율도 높아지는 경향을 보였다.

복사 유입 등 온실의 환경이 라이시미터 설치 위치에 따라 다소 차이가 날 수 있으므로 처리간 증산율 변화에 대한 상관관계 분석을 실시하였다 (Fig. 7). 기울기 값은 1.053, 결정계수는 0.9250으로 유의한 선형적 관계를 나타내어 온실에서 위치를 따른 환경조건이 다소 상이하더라도 동일한 증산반응을 나타내는 것으로 조사되었다.

Fig. 6. Daily changes in the transpiration rate of Kimchi cabbage during the experiment period.

Fig. 7. Correlation of transpiration rate between Kimchi cabbages cultivated in different lysimeters.

단위 엽면적당 하루 동안의 증산량 변화를 비교한 결과는 Fig. 8과 같았으며 배추 1 처리는 $0.28 - 0.63 \text{ g cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$, 배추 2 처리는 $0.38 - 0.67 \text{ g cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 의 범위를 보였으며 재배기간중 단위 엽면적당 하루 동안 증산량은 $0.46 \pm 0.13 \text{ g cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 으로 처리간 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

태양복사 에너지 유입이 배추의 증산에 미치는 영향을 평가하기 위하여 태양복사 에너지가 배추의 증산에 미치는 영향을 조사하였다. 단위 엽면적당 증산량은 큰 차이가 없지만 성장에 따른 엽면적 증가로 태양복사 에너지의 유입 면적이 증가하게 된다. 따라서 일사 유입량에 엽면적을 곱하여 배추 잎의 수광 면적을 보정하였고 하루 동안 누적 일사량에 따른 일 증산량 변화를 조사하였다 (Fig. 9). Fig. 4의 엽면적 변화와 같이 재배기간이 경과할수록 하루 동안의 누적 일사량이 증가하였다. 3월 13일부터 3월 17일 까지의 하루 동안의 증산량은 배추 1 처리에서 $5.8 - 36.8 \text{ g h}^{-1}$, 배추 2 처리는 $2.9 - 32.4 \text{ g day}^{-1}$ 의 범위를 보였고 3월 18일부터 3월 25일까지는 각각 $8.7 - 75.0 \text{ g day}^{-1}$, $11.5 - 63.5 \text{ g day}^{-1}$ 이고 3월 26일부터 4월 5일까지 각각 $81.5 - 350.1 \text{ g day}^{-1}$, $50.4 - 323.6 \text{ g day}^{-1}$ 으로 증가하였고 4월 6일부터 4월 11일은 $154.8 - 542.0 \text{ g day}^{-1}$, $155.5 - 461.6 \text{ g day}^{-1}$ 이었으며 4월 12일부터 4월 22일은 $198.2 - 857.0 \text{ g day}^{-1}$, $184.3 - 869.5 \text{ g day}^{-1}$ 을 나타내었다. 배추의 증산은 일사량의 변화와 동일한 양상으로 변화를 하였으므로 일사조건과 밀접한 관계를 가지는 것으로 조사되었다.

Fig. 8. Changes in the daily transpiration of Kimchi cabbage per leaf area during the experiment period.

Fig. 9. Changes in the transpiration of Kimchi cabbages from lysimeter and solar radiation. Solar radiation of given area was corrected for logistics regression of leaf area growth calculated by the following equation : $leaf\ area =$

$$\frac{1,515.694}{1 + (days \div 3.045)^{-3.578}}, r^2 = 0.9964.$$

배추의 기온에 따른 생장반응 모형개발 연구 결과 (Kim and Yun, 2015), 봄배추로 널리 재배되는 ‘춘광’은 생육도 일 (Growing degree days)이 478 - 724이었고 (Wi et al., 2018) 고온에서는 수분이용효율이 감소하고 엽록소 형광반응의 저하, 무름병 발생 증가 (Oh et al., 2014) 등의 많은 연구가 수행되어 온도는 배추의 생육과 밀접한 관계를 가지고 있다. 기온과 일사량이 배추의 증산에 미치는 영향을 조사한 결과는 Fig. 10과 같았다. 처리간 증산율 편차가 적고 환경변화에 따른 충분한 증산량을 가지는 4월 19일부터 4월 22일 동안 4일간 기온변화에 따른 증산량을 분석하였으며 일출 후에 기온이 높아짐에 따라 증산량도 높아지는 경향을 나타내었지만 하루중 최고기온을 나타낼 때 증산이 낮아지는 경향을 보였다. 배추 1 처리는 4월 20일 12시 10분에 증산율이 가장 높았는데 이때 기온은 17.0°C였고 배추 2 처리는 13시 10분에 가장 높았고 기온은 19.4°C였다. 4월 21일은 각각 11시 10분, 11시에 가장 높은 증산을 보였고 기온은 19.7, 19.3°C를 나타내었고 4월 22일은 각각 11시 10분, 10시 40분에 가장 증산이 높았고 기온은 22.7, 21.8°C로 기온이 17 - 23°C의 범위가 가장 좋은 것으로 조사되었다.

배추의 증산은 일출과 동시에 일사가 증가함에 따라 증산율이 높아졌고 일몰과 함께 증산율은 낮아지는 경향을 보여 기온보다 일사량이 증산에 큰 영향을 미치는 것으로 관측되었다 (Fig. 10). Lee and Haginoya (2011)는 잔디로 피복된 토양에서 증발산량의 실시간 변화량을 증량식 라이시미터로 관측한 결과 일사량이 증가할 때 증발산량이 증가하고 일사량 감소시 증발산량이 동시에 감소하여 일사량과 증발산량의 결정계수는 0.9470로 매우 유의한 상관관계를 나타내었으며 단파복사량의 46%가 증발산 에너지로 변환된다고 하였다. 해발 고도별 증발산량 관측시 단파복사량과 증발산량은 결정계수 0.8885로 선형적인 관계였으며 (Lee et al., 2012), 약용작물인 천궁 (*Cnidium officinale* Makino)은 기온에 따라 증발산량이 증가하는 경향을 나타내지만 결정계수는 0.2260로 관련성이 낮았고 풍속의 결정

Fig. 10. Changes in the transpiration rate of Chinese cabbages according to air temperature and solar radiation during cultivation from April 19 to April 22 in 2019.

계수는 0.6400, 일사량은 0.7778로 높은 상관관계를 보였다 (Seo et al., 2018). 증발산량은 600 W m^{-2} 까지 선형적으로 증가를 하고 그 이상에서는 증가가 없어 일사량의 약 40% 정도를 증발산 에너지로 변환하므로 고온 조건에서 잎 표면으로 입사되는 복사에너지가 과다하게 높아질 경우 엷은 상승에 따른 생리장해 발생과 생육 불량 현상을 초래하므로 일사량을 조절하는 것이 필요하다고 하였다. 온실 구조물의 그림자에 의해 수광면적이 달라져 배추 1 처리와 배추 2 처리의 일사량 피크가 상이한 양상을 보였지만 최대 일사량은 비슷한 수준을 나타내었다. 일사량이 149 W m^{-2} 로 낮은 4월 19일의 최대 증산율은 32.7 g h^{-1} 였으나 4월 20일, 21일, 22일에는 최대 일사량이 각각 648, 573, 651 W m^{-2} 로 최대 증산율은 122.4, 97.9, 133.8 g h^{-1} 로 일사가 강해짐에 따라 증산이 증가하여 일사량 관측으로 일정 기간 동안의 증산량 추정이 가능할 것으로 사료되었다.

건물 생산량, 탄소 축적량 및 증산량의 관계 재배기간 동안 배추의 건물생산량, 탄소축적량 및 총 증산량을 조사한 결과는 Table 2의 결과와 같았다. 지상부 생체중은 배추 1 처리 489.62 g, 배추 2 처리는 503.08 g이었고 건물 생산량은 배추 1 처리의 지상부는 34.15 g, 지하부는 1.15 g이었고, 배추 2 처리에서는 각각 34.20, 0.95 g으로 총 탄소량은 배추 1 처리는 13.78 g, 배추 2 처리 13.00 g로 조사되었다. 재배기간 동안의 총 증산량은 각각 11,041, 10,267 $\text{H}_2\text{O g}$ 이었고 배추의 생체에 포함된 물을 계산하면 각각 454,32, 467,93 g이었으며, 총 증산량에 대하여 건물 생산량의 평균 비율은 0.33%, 지하부를 제외한 지상부 생체량의 비율은 4.67%, 탄소 축적량의 비율은 0.13%로 조사되었다.

일반적으로 광합성 반응식은 $6 \text{ CO}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{ O}_2$ 로 표현되는데 본 연구에서는 생체에 함유된 수분은 평균 25.62 mol이었고 증산을 통해 배출된 수분은 591.89 mol로 조사되었다. 배추의 탄소 축적량은 1.12 mol로 산출되었으며 재배기간 동안 배추의 광합성 반응식은 아래 (Eq. 4)와 같이 표현될 수 있다.

WC : Water content of fresh Kimchi cabbage ($\text{H}_2\text{O mol}$)

TR : Water content by transpiration ($\text{H}_2\text{O mol}$)

따라서 배추의 재배과정중 흡수된 수분의 약 96%가 증산에 의한 잠열 에너지로 방출되므로 식물체내 열 소산 반응에 대부분 이용되는 것으로 나타났다.

Table 2. Biomass production, carbon content and total transpiration of cabbages from March 13 to April 22 in 2019.

Cabbage	F.W [†]		D.W.		C concentration		C content			Total transpiration
	Leaf	Leaf	Root	Leaf	Root	Leaf	Root	Sum		
	----- g plant ⁻¹ -----			----- % -----		----- g plant ⁻¹ -----				
1	489.62	34.15	1.15	39.0	40.3	13.32	0.46	13.78	11,041	
2	503.08	34.20	0.95	34.8	42.9	11.90	0.41	12.31	10,267	

[†]F.W., fresh weight; D.W., Dry weight; C concentration, total carbon concentration

Conclusions

본 연구에서는 중량식 라이시미터를 이용하여 배추의 증산량을 평가하고 탄소 축적량과의 관계를 분석하였다. 배추의 증산량 변화는 일출이 시작됨과 동시에 증가하였고 일몰과 함께 감소하였으며, 엽면적이 커짐에 따라 증산량은 증가하였고 단위 엽면적 증산량은 $0.46 \text{ g cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 로 일정한 수준이었고 최대 증산량을 나타낸 온도는 $17 - 23^{\circ}\text{C}$ 의 범위였으나, 하루 동안의 누적 증산량과 증산율의 일 변화는 일사량에 따라 변화하므로 일사가 증산에 영향을 미치는 가장 중요한 요인이었다. 재배기간 동안의 총 증산량에 대한 건물 생산량의 비율은 0.33%, 지상부 생체량은 4.67%, 탄소 축적량은 0.13%로 계산되어, 증산량을 관측하여 생장해석이 가능한 것으로 사료되고 재배기간 동안 흡수된 물의 96%는 증산에 의해 식물체내 열 소산 반응에 이용되는 것으로 평가되었다. 따라서 라이시미터는 높은 정확도로 배추의 실시간 증산량 관측이 가능한 것으로 확인되었고 배추의 생장해석에 매우 유용할 것으로 사료된다.

Acknowledgement

The author wishes to acknowledge Dr. Lee, Hyunsuk from HQ Tech, Co., Inc. for his indispensable remarks and technical assistance of Lysimeter.

References

- Ahn, J.H., K.D. Kim, and J.T. Lee. 2014. Growth model of Chinese cabbage in an alpine area. *Korean J. Agric. Forest Meteor.* 14:309-315.
- Bakhtiari, B., N. Ghahreman, A.M. Lighat, and G. Hoogenboom. 2011. Evaluation of reference evapotranspiration models for a semiarid environment using lysimeter measurements. *J. Agric. Sci. Tech.* 13:223-237.
- Bello, Z.A. and L.D. Van Rensburg. 2017. Development, calibration and testing of low cost small lysimeter for monitoring evaporation and transpiration. *Irrigation and Drainage.* 66:263-272.
- Byrne, G.F. 1981. Fitting a growth curve equation to field data. *Agric. Meteor.* 22:1-9.
- Colaizzi, P.D., S.A. O'Shaughnessy, S.R. Evett, and R.B. Mounce. 2017. Crop evapotranspiration calculation using infrared thermometers aboard pivots. *Agric. Water Manag.* 187:173-189.
- Djaman, K., M. O'Neill, C.K. Owen, D. Smeal, K. Koudahe, M. West, S. Allen, K. Lombard, and S. Irmak. 2018. Crop evapotranspiration, irrigation water requirement and water productivity of maize from meteorological data under semiarid climate. *Water.* 10:405-422.
- Ghafouri-Azar, M., D.H. Bae, and S.H. Kang. 2018. Trend analysis of long term reference evapotranspiration and its components over the Korean peninsula. *Water.* 10:1373-1391.
- Han, J.S. and B.Y. Lee. 2005. Measurements and analysis of free water evaporation at Haenam paddy field. *Korean J. Agric. Forest Meteor.* 7:91-97.
- Hong, J.K., H.J. Kwon, J.H. Lim, Y.H. Byun, J. Lee, and J. Kim. 2009. Standardization of KoFlux eddy covariance data processing. *Korean J. Agric. Forest Meteor.* 11:19-26.
- Hu, X.L., L.S. Shi, L.Lin, B.Z. Zhang, and Y.Y. Zha. 2018. Optical based and thermal based estimation surface conductance and actual evapotranspiration estimation study in the North China Plain. *Agric. Forest Meteor.* 263:449-464.
- Hur, S.O., K.H. Jung, S.K. Ha, and J.G. Kim. 2006. Evaluation of meteorological elements used for reference

- evapotranspiration calculation of FAO Penman-Monteith Model. Korean J. Soil Sci. Fert. 39:274-279.
- Jeon, M.J., W.H. Nam, E.M. Hong, S.A. Hwang, J.H. Ok, H.R. Cho, K.H. Han, K.H. Jung, Y.S. Zhang, and S.Y. Hong. 2019. Comparison of reference evapotranspiration estimation methods with limited data in South Korea. Korean J. Agric. Sci. 46:137-149.
- Kim, D.J., K.H. Han, Y.S. Zhang, H.R. Cho, J.H. Ok, K.S. Choi, and J.S. Choi. 2018. Evaluation of evapotranspiration in difference paddy soils using weighable lysimeters before flooding stage. Korean J. Soil Sci. Fert. 51:510-521.
- Kim, J.H. and J.I. Yun. 2015. A thermal time based phenology estimation in Kimchi cabbage (*Brassica campestris* L. ssp. *Pekinensis*). Korean J. Agric. Forest Meteor. 17:333-339.
- Kim, K.D., J.T. Suh, J.N. Lee, D.L. Yoo, M. Kwon, and S.C. Hong. 2015. Evaluation of factors related to productivity and yield estimation based on growth characteristics and growing degree days in highland Kimchi Cabbage. Korean J. Hortic. Sci. Technol. 33:911-922.
- Kwon, H.J., J.H. Lee, Y.K. Lee, J.W. Lee, S.W. Jung, and J. Kim. 2009. Seasonal variations of evapotranspiration observed in a mixed forest in the Seolmacheon catchment. Korean J. Agric. Forest Meteor. 11:39-47.
- Kwon, H.J., S.B. Park, M.S. Kang, J.I. Yoo, R. Yuan, and J. Kim. 2007. Quality control and assurance of eddy covariance data at two KoFlux sited. Korean J. Agric. Forest Meteor. 9:260-267.
- Lee, B.Y. and S. Haginoya. 2011. The latent heat exchange on the ground. J. Environ. Sci. 20:1061-1068.
- Lee, B.Y., S.K. Yang, K.H. Kwon, and J.B. Kim. 2012. The effect of evapotranspiration by altitude and observation of lysimeter. J. Environ. Sci. 21:749-755.
- Lee, G.S., S.W. Kim, S.Y. Hamm, and K.H. Lee. 2016. Computation of actual evapotranspiration using drone based remotely sensed information; preliminary test for a drought index. J. Environ. Sci. Inter. 25:1653-1660.
- Lee, S.G., H.J. Lee, S.K. Kim, S.T. Park, Y.A. Jang, and K.R. Do. 2015. Effect of vernalization, temperature and soil drying periods on the growth and yield of Chinese cabagge. Korean J. Hortic. Sci. Technol. 33:820-828.
- Li, M., R.H. Chu, A.M.T. Islam, and S. Shen. 2018. Reference evapotranspiration variation analysis and its approaches evaluation of 13 empirical models in sub humid and humid regions: a case study of the Huai river basin, eastern China. Water. 10:493-515.
- Lim, Y.J., K.Y. Byun, T.Y. Lee, and J. Kim. 2010. Evaluation of evapotranspiration estimation using Korea land data assimilation system. Korean J. Agric. Forest Meteor. 12:298-306.
- Moon, K.H., E.Y. Song, S.H. Wi, and S.J. Oh. 2018. Development of Chinese Cabbage model using Mocrosoft Excel/VBA. Korean J. Agric. Forest Meteor. 20:228-232.
- NAAS. 2011. Soil and plant analysis. National Institute of Agricultural Science, RDA, Suwon, Korea.
- Oh, S.J., K.H. Moon, I.C. son, E.Y. Song, Y.E. Moon, and S.C. Koh. 2014. Growth, photosynthesis and chlorophyll fluorescence of chines cabbage in response to high temperature. Korean J. Hort. Sci. 32:318-329.
- Ok, J.H., K.H. Han, Y.J. Lee, Y.S. Zhang, H.R. Cho, S.A. Hwang, S.S. Kim, J.H. Lee, and D.J. Kim. 2018. Water balance for Chinese cabbage in spring season with difference upland soils evaluated using weighable lysimeters. Korean J. Soil Sci. Fert. 51:555-563.
- Rana, G. and N. Katerji. 2000. Measurements and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate. European J. Agron. 13:125-153.
- Renner, M., C. Brenner, K. Mallick, H.D. Wizemann, L. Conte, I. Trebs, J. Wei, V. Wulfmeyer, K. Schulz, and A. Kleidon. 2019. Using phase lags to evaluate model biaes in simulating the diurnal cycle of evapotranspiration : a case study in Luxembourg. Hydrol. Earth Syst. Sci. 23:515-2019. <https://doi.org/10.5194/hess-23-515-2019>.
- Schrader, F., W. Durner, J. Fank, S. Gebler, T. Putz, and M. Hannes. 2013. Estimating precipitation and actual evapotranspiration from precision lysimeter measurements. Proc. Environ. Sci. 19:543-552.
- Seo, M.J., K.H. Han, H.R. Cho, J.H. Ok, Y.S. Zhang, Y.H. Seo, K.H. Jung, H.S. Lee, and G.S. Kim. 2017. Interpreting in situ soil water characteristics curve under different paddy soil types using undisturbed lysimeter with soil sensor.

- Korean J. Soil Sci. Fert. 50:336-344.
- Seo, M.J., K.H. Han, K.H. Jung, Y.S. Zhang, and S.Y. Choi. 2016. Effect of temperature and plow pan on water movement in monolithic weighable lysimeter with paddy sandy loam soil during winter season. Korean J. Soil Sci. Fert. 49:300-309.
- Seo, Y.H., S.J. Lim, S.J. Heo, B.S. Yoon, S.Y. Hong, Y.H. Park, and D.K. Hong. 2019. Modification of Hargreaves equation coefficient to estimate reference evapotranspiration in Gangwondo. Korean J. Soil Sci. Fert. 52:1-10.
- Seo, Y.J., H.H. Nam, W.C. Jang, J.S. Kim, and B.Y. Lee. 2018. Effect of meteorological factors on evapotranspiration change of *Cnidium officinale* Makino. Korean J. Agric. Forest Meteor. 20:366-375.
- Son, I.C., K.H. Moon, E.Y. Song, S.J. Oh, H.H. Seo, Y.E. Moon, and J.Y. Yang. 2015. Effects of differentiated temperature based on growing season temperature on growth and physiological response in Chinese cabbage 'Chunkwang'. Korean J. Agric. Forest Meteor. 17:254-260.
- Steiner, J.L., T.A. Howell, and A.D. Schneider. 2018. Lysimetric evaluation of daily potential evapotranspiration models for grain sorghum. Agron. J. 83:240-247.
- Tyagi, N.K., D.K. Sharma, and S.K. Luthra. 2000. Determination of evapotranspiration and crop coefficients of rice and sunflower with lysimeter. Agric. Water Manag. 45:41-54.
- Wi, S.H., E.Y. Song, S.J. Oh, I.C. Son, S.G. Lee, H.J. Lee, B.H. Mun, and Y.Y. Cho. 2018. Estimation of optimum period for spring cultivation of 'Chunhwang' Chinese cabbage based on growing degree days in Korea. Korean J. Agric. Forest Meteor. 20:175-182.
- Yan, H.F., S.J. Acquah, C.A. Zhang, G.Q. Wang, S. Huang, H.N. Zhang, B.S. Zhao, and H.M. Wu. 2019. Energy partitioning of greenhouse cucumber based on the application of Penman-Monteith and bulk transfer models. Agric. Water Manag. 217:201-211.
- Yun, S.K., S.O. Hur, S.H. Kim, S.J. Park, J.B. Kim, and I.M. Choi. 2009. Prediction of evapotranspiration from grape vein in Suweon with FAO Penman-Monteith equation. Korean J. Agric. Forest Meteor. 11:111-117.