

기온과 작물 잎 및 토양 표면온도의 변화양상 분석

이병국* · 정필균* · 이우균** · 임철희** · 엄기철**

*세종데이터해석연구원, **고려대학교 환경생태공학과

Changes in Air Temperature and Surface Temperature of Crop Leaf and Soil

Lee, Byung-Kook*, Jung, Pil-Kyun*, Lee, Woo-Kyun**, Lim, Chul-Hee** and Eom, Ki-Cheol*†

*Sejong Institute of Data Analysis, Suwon 443-766, Korea

**Dept. of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

ABSTRACT

Temperature is one of the most important factors affecting crop growth. The diurnal cycle of the scale factor [Tsc] for air temperature and the surface temperature of crop leaf and soil could be estimated by the following equation : $[Tsc]=0.5 \times \sin(X+C)+0.5$. The daily air temperature (E[Ti]) according to the E&E time [X] can be estimated by following equation using average (Tavg), maximum (Tm) and minimum (Tn) temperature : $E[Ti]=Tn+(Tm-Tn) \times [0.5 \times \sin(X+(9.646 Tavg+703.65))+0.5]$. The crop leaf temperature in 24th June 2014 was high as the order of red pepper without mulching > red pepper with mulching > soybean under drought > soybean with irrigation > Chinese cabbage. The case in estimating crop leaf surface temperature using air temperature and soil surface temperature was lower in the deviation compared to the case using air temperature for Chinese cabbage and red pepper. These results can be utilized for the crop models as input data with estimation.

Key Words: Crop Leaf Surface Temperature, Soil Surface Temperature, Scale Factor

1. 서 론

자연현상을 연구함에 있어 온도라는 요인은 어느 분야에서도 빼놓을 수 없는 중요한 요인이라 해도 과언이 아닐 것이다. 기후변화와 관련된 현상 분석을 위한 모형(Model)의 활용에서도 온도 요인은 필수 입력요인이다(Watson & Challinor, 2013; Ye *et al.*, 2013; Kim *et al.*, 2014). 특히 기후의 영향을 절대적으로 받는 농업분야에서는 많은 작물 모형(Crop Model)이 개발되어 활용되고 있으며(Wiliams *et al.*, 1984; Brisson *et al.*, 2003; Jones *et al.*, 2003; Challinor *et al.*, 2005; Bhatia *et al.*, 2006; Challinor *et al.*, 2007; Challinor *et al.*, 2009; Bal-kovic *et al.*, 2013), 지구온난화는 작물생육에 긍정적인 면도 있으나, 부정적 영향을 받을 것으로 예측되기도 한다(Lobell *et al.*, 2008; Lim, 2013; IPCC, 2014; Lim *et al.*, 2015).

대기-식물-토양의 연속 계는 시기별뿐 아니라, 하루 중에도

시시각각 태양열의 flux가 달라 그 온도 또한 시시각각 변하고 있다. 태양복사에 의해 전달된 열은 대기-식물-토양의 연속 계에서 그 열 교환 작용과 함께 상호 높은 연관성을 갖고 변하게 된다. 대기-식물-토양의 연속 계에서 열 이동의 원동력은 상호간의 온도 차이이므로 기온, 식물 및 토양의 온도 변화 양상을 구명함은 매우 중요하다고 할 수 있다(Eom *et al.*, 2014).

특히, 작물 재배지의 토양 온도는 작물 생육에 영향을 미치는 가장 중요한 요인 중 하나이다.

작물 흡수(吸水)를 위한 토양양분의 용해 정도는 토양온도 상태에 따라 크게 달라지며, 토양수분의 밀도와 점도(viscosity)는 토양온도에 따라 달라지므로, 토양수분특성곡선(soil moisture characteristic curve) 및 Hydraulic conductivity function은 토양 온도의 영향을 크게 받는다. 또한 토양온도는 토양과 대기의 경계면(토양 표면)에 영향 주는 기상 상황의 변화에 의하여 끊임없이 변하고 있다(Lal & Shukla, 2004).

† Corresponding author : kceom6578@hanmail.net

Received August 19, 2015 / Revised September 7, 2015(1st), September 14, 2015(2nd) / Accepted September 21, 2015

작물의 온도 또한 내부 열 흐름과 함께 대기와의 경계면에 복사되는 태양열 및 토양으로부터 반사되는 반사열 등 여러 요인에 의하여 변하지만, 이 흐름의 결과로 나타나는 것이 작물 잎 표면 온도라고 볼 수 있으므로, 작물 잎 표면온도는 기온과 토양 표면온도와 함께 작물 생육뿐만 아니라, 기상학적 차원에서도 대단히 중요한 의미를 갖는다고 할 수 있다.

온도 변화를 연구함에 있어 그 절대적인 온도의 변화양상은 지역별, 시기별 및 작물별로 그 양상이 사뭇 다르게 나타난다. 이와 같은 경우 이들을 상대 비교가 가능토록 하는 방법 중 하나가 scaling technique(Hillel & Erick, 1990; Eom & Eom, 2008; Eom & Eom, 2013)이며, 이는 어느 일정한 조건에서 측정된 온도의 변화 양상이 다른 조건에서도 적용될 수 있는 변환계수 즉 scale factor를 구하여 이를 기준치로 삼아 비교 분석하는 방법이다.

따라서 본 연구에서는 기상대의 기온 data와 함께 5개 공식작물의 포장 재배시험을 통하여 작물 잎 표면온도 및 토양 표면온도를 monitoring하여 그 변화 양상에 대하여 상호 비교 분석하고, 아울러 기온과 토양 표면온도를 이용하여 작물 잎 표면온도를 추정코자 하였으며, 또한 scale factor를 이용하여 이들 온도의 일중 변화 양상을 구명코자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 기온과 작물 잎 및 토양 표면온도 조사

본 연구에서 기온은 시험 장소인 수원시의 기상 조건을 대표하는 수원기상대에서 측정하여 제공한 Data를 이용하였다.

작물 잎의 온도 측정을 위해서는 thermocouple(Scott, 2000; Lal & Shukla, 2004) 등 고가의 장비와 세밀한 측정 기술이 필요하나, 작물 잎 표면온도를 경시적으로 측정하기에는 부적합하며, 적외선 온도계 등 간편한 측정 기구를 이용한 수동적 측정 방법이 주로 이용되고 있으므로(Eom & Eom, 2013), 본 연구에서는 적외선 온도계(model : SK-8700 II)를 이용하여 작물 잎 표면온도와 토양 및 비닐 표면온도를 측정하였다.

작물 잎 표면온도 측정은 2014년 수원시 당수동 포장에서 약 2~3일 간격으로 오전 10시에 측정 피사체의 거리는 약 30 cm로 측정 표면과 직각에서 개체 당 5반복으로 측정하였다

콩(품종 : 대원)은 6월 1일 파종하여, 무 강우일이 7일 이상인 경우 20 mm씩 관개한 관개 처리구와 관개를 하지 않고 자연강우에 의존한 한발 처리구를 두고 6월 16일부터 수확일 10월 28일까지 135일 동안, 배추(품종 : 춘광)는 5월 25일 정식하여 6월 8일부터 7월 7일 수확까지 30일 동안, 고추(품종 : PR 일거양득)는 5월 23일 정식하여 노지 재배구와 흑색 비닐

멀칭 재배구를 두고 6월 8일부터 9월 5일까지 90일 동안 작물 잎 표면온도와 토양 및 비닐 표면온도를 측정하였다.

작물 잎 표면온도와 토양 및 비닐 표면온도의 일중변화 측정은 동 포장에서 6월 24일 08:00 부터 6월 25일 08:00 까지 24시간 동안 45분 간격으로 측정하였다.

2.2 Data 해석의 이론적 배경

본 연구에서 대기와 작물 잎 및 토양의 온도 변화는 장기적으로 Fig. 1과 같이 변해가며, 일중 변화는 Fig. 1의 1개 cycle의 형태인 sine 함수로 나타낼 수 있다는 연구 결과(Lal, 2004)에 그 근거를 두고, 식 (1)과 같은 sine 함수를 이용한 온도 변화 추정식을 설정하였다.

$$T(X) = a \times \sin[b \times (X + C)] + d \tag{1}$$

(단, X 는 julian date or E&E time(Eom & Eom, 2013), a , b , C , d 는 계수 임)

조사된 온도 요인별 상호 상관 분석은 회귀상관분석법에 의하였으며, 기온($T[A]$), 작물 잎 표면온도($T[L]$), 토양 표면온도($T[S]$) 및 멀칭 비닐 표면온도 ($T[V]$), 기온과 작물 잎 표면온도의 차이($T[A-L]$), 토양 표면온도와 기온의 차이($T[S-A]$), 토양 표면온도와 작물 잎 표면온도의 차이($T[S-L]$) 비닐 표면온도와 기온의 차이($T[V-A]$), 비닐 표면온도와 작물 잎 표면온도의 차이($T[V-L]$) 등을 변량으로 하여 상호 관련성을 분석하여 작물별 온도 요인 간 상호 상관계수 matrix를 작성하였다.

작물 잎 표면온도를 추정하기 위하여, (i) 기온과 작물 잎 표면온도의 상관회귀식 (2)를 이용한 경우와 (ii) 토양 표면온도와 기온의 차이($T[S-A]$)와 토양 표면온도와 작물 잎 표면온도

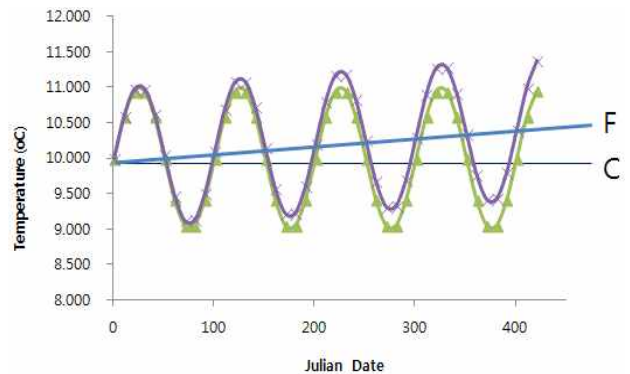


Fig. 1. Schematic of annual and diurnal change pattern in temperature.

와의 차이(T[S-L])의 상관회귀식 및 비닐 표면온도와 기온의 차이(T[V-A])와 비닐 표면온도와 작물 잎 표면온도와의 차이(T[V-L])의 상관회귀식 식(4)를 이용한 경우를 비교 분석하였다.

즉, (i) $T[L] = A \times T[A] + B$ (2)

(ii) $T[S-L] = a \times T[S-A] + b$ (3)

식 (3)의 T[L]에 대한 해 : $T[L] = a \times T[A](1-a) \times T[S] - b$ (4)

또한, 자연과학에서 어떤 현상을 구명하기 위하여, 조사된 변량으로만 해석이 어려운 경우 많이 사용되는 방법이 scaling technique이다. Scaling technique이란 이미 조사 완료된 어느 표준 변량을 이용하여 구명코자 하는 현상과 관련 있는 변환 계수인 scale factor를 구하여 이 scale factor의 특성을 분석하여 목적 현상을 구명코자 시도되는 방법이며, scale factor를 구하는 방법에 따라 dimensional 분석법, inspectional 분석법, similitude 분석법의 3가지로 대별될 수 있다(Eom et al., 1995). Dimensional 분석법은 목적 현상 특성과 관련되는 많은 요인들 상호간의 dimension 관계를 이용하여 scale factor를 구하는 방법이며, Inspectional 분석법은 목적 현상과 관련되는 여러 물리적 법칙을 도입 응용하여 scale factor를 구하는 방법이다. Similitude 분석법은 토양의 구조적 유사성의 가정 하에 토양

수분전도 특성에 관한 Miller & Miller(1955a, 1955b)의 이론에 기초를 두고 조사된 변량을 이용하여 scale factor를 구하는 방법이며, 토양수분 전도의 경우 여러 가지 수학적 모형에 의한 것보다 scale factor에 위한 추정치가 실측치와의 오차가 적었다는 연구결과가 있으며(Reichardt et al., 1972, 1975; Patricia & Nielsen, 1984), scale factor를 구하는 방법 중에서는 상기한 두 가지 방법보다 similitude 분석법에 기초하여 회귀계수 유도에 의한 기법이 가장 활용도가 높다는 연구결과(Russo et al., 1980; Patricia & Nielsen, 1984)에 따라, 본 연구에서도 최고온도[Tm]와 최저온도[Tn]를 이용한 scale factor[Tsc]를 식 (5)와 같이 설정하여 회귀계수 분석하였다.

$$[Tsc] = [(Ti - Tn) / (Tm - Tn)] \tag{5}$$

3. 결과 및 고찰

3.1 Scale Factor를 이용한 기온의 일중변화 양상

본 연구 기간인 2014년 4월 하순~9월 하순 동안 아래 식 [식 (6)~(11)]과 같이 시기별 계수만 서로 다른 sine 함수로 산정된 시기별 일중 시각(X)별 기온의 예측치(E[Ta]) : Fig. 2의 점 표시)와 실측치(기상대의 기상자료 : Fig. 2의 실선 표시)의 변화 양상은 Fig. 2와 같다.

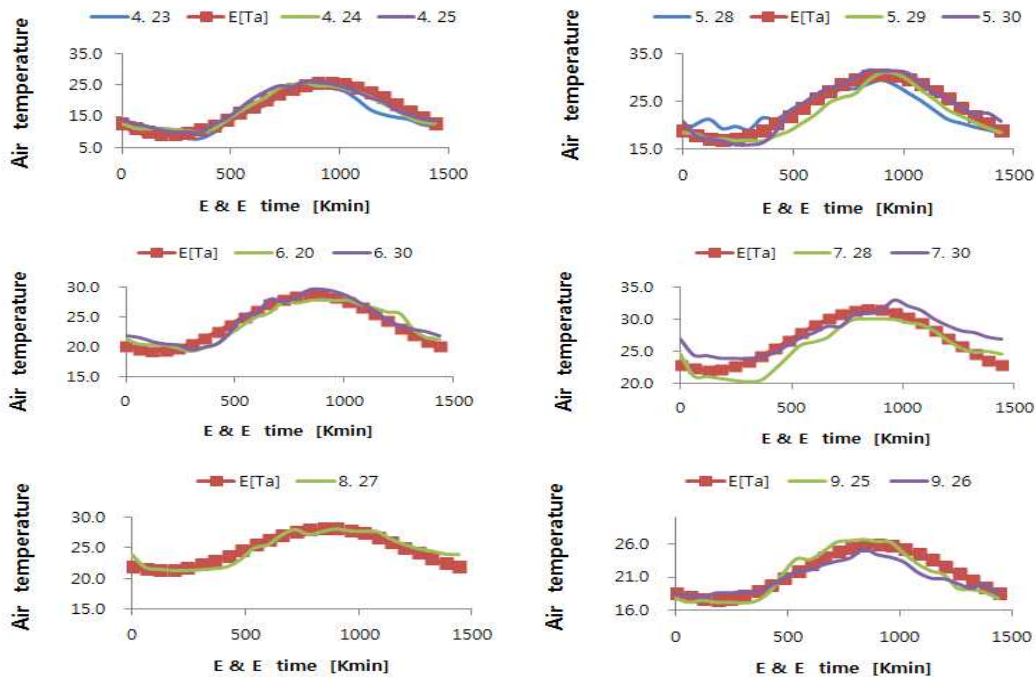


Fig. 2. Changes in daily air temperature at at each month from April to September (measured value : line, estimated value : dot).

- 4월 하순 : $E[Ta] = 8.20 \times \sin(X+860) + 17.40$ (6)
- 5월 하순 : $E[Ta] = 6.83 \times \sin(X+920) + 23.83$ (7)
- 6월 하순 : $E[Ta] = 4.76 \times \sin(X+945) + 24.16$ (8)
- 7월 하순 : $E[Ta] = 4.75 \times \sin(X+950) + 26.90$ (9)
- 8월 하순 : $E[Ta] = 3.40 \times \sin(X+945) + 24.70$ (10)
- 9월 하순 : $E[Ta] = 4.15 \times \sin(X+910) + 21.70$ (11)

일중 시각별 실제 기온의 값에 대한 scale factor[식 (5)]를 구하고, scale factor의 실측치와 추정치의 상관관계를 분석한 결과, 고도의 유의성 있는 1 : 1 line 상의 직선적인 상관관계를 보였다(Fig. 3).

이와 같은 결과로 볼 때, 온도의 변화 양상을 분석할 경우, 우선은 실제의 측정치를 이용하여 분석하지만, 그 변화양상에 대한 좀 더 많은 정보를 위해서는 본 연구에서의 예처럼 scale factor를 이용하여 그 변화 양상을 분석하는 것도 현상 구명에

큰 도움이 되리라 사료된다.

일중 시각별 기온의 값에 대한 scale factor의 추정치는 시기별 식 (1)의 계수 C 값만 다르며, 이 C 값은 시기별 일중 평균기온(Tavg)과 고도의 유의성 있는 직선적인 상관관계를 보였다(Fig. 4).

이와 같은 결과로 볼 때, 시기별 일 평균기온(Tavg)의 값을 이용하여 일중 시각별 기온의 scale factor 값 [Tsc]을 추정할 수 있으며, 더욱이 최고기온(Tm)과 최저기온(Tn)의 값을 같이 이용할 경우, 식 (1)과 식 (5) 및 식 (12)에 의해 유도되는 식 (13)에 의해 시기별 일중시각별 기온을 추정할 수 있다.

$$C = 9.6458 \times [Tavg] + 703.65 \quad (12)$$

$$E [Ti] = Tn + (Tm - Tn) \times [0.5 \times \sin \{X + (9.646 Tavg + 703.65)\} + 0.5] \quad (13)$$

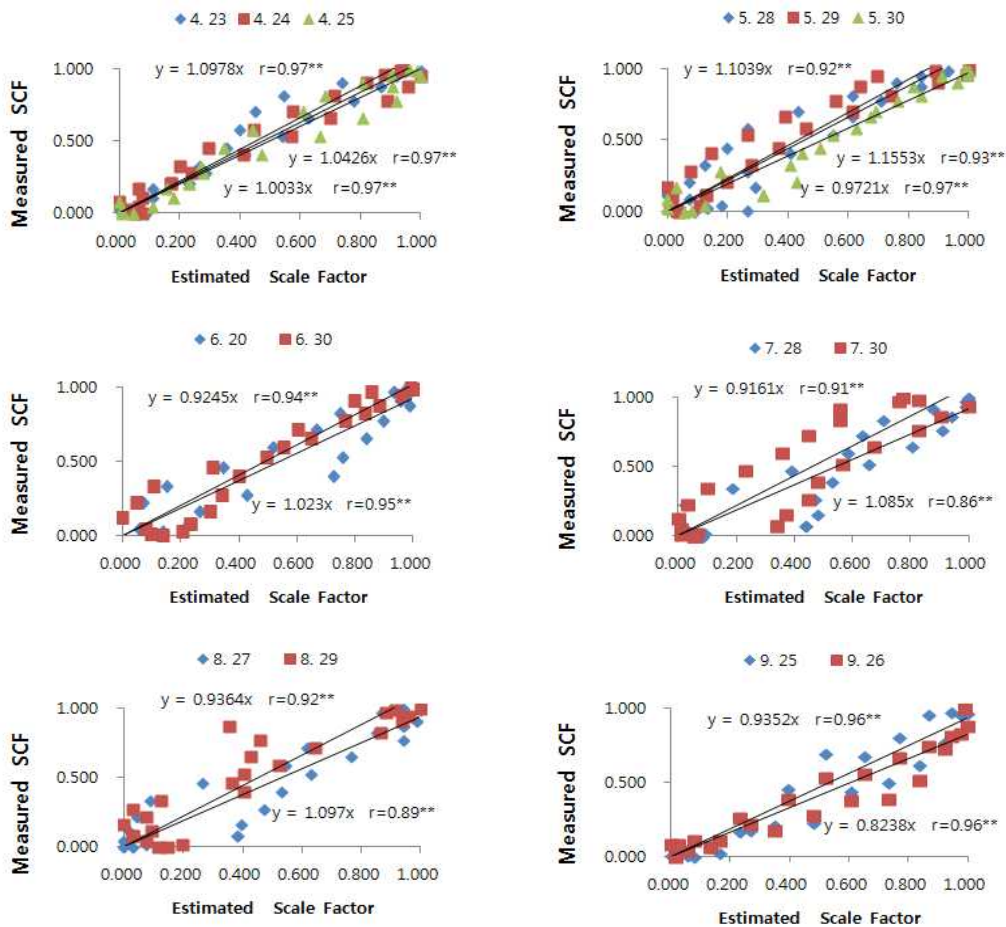


Fig. 3. Relationship between estimated and measured scale factor of the air temperature at each month from April to September.

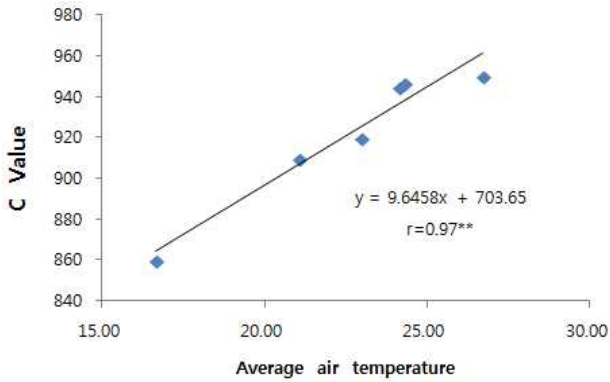


Fig. 4. Relationship between average air temperature and C value of equation (1) at each month from April to September.

3.2 작물 잎 표면온도(엽온)의 일중 시각별 변화 양상

관개 조건 콩, 한발 조건 콩, 배추, 노지 고추 및 비닐멀칭 고추 등 5개 공시 작물에 대하여 2014년 6월 24일 오전 8시부터 6월 25일 오전 8시까지의 24 시간 동안 45분 간격으로 측정된 작물별 일평균 잎 표면온도는 노지 고추 > 멀칭 고추 > 한발 콩 > 관개 콩 > 배추 순으로 높았으며, 그 최고온도와 최저온도의 차이를 뜻하는 범위(Range)는 노지 고추 > 한발 콩

> 관개 콩 > 멀칭 고추 > 배추 순으로 컸다(Table 1).

측정 당일 기온의 일중 시각별 온도의 변화양상은 Fig. 5(a)와 같으며, 기온의 scale factor에 대한 실측치와 추정치는 고도의 유의성 있는 1 : 1 line 상의 직선적인 상관관계를 보였다(Fig. 5(b)).

관개 및 한발 조건의 측정 당일 콩 잎 표면온도의 일중 시각별 변화양상은 Fig. 6(a)와 같으며, 그들의 scale factor에 대한 실측치와 추정치는 고도의 유의성 있는 1 : 1 line 상의 직선적인 상관관계를 보였다(Fig. 6(b)). 또한, 관개 및 한발 조건의 콩 모두 scale factor에 대한 회귀 직선의 기울기가 1.0보다 큰 것으로 보아 실제 콩 잎 표면온도보다 over estimation 되었다고 판단된다.

또한, 측정 당일 배추 잎 표면온도의 일중 시각별 변화양상은 Fig. 7(a)와 같으며, 그의 scale factor에 대한 실측치와 추정치는 고도의 유의성 있는 1 : 1 line 상의 직선적인 상관관계를 보였다(Fig. 7(b)). 또한, scale factor에 대한 회귀 직선의 기울기가 1.0보다 작은 것으로 보아 실제 배추 잎 표면온도보다 under estimation 되었다고 판단된다.

노지 및 비닐 멀칭 고추의 측정 당일 잎 표면온도의 일중 시각별 변화양상은 Fig. 8(a, b)와 같으며, 그들의 scale factor에 대한 실측치와 추정치는 고도의 유의성 있는 1 : 1 line 상

Table 1. Average and range of the crop leaf surface temperature

(°C)

	Leaf surface temperature					
	Air	Soybean-irrigation	Soybean-drought	Chinese cabbage	Red pepper	Red pepper-mulching
Average	22.9	17.8	18.0	16.9	19.9	18.6
Range	8.9	14.1	14.4	8.4	16.4	13.6

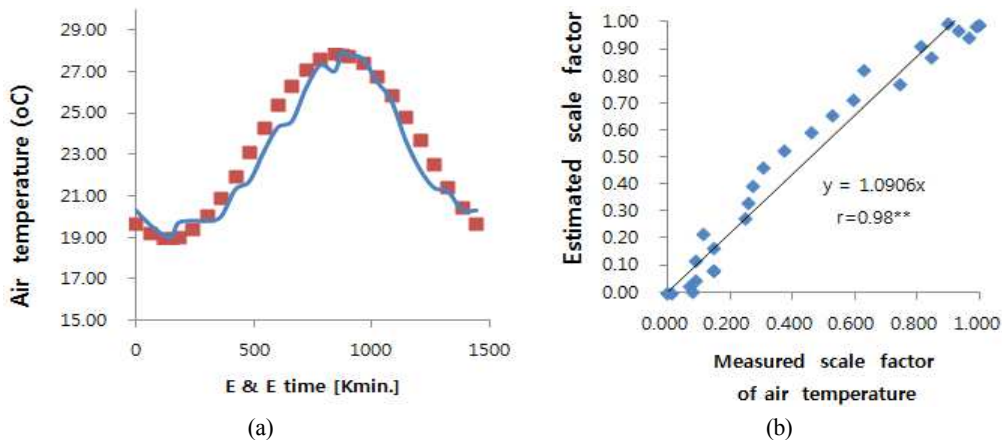


Fig. 5. Daily air temperature (line) and estimated air temperature (dot) [a], and relationship between the measured and estimated scale factor [b].

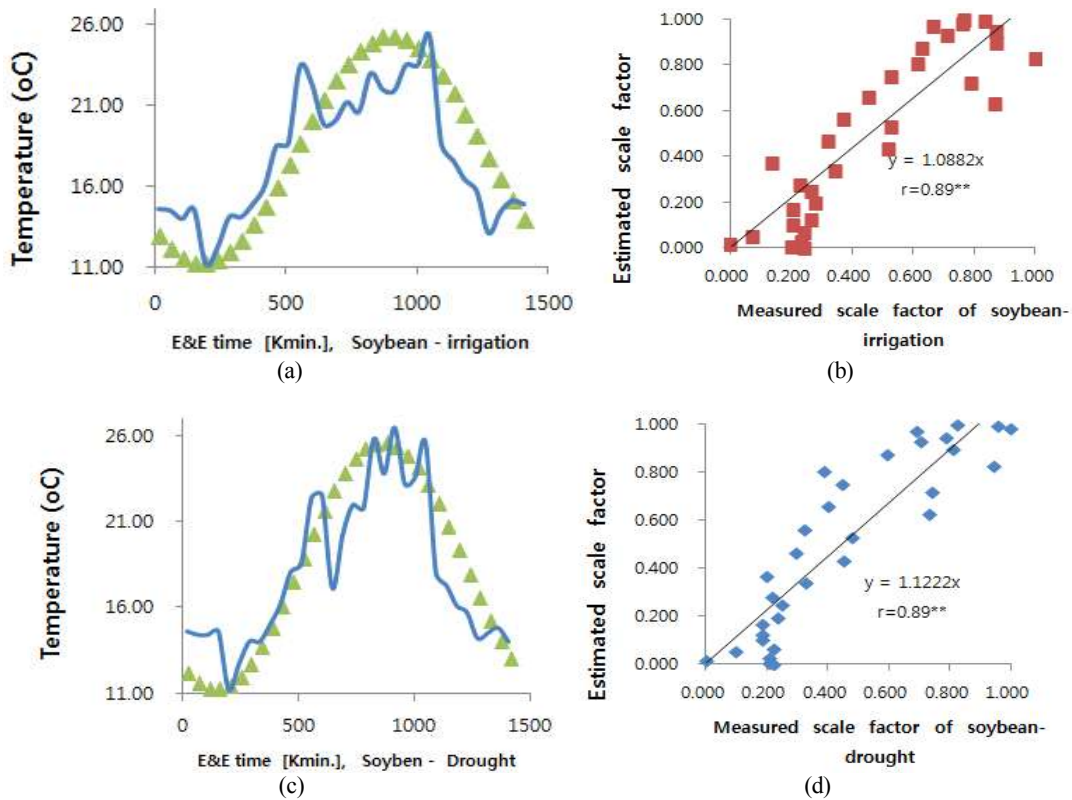


Fig. 6. Daily leaf surface temperature (line) and estimated leaf surface temperature (dot) [a,c], and relationship between the measured and estimated scale factor [b,d] of soybean for irrigation [a,b] and drought [c,d]

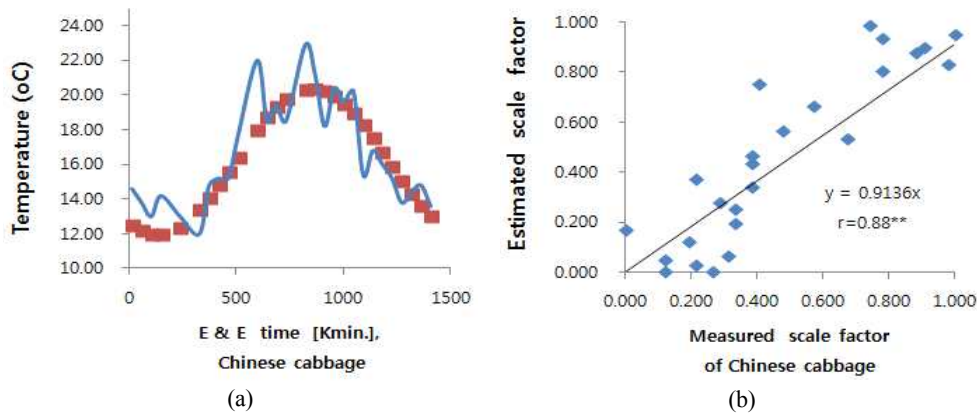


Fig. 7. Daily leaf surface temperature (line) and estimated temperature (dot) [a], and relationship between the measured and estimated scale factor [b] of Chinese cabbage.

의 직선적인 상관관계를 보였다(Fig. 8(c)). 또한, scale factor에 대한 회귀 직선의 기울기가 노지 고추의 경우 1.0보다 작은 것으로 보아, 실제 고춧잎 표면온도보다 under estimation 되었고, 비닐 멀칭 고추의 경우 1.0보다 큰 것으로 보아 실제 고춧잎 표면온도보다 over estimation 되었다고 판단된다.

3.3 작물 잎 표면온도의 시기별 변화 양상

상기 공시 5가지 작물의 생육시기별 작물 잎 표면온도를 monitoring한 결과는 다음과 같다.

3.3.1 콩

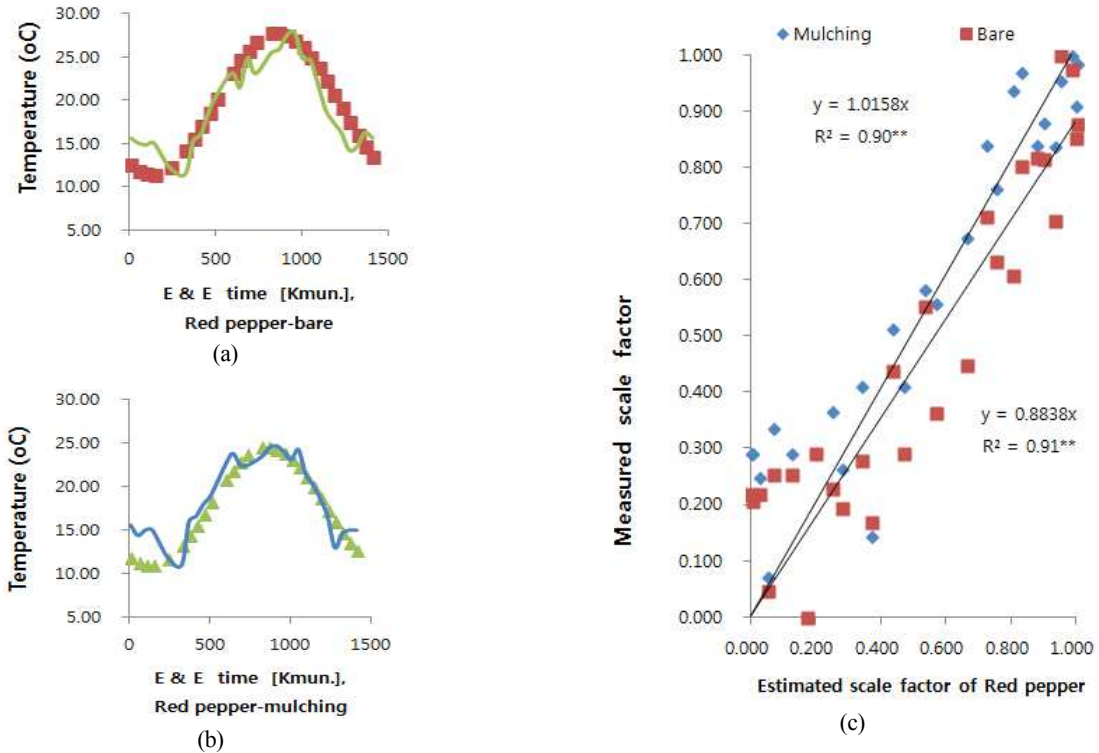


Fig. 8. Daily leaf surface temperature (line) and estimated leaf surface temperature (dot) of red pepper without mulching [a] and mulching [b] [a, b], and relationship between the measured and estimated scale factor [c].

3.3.1.1 콩 잎 표면온도 변화 양상

콩 파종 후 15일 경과일부터 150일 경과일까지 135일 간의 평균 온도를 볼 때(Fig. 9), 콩 잎 표면온도는 한밭(DrT[LS]) 및 관개(IrT[LS])의 경우 모두 기온(T[As])보다 1.0°C 낮았으나, 토양 표면온도는 한밭(DrT[Ss]) 및 관개(IrT[Ss])의 경우 기온(T[As])보다 각각 4.1°C 및 3.4°C 더 높았다. 또한 한밭의 경우를 관개의 경우와 비교하여 보면, 콩 잎 표면온도는 차이가 없었으나, 토양 표면온도는 0.7°C 높았다(Table 2). 한편, 기온과 콩 잎 표면온도의 차이는 한밭의 경우(DrT[As-Ls])와 관개의 경우(IrT[As-Ls]) 서로 차이가 없었으며, 토양 표면온도와 기온의 차이는 한밭의 경우(DrT[Ss-As])는 관개의 경우(IrT[Ss-As])보다 0.6°C 더 높았고, 토양과 콩 잎 표면온도의 차이는 한밭의 경우(DrT[Ss-Ls])는 관개의 경우(IrT[Ss-Ls])보다 또한 0.6°C 더 높았다(Table 2).

3.3.1.2 기온과 한밭 콩 잎 및 토양 표면온도의 상관관계

한밭 콩 생육기간 135일 간의 평균 기온과 콩 잎 및 토양 표면온도의 상호 상관계수(correlation coefficient)를 볼 때(Table 3), 콩 잎 표면온도(DrT[LS])는 기온(T[As])과 고도의 유의성

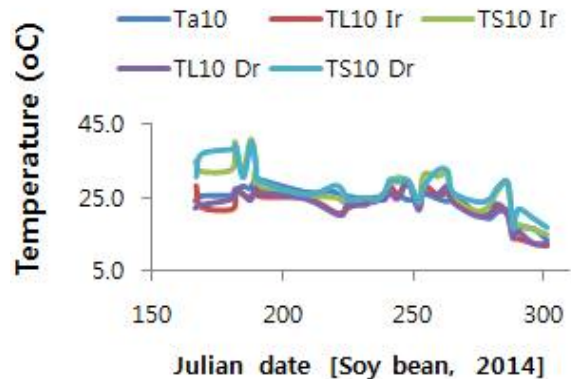


Fig. 9. Changes in air (Ta10) and surface temperature of soybean leaf (TL10 Dr, TL10 Ir) and soil (TS10 Dr, TS10 Ir).

있는 직선적인 상관관계를 보였다[식 (14)]. 이로 볼 때, 한밭 조건 콩 잎 표면온도는 기온을 이용하여 추정할 수 있다고 사료된다.

$$\text{DrT[LS]} = 0.9007 \text{ T[As]} + 1.3866 \quad (14)$$

$$(r=0.85^{**})$$

Table 2. Air and surface temperature of soybean leaf and soil

(unit : °C)

	T[As]	T[Ls]	T[Ss]	T[As-Ls]	T[Ss-As]	T[Ss-Ls]
Drought[Dr]	24.0	23.0	28.1	1.0	4.1	5.1
Irrigation[Ir]	24.0	23.0	27.4	1.0	3.5	4.5

Table 3. Correlation matrix for soybean with drought

	T[As]	DrT[Ls]	DrT[Ss]	DrT[As-Ls]	DrT[Ss-As]	DrT[Ss-Ls]
T[As]		0.85	0.70	ns	ns	ns
DrT[Ls]			0.71	*	ns	ns
DrT[Ss]				ns	0.71	0.66
DrT[As-Ls]					ns	ns
DrT[Ss-As]						0.83
DrT[Ss-Ls]						

r value : significant at 1 %, * : significant at 5 %, ns : not significant.

3.3.1.3 기온과 관개 콩 잎 및 토양 표면온도의 상관관계

관개 콩 생육기간 135일 간의 평균 기온과 콩 잎 및 토양 표면온도의 상호 상관계수(correlation coefficient)를 볼 때(Table 4), 콩 잎 표면온도(IrT[Ls])는 기온(T[As])과 고도의 유의성 있는 직선적인 상관관계를 보였다[식 (15)]. 이로 볼 때, 관개 조건 콩 잎 표면온도는 기온을 이용하여 추정할 수 있다고 사료된다.

$$IrT[Ls] = 0.9751 T[As] - 0.3834 \quad (15)$$

$(r=0.83^{**})$

3.3.2 배추

3.3.2.1 배추 잎 표면온도 변화 양상

배추 정식 후 14일부터 44일까지 30일간의 평균 온도를 볼 때(Fig. 10), 배추 잎 표면온도(T[Lc])는 기온(T[Ac])보다 6.0°C 낮았으나, 토양 표면온도(T[Sc])는 기온(T[Ac])보다 4.0°C 더 높았다(Table 5).

3.3.2.2 기온과 배추 잎 및 토양 표면온도의 상관관계

배추 생육기간 30일 간의 평균 기온과 배추 잎 및 토양 표면온도의 상호 상관계수(correlation coefficient)를 볼 때(Table 6), 배추 잎 표면온도(T[Lc])는 기온(T[Ac])과 유의성 있는 직선적인 상관관계를 보였으나[식 (16)], 토양 표면온도와 기온과의 차이(T[Sc-Ac])와 토양 표면온도와 배추 잎 표면온도와

Table 4. Correlation matrix for soybean with irrigation

	T[As]	IrT[Ls]	IrT[Ss]	IrT[As-Ls]	IrT[Ss-As]	IrT[Ss-Ls]
T[As]		0.84	0.76	ns	ns	ns
IrT[Ls]			0.78	0.52	*	ns
IrT[Ss]				ns	0.78	0.66
IrT[As-Ls]					*	ns
IrT[Ss-As]						0.80
IrT[Ss-Ls]						

r value : significant at 1 %, * : significant at 5 %, ns : not significant.

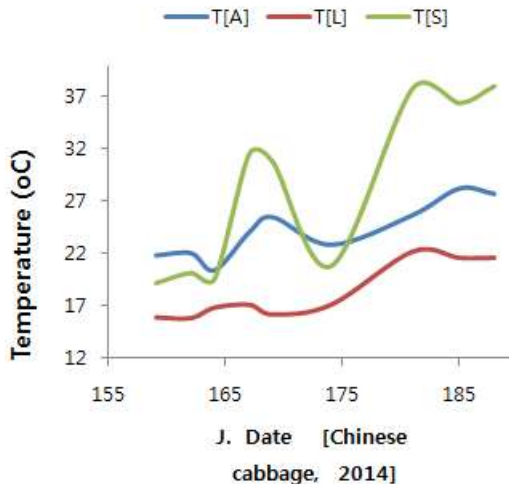


Fig. 10. Changes in air (T[A]) and surface temperature of Chinese cabbage leaf (T[L]) and soil (T[S]).

의 차이 (T[Sc-Lc])는 고도의 유의성 있는 직선적인 상관관계를 보였다(식 (17)). 따라서 식 (16)에 의해 기온 한 변량을 이용하여 배추 잎 표면온도를 추정할 값(E[Lc]a)과 식 (17)에서 유도된 식 (18)에 의한 배추 잎 표면온도를 추정할 값(E[Lc]as)의 실측치에 대한 편차의 평균은 각각 2.238 및 1.134이었다. 이와 같은 결과로 볼 때 배추 잎 표면온도는 기온과 토양 표면 온도의 두 변량을 이용하는 경우가 기온 한 변량을 이용하는 경우보다 배추 잎 표면온도의 실측치에 대한 편차가 더 작았다.

$$T[Lc] = 0.7951 \times T[Ac] - 1.0388 \quad (16)$$

($r=0.79^{**}$)

$$T[Sc-Lc] = 1.0074 \times T[Sc-Ac] + 5.9849 \quad (17)$$

($r=0.96^{**}$)

$$T[Lc] = 1.0074 \times T[Ac] - 0.0074 \times T[Sc] - 5.9849 \quad (18)$$

이로 볼 때, 배추 잎 표면온도를 추정함에 있어, 기온의 한 변량을 이용하는 방법보다, 기온과 토양표면 온도의 두 변량을 이용하는 방법이 배추 잎 표면온도의 실측치에 대한 평균 편차를 줄일 수 있다고 판단된다.

3.3.3 고추

3.3.3.1 고춧잎 표면온도 변화 양상

고추 정식 후 15일 경과일부터 104일 경과일까지 90일 간의 평균 온도를 볼 때(Fig. 11), 고춧잎 표면온도는 노지(BT[Lr]) 및 멀칭(MT[Lr])의 경우 기온(T[Ar])보다 각각 1.0°C 및 0.3°C 높았으며, 노지의 경우가 멀칭의 경우보다 0.7°C 더 높았다(Table 7). 토양 또는 비닐 표면온도는 노지(BT[Sr]) 및 멀칭(VT[Sr])의 경우 기온(T[Ar])보다 각각 5.6°C 및 9.5°C 높았으며, 멀칭의 경우가 노지의 경우보다 4.88°C 더 높았다(Table 7).

또한, 멀칭의 경우를 노지의 경우와 비교하여 보면, 기온과 콩 잎 표면온도의 차이는 멀칭 경우(MT[Ar-Lr]) 노지의 경우(BT[Ar-Lr]) 보다 0.7°C 더 높았으며, 비닐 및 토양 표면 온도와 기온의 차이는 멀칭의 경우(MT[Sr-Ar]) 노지의 경우

Table 5. Air and surface temperature of Chinese cabbage leaf and soil (unit : °C)

	T[Ac]	T[Lc]	T[Sc]	T[Ac-Lc]	T[Sc-Ac]	T[Sc-Lc]
Average	24.3	18.3	28.3	6.0	4.0	10.0
Range	7.7	6.4	18.8	5.8	14.8	13.6

Table 6. Correlation matrix for Chinese cabbage

	T[Ac]	T[Lc]	T[Sc]	T[Ac-Lc]	T[Sc-Ac]	T[Sc-Lc]
T[Ac]		0.79	0.92	ns	0.84	0.89
T[Lc]			0.84	ns	0.82	*
T[Sc]				ns	0.98	0.97
T[Ac-Lc]					ns	ns
T[Sc-Ac]						0.96
T[Sc-Lc]						

r value : significant at 1 %, * : significant at 5 %, ns : not significant.

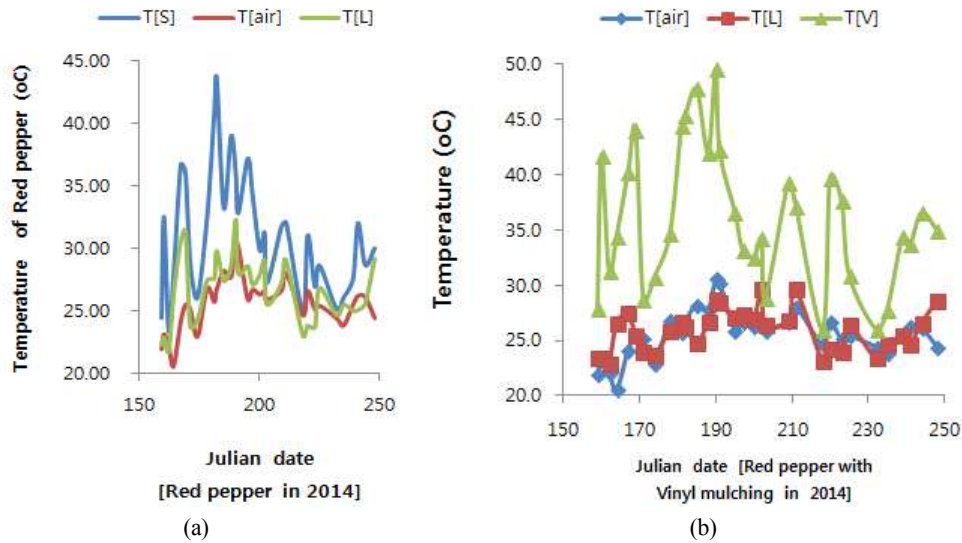


Fig. 11. Changes in air (T[air]) and surface temperature of red pepper leaf (T[L]) and soil (T[S]) [a], and air (T[air]) and surface temperature of red pepper leaf (T[L]) and vinyl (T[V]) [b].

Table 7. Air and surface temperature of soybean leaf and soil (unit : °C)

Treat	T[Ar]	VT[Lr], BT[Lr]	T[Vr], T[Sr]	VT[Ar-Lr], BT[Ar-Lr]	VT[Vr-Ar], BT[Sr-Ar]	VT[Vr-Lr], BT[Sr-Lr]
Mulching	25.6	25.9	36.1	-0.3	10.5	10.2
Without mulching	25.6	26.6	31.2	-1.0	5.6	4.6

(BT[Sr-Ar])보다 4.9°C 더 높았고, 비닐 및 토양과 고춧잎 표면온도의 차이는 멀칭의 경우(MT[Sr-Lr])는 노지의 경우(BT[Sr-Lr])보다 5.6°C 더 높았다(Table 7).

3.3.3.2 기온과 노지 고춧잎 및 토양 표면온도의 상관관계

고추 생육기간 중의 평균 기온과 고춧잎 및 토양 표면온도의 상호 상관계수(correlation coefficient)를 볼 때(Table 8), 고춧잎 표면온도(BT[Lr])는 기온(T[Ar])과 유의성 있는 직선적인 상관관계를 보였으나[식 (19)], 토양 표면온도와 기온과의 차이(BT[Sr-Ar])와 토양 표면온도와 고춧잎 표면온도와의 차이(BT[Sr-Lr])는 고도의 유의성 있는 직선적인 상관관계를 보였으나[식 (20)]. 따라서 식 (20)에 의해 기온 한 변량을 이용하여 고춧잎 표면온도를 추정할 값(E(BT[Lr])a)과 식 (20)에서 유도된 식 (21)에 의한 고춧잎 표면온도를 추정할 값(E[BT[Lr]]as)의 실측치에 대한 편차의 평균은 각각 1.770 및 1.501이었다. 이와 같은 결과로 볼 때 고춧잎 표면온도는 기온과 토양 표면 온도의 두 변량을 이용하는 경우가 기온 한 변량을 이용하는 경우보다 고춧잎 표면온도의 실측치에 대한 편차가 더

작았다.

$$BT[Lr] = 0.7139 \times T[Ar] + 8.309 \quad (19)$$

$(r=0.57^{**})$

$$BT[Sc-Lr] = 0.6975 \times BT[Sr-Ar] + 0.7042 \quad (20)$$

$(r=0.84^{**})$

$$BT[Lr] = 0.6975 \times T[Ar] + 0.3025 \times T[Sr] - 0.7042 \quad (21)$$

이로 볼 때, 고춧잎 표면온도를 추정함에 있어, 기온의 한 변량을 이용하는 방법보다, 기온과 토양 표면 온도의 두 변량을 이용하는 방법이 고춧잎 표면온도의 실측치에 대한 편차를 줄일 수 있다고 판단된다.

3.3.3.3 기온과 멀칭 고춧잎 및 비닐 표면온도의 상관관계

비닐 멀칭 고추 생육기간 중의 평균 기온과 고춧잎 및 비닐 표면온도의 상호 상관계수(correlation coefficient)를 볼 때(Table 9), 고춧잎 표면온도(VT[Lr])는 기온(T[Ar])과 유의성 있는 직선적인 상관관계를 보였으나[식 (22)], 토양 표면온도와 기

Table 8. Correlation matrix for red pepper

	T[Ar]	BT[Lr]	T[Sr]	BT[Ar-Lr]	BT[Sr-Ar]	BT[Sr-Lr]
T[Ar]		0.57	0.52	ns	ns	ns
BT[Lr]			0.72	0.63	0.55	ns
T[Sr]				*	0.90	0.85
BT[Ar-Lr]					0.56	ns
BT[Sr-Ar]						0.84
BT[Sr-Lr]						

r value : significant at 1 %, * : significant at 5 %, ns : not significant.

Table 9. Correlation matrix for red pepper

	T[Ar]	VT[Lr]	T[Vr]	VT[Ar-Lr]	VT[Vr-Ar]	VT[Vr-Lr]
T[Ar]		0.53	0.56	0.57	ns	ns
VT[Lr]			*	*	ns	ns
T[Sr]				ns	0.94	0.95
VT[Ar-Lr]					ns	*
VT[Sr-Ar]						0.94
VT[Sr-Lr]						

r value : significant at 1 %, * : significant at 5 %, ns : not significant.

온도의 차이(VT[Vr-Ar])와 토양 표면온도와 고춧잎 표면온도와의 차이(VT[Vr-Lr])는 고도의 유의성 있는 직선적인 상관관계를 보였다[식 (23)]. 따라서 식 (22)에 의해 기온 한 변량을 이용하여 고춧잎 표면온도를 추정할 값(E(VT[Lr])a)과 식 (23)에서 유도된 식 (24)에 의한 고춧잎 표면온도를 추정할 값(E(VT[Lr])as)의 실측치에 대한 편차의 평균은 각각 1.263 및 1.404이었다. 이와 같은 결과로 볼 때 멀칭 고춧잎 표면온도는 노지 고추와 달리, 기온과 토양표면 온도의 두 변량을 이용하더라도 기온 한 변량을 이용하는 경우보다 멀칭 고춧잎 표면온도의 실측치에 대한 편차가 감소하지 않았다.

이와 같은 결과는 토양과 비닐 표면에서의 열 이동 기작이 서로 다른 것에 기인한다고 사료된다.

$$VT[Lr] = 0.49 \times T[Ar] + 13.349 \quad (22)$$

(r=0.55**)

$$VT[Vr-Lr] = 1.019 \times VT[Vr-Ar] - 0.4918 \quad (23)$$

(r=0.84**)

$$VT[Lr] = 1.019 \times T[Ar] - 0.019 \times T[Vr] + 0.4918 \quad (24)$$

이로 볼 때, 멀칭 재배 고춧잎 표면온도는 기온을 이용하여 추정할 수 있다고 사료된다.

4. 결 론

본 연구는 2014년 4월 하순부터 9월 하순까지 수원에서 관개 조건 콩, 한밭조건 콩, 배추, 노지 고추 및 비닐멀칭 고추를 재배하면서, 기온과 작물 잎 및 토양의 표면온도를 monitoring 하여 이들 온도의 일중 변화 양상 및 작물 생육기간 동안의 온도 변화 양상과 온도 요인 별 상호 관계를 분석한 결과와 같다.

첫째, 시기별 기온에 대한 scale factor[Tsc]의 일중 변화 양상은 아래 식 (1)과 같이 일중 시각(X: E & E time)에 대한 sine 함수로 나타낼 수 있었으며, 이 식의 계수 C 값은 시기별 평균 기온과 고도의 유의성 있는 직선적인 정의 상관관을 보였다.

$$[Tsc] = 0.5 \times \sin(X+C) + 0.5 \quad (1)$$

따라서 scaling technique과 시기별 일 평균기온(Tavg), 최고기온(Tm) 및 최저기온(Tn)의 값을 이용하여 식 (2)에 의해 시기별 일중시각(X)별 기온을 추정(E[Ti])할 수 있다.

$$E[Ti] = Tn + (Tm - Tn) \times [0.5 \times \sin\{X + (9.646 \text{ Tavg} + 703.65)\} + 0.5] \quad (2)$$

둘째, 작물별 잎 표면온도에 대한 scale factor의 일중변화 역시 식 (1)과 같이 일중 시각(X)에 대한 sine 함수로 나타낼 수 있었으나, 콩 및 멸칭 고추는 over estimation, 배추 및 노지 고추는 under estimation 되는 경향을 보였다. 또한 2014년 6월 24일의 작물별 일평균 잎 표면온도는 노지 고추 > 멸칭 고추 > 한발 콩 > 관개 콩 > 배추 순이었다.

셋째, 작물별 재배 기간 중 평균 잎 표면온도는 배추와 관개 및 한발 콩의 경우는 기온보다 낮았으며, 노지 및 멸칭 고추의 경우는 기온보다 높았다. 또한 작물별 재배 기간 중 기온과 작물 잎 표면온도, 토양 및 멸칭비닐 표면온도의 상호 상관관계에 근거하여 작물의 잎 표면온도를 추정할 경우, 멸칭 고추와 관개 및 한발 콩의 경우는 기온을 이용하여 가능하였으나, 배추와 노지 고추의 경우는 기온과 토양표면 온도의 두 변량을 이용하는 경우가 기온 한 변량을 이용하는 경우보다 작물 잎 표면온도의 실측치에 대한 편차가 더 작았다.

본 연구는 위 결과와 함께 다음과 같은 시사점을 준다. 비닐 멸칭 고추의 경우, 기온과 토양표면 온도의 두 변량 이용 경우가 기온 한 변량 이용 경우보다 고춧잎 표면온도의 추정치와 실측치간 편차가 더 컸었다. 따라서 금후 토양 및 비닐 표면에서의 열 이동 기작 차이에 대한 연구가 필요하다고 사료된다.

또한 scale factor를 이용한 시기별 일중시각별 기온을 추정하는 방법과 작물별 잎 표면온도의 변화 양상을 구명한 본 연구결과는, 온도 등 기상자료를 이용한 작물 수량 예측 모형의 입력자료 산정 등에 활용될 수 있다.

요 약

기후변화와 기상조건의 영향을 가장 많이 받는 분야는 농업이며, 특히 온도는 작물 생육에 영향을 미치는 가장 중요한 요인 중 하나이다. 본 연구는 수원에서 관개 조건 콩, 한발조건 콩, 배추, 노지 고추 및 비닐멸칭 고추 등 5개 작물에 대하여 기온과 작물 잎 및 토양의 표면온도를 monitoring 하여 이들 온도의 일중 변화 양상과 생육기간 동안의 온도 변화 양상 및 온도 요인 별 상호관계를 분석하였다. 시기별 기온과 작물

잎 및 토양 표면온도에 대한 scale factor[Tsc]의 일중 변화 양상은 $[Tsc] = 0.5 \times \sin(X+C) + 0.5$ 와 같이 일중 시각(X : E&E time)에 대한 sine 함수로 나타낼 수 있었으며, scaling technique과 시기별 일 평균기온(Tavg), 최고기온(Tm) 및 최저기온(Tn)의 값을 이용하여 아래 식에 의해 시기별 일중시각(X)별 기온을 추정(E[Ti])할 수 있다. $E[Ti] = Tn + (Tm - Tn) \times [0.5 \times \sin\{X + (9.646 \text{ Tavg} + 703.65)\} + 0.5]$. 또한 2014년 6월 24일의 작물별 일평균 잎 표면온도는 노지 고추 > 멸칭 고추 > 한발 콩 > 관개 콩 > 배추 순이었다. 작물의 잎 표면온도를 추정할 경우, 멸칭 고추와 관개 및 한발 콩의 경우는 기온을 이용하여 가능하였으나, 배추와 노지 고추의 경우는 기온과 토양표면 온도의 두 변량을 이용하는 경우가 기온 한 변량을 이용하는 경우보다 작물 잎 표면온도의 실측치에 대한 편차가 더 작았다. Scale factor를 이용한 시기별 일중시각별 기온을 추정하는 방법과 작물별 잎 표면온도의 변화 양상을 구명한 본 연구결과는, 온도 등 기상자료를 이용한 작물 수량 예측 모형의 입력자료 산정 등에 활용 될 수 있다.

(주요어 : 작물 잎 표면온도, 토양 표면온도, Scale Factor)

사 사

본 논문은 농촌진흥청 농업공동연구사업(세부과제번호: PJ-009222022015)의 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

- Balkovic J, van der Velde M, Schmid E, Skalsky R, Khabarov N, Obersteiner M, Sturmer B, Xiong W. 2013. Pan-European crop modelling with EPIC: Implementation, p-scaling and regional crop yield validation. *Agricultural Systems* 120:61-75.
- Bhatia VS, Singh P, Wani SP, Kesava R, Srinivas K. 2006. Yield gap analysis of soybean, groundnut, pigeonpea, and chickpea in India using simulation modeling. *Global Theme on Agroecosystems Report No. 31*. ICRISAT, Andhra Pradesh, India : 156.
- Brisson N, Gary C, Justes E, Roche R, Mary B, Ripoche D, Zimmer D, Sierra J, Bertuzzi P, Burger P. 2003. An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy* 18:309-332.
- Challinor AJ, Wheeler TR, Craufurd PQ, Slingo JM. 2005. Simulation of the impact of high temperature stress on

- annual crop yields. *Agric Forest Meteorol* 135(1-4):180-189.
- Challinor AJ, Wheeler TR, Craufurd PQ, Ferro CAT, Stephenson DB. 2007. Adaptation of crops to climate change through genotypic responses to mean and extreme temperatures. *Agric Ecosyst Environ* 119(1-2):190-204.
- Challinor AJ, Wheeler TR, Hemming D, Upadhyaya HD. 2009. Ensemble yield simulations : Crop and climate uncertainties, sensitivity to temperature and genotype adaptation to climate change. *Clim Res* 38:117-127.
- Eom KC, Song KC, Ryu KS, Sonn YK, Lee SE. 1995. Model equations to estimate the soil water characteristics curve using salting factor. *KJSSSF* 28(3):227-232.
- Eom KC, Eom KR. 2008. *Mathematics for agricultural sciences*. Daewon Publishers, Korea, Seoul.:438-491.
- Eom KC, Eom HY. 2013. Estimation model of the changes in daily leaf surface temperature using scaling technique. *KJSSSF* 46(5):359-364.
- Eom KC, Lee BK, Kim YS, Eom HY. 2014. Comparison of the change in daily air and surface temperature of red-pepper leaf and soil. *KJSSSF* 47(5):1-6.
- Hillel D, Erick DE. 1990. *Scaling in soil physics : Principles and applications*. Soil Sci Soc Am Inc Madison, Wisconsin, USA. 300-318.
- IPCC. 2014. *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.
- Jones JW, Hoogenboom G, Porter CH, Boote KJ, Batchelor WD, Hunt LA, Wilkens PW, Singh U, Gijsman AJ, Ritchie JT. 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* 18:235-265.
- Kim M, Lee WK, Nam K, Yu H, Choi SE, Kim CG. 2014. Estimating stand volume *Pinus densiflora* forest based on climate change scenario in Korea. *Journal of Korean Forest Society* 103(1):105-112.
- Lal R, Shukla M. 2004. *Principles of soil physics*. Marcel Dekker, Inc. USA. 515-555.
- Lim CH. 2013. Jeju agriculture: Opportunities and challenges associated with climate change. *Jeju Development Research* 17:23-48.
- Lim CH, Lee WK, Song Y, Eom KC. 2015. Assessing the EPIC model for estimation of future crops yield in South Korea. *Climate Change Research* 6(1):21-31.
- Lobell DB, Burke MB. 2008. Why are agricultural impacts of climate change so uncertain? The importance of temperature relative to precipitation. *Environ Res Lett* 3(3).
- Miller EE, Miller RD. 1955a. Theory of capillary flow : 1. Practical implications. *Soil Sci Soc Am Proc* 19:267-271.
- Miller EE, Miller RD. 1955b. Theory of capillary flow : 2. Experimental information. *Soil Sci Soc Am Proc* 19:267-271.
- Patricia MT, Nielsen DR. 1984. Scale factors in soil science. *Soil Sci Soc Am J* 48:953-959.
- Reichardt K, Nielsen DR, Biggar JW. 1972. Scaling of horizontal infiltration into homogeneous soils. *Soil Sci Soc Am Proc* 36:241-245.
- Reichardt K, Libardi PL, Nielsen DR. 1975. Unsaturated hydraulic conductivity by a scaling technique. *Soil Sci* 120:165-168.
- Rosenzweig C, Elliott J, Deryng D, Ruane AC, Müller C, Arneth A, Boote KJ, Folberth C, Glotter ML, Khabarov N, Neumann K, Piontek F, Pugh TAM, Schmid E, Stehfest E, Yang H, Jones JW. 2013. Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. *PNAS* 111:3268-3273.
- Russo D, Bresler E. 1980. Scaling soil hydraulic properties of a heterogeneous field. *Soil Sci Soc Am J* 44:681-684.
- Scott HD. 200. *Soil Physics agricultural and environmental applications*. Iowa State University Press. Ames, IA.
- Watson J, Challinor A. 2013. The relative importance of rainfall, temperature and yield data for a regional-scale crop model. *Agricultural and Forest Meteorology* 170(2013):47-57.
- Williams JR, Jones CA, Dyke PT. 1984. A modelling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Transactions of the ASABE* 27:129-144.
- Ye L, Xiong W, Li Z, Yang P, Wu W, Yang G, Fu Y, Zou J, Chen Z, van Ranst E, Tang H. 2013. Climate change impact on China food security in 2050. *Agronomy for Sustainable Development* 33:363-374.