

정식 초기의 저온·저일조가 토마토 수량·품질에 미치는 영향

위승환¹·여경환¹·최학순¹·유인호²·이진형³·이희주^{1*}

¹농촌진흥청 국립원예특작과학원 채소과 농업연구사, ²농촌진흥청 국립원예특작과학원 채소과 농업연구관,

³농촌진흥청 국립원예특작과학원 채소과 박사후연구원

Effects of Low Air Temperature and Light Intensity on Yield and Quality of Tomato at the Early Growth Stage

Seung Hwan Wi¹, Kyung-Hwan Yeo¹, Hak Soon Choi¹, Inho Yu², Jin Hyong Lee³, and Hee Ju Lee^{1*}

¹Researcher, Vegetable Research Division, National Institute of Horticultural & Herbal Science, Wanju 55365, Korea

²Senior Researcher, Vegetable Research Division, National Institute of Horticultural & Herbal Science, Wanju 55365, Korea

³Postdoctoral Researcher, Vegetable Research Division, National Institute of Horticultural & Herbal Science, Wanju 55365, Korea

Abstract. This study was conducted to the effect of low air temperature and light intensity conditions on yield and quality of tomato at the early stage of growth in Korea. In plastic greenhouses, low temperature and low temperature with shade treatments were performed from 17 to 42 days after plant. Tomato growing degree days were decreased 5.5% due to cold treatment during the treatment period. Light intensity decreased 74.7% of growing degree days due to shade. After commencing treatments, the plant growth decreased by low temperature and low radiation except for height. Analysis of the yield showed that the first harvest date was the same, but the yield of the control was 3.3 times higher than low temperature with shade treatment. The cumulative yields at 87 days after transplanting were 1734, 1131, and 854 g per plant for control, low temperature, and low temperature with shade, respectively. The sugar and acidity of tomatoes did not differ between treatment and harvesting season. To investigate the photosynthetic characteristics according to the treatment, the carbon dioxide reaction curve was analyzed using the biochemical model of the photosynthetic rate. The results showed that the maximum photosynthetic rate, J (electric transportation rate), TPU (triose phosphate utilization), and R_d (dark respiration rate) did not show any difference with temperature, but were reduced by shading. V_{cmax} (maximum carboxylation rate) was decreased depending on the low temperature and the shade. Results indicated that low temperature and light intensity at the early growth stage can be inhibited the growth in the early stage but this phenomenon might be recovered afterward. The yield was reduced by low temperature and low intensity and there was no difference in quality.

Additional key words : abnormal weather, low temperature, low light intensity, tomato, quality, yield

서 론

유엔 산하 기구인 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)는 기후변화가 진행됨에 따라 기온상승과 CO₂ 상승은 물론 이상기상 현상이 발생할 것이라고 발표하였다(IPCC, 2014). 최근 이상기상의 발생 빈도가 빈발해지고 강도가 강해지는 경향을 보이고 있으며, 이렇게 발생하는 이상기상은 작물의 수량감소에 큰 영향을 주고 있다(Moriondo 등, 2011; Lim 등, 2015). 특히 봄철의 저온 피해는 2009년부터 2018년

까지 9회 발생하여 빈도가 매우 높으며, 2018년 4월 초순에는 기온이 영하로 떨어져 발작물의 피해 면적은 50,446ha로 추산된다(KMA, 2019). 봄철 이상 저온은 작물의 활착 및 양수분 흡수 등을 저해하는 등 피해를 준다(Moon 등, 2012). 토마토 식물체의 정상적인 성장과 발달 그리고 과실 착과에 적합한 낮 온도의 범위는 21 - 29.5°C이고, 밤 온도의 범위는 15.5 - 21°C이다(Heuvelink, 2018). 온도를 기초로 할 때 재배한계는 10.5°C 이상에서 30.0°C 이하이다(RDA, 2020). 재배 온도가 14°C 이하로 낮아질 경우 개화가 늦어지고 토마토의 수량이 감소하며 생육이 지연된다고 알려져 있으며(Adams 등, 2001a; Van Ploeg와 Heuvelink, 2005) 시설의 적정온도를 맞추어 생산성을 높이기 위한 연구가 이루어지고 있다(Choi

*Corresponding author: perpetuaa@korea.kr

Received September 14, 2021; Revised October 28, 2021;

Accepted October 28, 2021

등, 2000; Nam 등, 2014).

광은 식물의 광합성을 위한 필수 요소로 광량 및 광주기에 따라서 작물의 생육과 발육이 달라진다. 강광에서는 작물의 잎이 작고 두꺼워지며 짙은 녹색을 띠면서 마디가 짧고 굵어지는 경향을 보이거나, 약광에서는 잎이 얇고 넓어지며 조직이 유연해지고 마디가 길어지며 낙화 및 낙과가 증가하는 경향을 보인다(Moon 등, 2011). 토마토의 광포화점은 $281\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 며 광보상점은 $60\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 으로 높은 광량을 요구하는 작물로 광환경이 좋은 봄과 가을의 경우 생산성이 높으나 겨울에는 떨어지는 경향을 보인다(Heuvelink, 2018). 토마토의 광환경이 요구치보다 낮을 경우 초장이 길어지고 개화 수가 적어지며 건전한 꽃가루가 적어서 착과가 불량해지고 착과된 과실의 생육도 불량하여 공동과가 되거나 착색도 불량 해진다(RDA, 2020). 또한 토마토의 광량이 달라짐에 따라 수량 및 품질이 달라진다고 알려져 있으며(Cockshull 등, 1992; Abdel-Mawgoud 등, 1996; Adams 등, 2001b; Gent, 2007), 광량 및 광질 조절을 통하여 수량 및 품질 개선 연구가 이루어지고 있다(Ilic 등, 2012; Park, 2018).

봄철에 이상기상으로 저온 저일조가 발생할 경우 토마토의 광합성이 저해되어 생육이 불량해지고 수량과 품질이 나빠질 것으로 예측 된다. 하지만 기존의 연구들은 생육 전기간에 대한 것이며, 대표적인 이상기상 피해인 생육 초기 저온 및 저일조와 같은 복합 이상기상환경의 영향에 대해서는 연구되지 않았다. 본 연구는 생육초기 저온·저일조가 토마토 ‘도태랑다이어’의 성장과 생리적 반응에 미치는 영향을 확인하기 위해 수행되었다.

재료 및 방법

1. 공시작물 및 환경요인 설정

본 실험에 사용한 식물재료는 ‘도태랑다이어’ 토마토 (*Lycopersicon esculentum* L. cv. Dotaerag Dia, Koregon, Ansung Korea)을 사용하였으며, 2019년 2월 25일에 시판 상토인 바이오 상토 1호(Bio bed soil 1, Hungnong, Suwon, Korea)를 72구 육묘용 플러그 트레이(540 × 280 × 45mm)에 충전하고 토마토 종자를 1립씩 파종하였다. 이후 평균기온이 25°C로 유지되는 벤로형 온실에서 자연광 하에 육묘하였고, 상토의 표면이 마르지 않도록 충분히 관수하였다. 파종 50일 후 국립원예특작과학원 채소과 시험포장의 자동 측량제어가 가능한 비가림 하우스(40x6m) 2동(M동, L동)에서 90x45cm 간격으로 토마토 묘를 정식하였고 91일 동안 재배하였다(36°50' N 127°57' E, 30 elevation). 정식된 토마토는 농촌진흥청 표준 영농재배법에 준하여 관리하였으며, 점적관수를

이용하여 충분히 관수 하였다. 생육 초기 저온 및 저일조 환경을 구현하기 위하여 정식 후 17일부터 42일까지 26일간 완전 임의배치법 3반복으로 저온, 저온차광 환경을 조성해주었다. 하우스 L동은 측창을 열어 두어 기온이 외부 기상과 동일하게 설정하여 저온처리를 하였으며, 하우스 M동은 외기온도가 15°C 이하로 내려가면 측창이 닫히도록 설정하여 저온피해를 받지 않도록 온도를 유지하였다. 저일조 처리를 하기 위하여 하우스 L동을 2구역으로 나누고 차광막을 설치하였다. 처리기간 동안 각 처리구의 대기온도와 일사량 데이터를 측정하였으며 온습도센서(S-THB-M002, Onset, MA, USA), 일사량 센서(S-LIB-M003, Onset, MA, USA), 데이터로거(H21-USB, onset, MA, USA)를 활용하여 1시간 간격으로 측정하였다.

2. 토마토의 생육 및 생리 특성 조사

토마토의 생육 분석을 위하여 정식일, 정식 후 49일과 91일에 초장, 생체중, 건물중, 엽수, 엽면적, SPAD(엽록소 함량)를 처리구당 3주씩 조사하였다. 수량은 처리구당 20주를 선발하여 조사하였다. 과실은 과색이 BBCH 기준으로 Red Stage (90% 착색)가 되었을 때를 기준으로 수확하였으며 과실의 당도와 산도는 당산도 측정기(IB0301, G-Won HiTech, 시, Korea)를 이용하였다. 또한 작물에 대한 기온의 영향분석을 위하여 생육도일(Growing degree days, GDDs)을 활용하였다. 생육도일은 일 최고온도, 일 최저온도 및 기본온도(10°C)를 조합하여 산출하였으며 계산식은 아래와 같다.

$$\text{GDDs} = \sum[(T_{\text{max}} + T_{\text{min}})/2 - T_b]$$

위 식에서 T_{max} (Temperature Max), T_{min} (Temperature Minimum), T_b (Base Temperature)는 각각 일 최고온도, 일 최저온도, 기본온도를 나타내며, GDD가 음수가 될 경우 0으로 처리하였다. 기본온도는 작물에 따라서 달라지는데 본 연구에서는 선행연구(Pathak와 Stoddard, 2018)를 참조하여 토마토의 생육 최저온도인 10°C를 기준으로 설정하였다.

저온 및 저일조가 토마토의 광합성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 정식 후 31일부터 35일에 휴대용 광합성 측정기(LI-6400XT, Li-cor Biosciences, Nebraska, USA)을 사용하여 처리구당 3개씩 CO₂ 반응곡선을 측정하였다. 작성된 CO₂ 반응곡선 값을 가지고 광합성 기구의 생화학적 모델에 적용하여 V_{cmax} (최대 카르복실화 속도), J (전자전달계효율), TPU(삼인산화물), R_d (호흡률), g_m (엽육 이산화탄소 전달저항)을 산출하였다(Farquhar 등, 1980; Sharkey, 1985; Sharkey 등, 2007; Sharkey, 2016).

3. 통계처리

토마토의 생육 및 광합성 특성 데이터를 통계분석하기 위하여 통계 패키지(3.0.3, R Foundation)를 이용하였으며, LSD 검정(Fisher's least significant difference test, $p < 0.05$)으로 평균치 간의 차이에 대한 유의성을 검정하였다.

결과 및 고찰

1. 생육초기 저온 저일조에 의한 토마토의 생육

온도에 의한 영향 평가를 위하여 비가림하우스 내부 기온과 일사량을 조사하였다(Fig. 1). 처리기간 동안의 기온을 조사한 결과 측창 개폐로 보온이 되는 M동의 생육도일은 272이며 측창이 항상 열려있는 L동의 생육도일은 257로 L동이 M동보다 5.5% 더 낮았다. L동 내부 처리구 내에서의 온도 변화가 있는지 조사하였으나 차광에 의한 온도 차이는 없었다. 차광 처리에 대한 평균 일사량을 분석한 결과 대조구와 차광 처리구

가 각각 16.9, 4.3MJ·m⁻²으로 대조구 대비 차광 처리구의 광량이 74.5% 낮았다. 또한 처리기간중의 일 최고광량이 광포화점인 281W·m⁻²를 넘지 못한 날의 비율은 대조구와 차광처리구가 각각 3.8, 96.2% 이었다.

생육초기 저온 및 차광 처리에 따른 토마토의 생육을 조사하였다(Table 1). 저온 및 차광 처리가 완료된 정식 후 49일의 토마토 생육을 보았을 때 저온차광 처리구가 대조구와 저온 처리구 보다 엽수, 엽면적, 생체중, 건물중, SPAD이 낮은 것을 확인할 수 있었다. 이는 일사량이 떨어질 경우 토마토의 생육이 저해된다는 보고(Kläring와 Krumbein, 2013)와 일치한다. 초장은 저온차광 처리구가 대조구 및 저온 처리구보다 높았으며, 이는 광이 부족하거나 자외선의 투과가 적은 환경에서 웃자란다는 보고와 일치하였고(Ryu와 Kim, 2010) 이러한 추세는 생육 후기인 정식 후 91일에도 유지가 되었다. 생육 후기인 정식 후 91일의 경우 엽면적은 무처리구가 다른 처리구 보다 많았으며, 처리에 따른 차이는 보이지 않았으나 생체

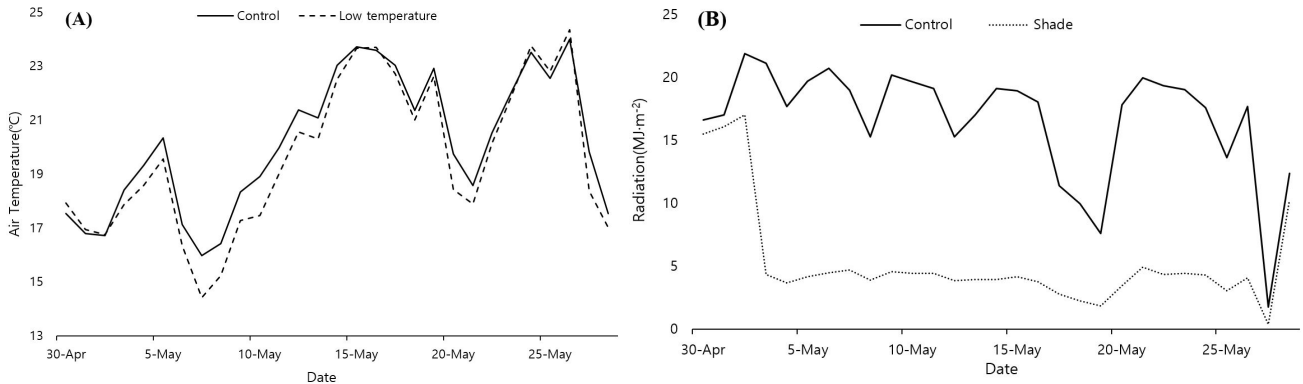


Fig. 1. Difference in daily mean air temperature between control and low temperature treatment (A) and difference in daily mean radiation between control, and shade treatment (B).

Table 1. Morphological parameters of tomato plants grown in environments such as control, low temperature, low temperature with shade from 17 to 42 days after plant ($n = 3$).

Days after transplanting	Treatment	Height (cm)	Leaf number	Leaf area (cm ²)	Fresh weight (g)	Dry weight (g)	SPAD
0	Seedling	24.7	7.1	213.7	10.5	1.5	30.1
49	Control	126.3 b ^z	24.3 a	9666.3 a	1066.5 a	109.5 a	59.3 a
	Low Temp	127.7 b	23.3 ab	9342.6 a	1042.7 a	110.7 a	59.9 a
91	Low Temp & Shade	144.5 a	21.7 b	6045.4 b	580.0 b	61.1 b	48.8 b
	Control	157.3 b	21.3 a	10502.1 a	1466.3 NS ^y	176.2 NS	49.2 NS
91	Low Temp	153.7 b	15.0 b	8239.7 ab	1361.0 NS	165.0 NS	51.5 NS
	Low Temp & Shade	190.7 a	14.3 b	6792.9 b	1105.2 NS	143.7 NS	46.3 NS

^z Different letters within columns indicate significant difference based on LSD test, 5% level.

^y Means nonsignificant at $p > 0.05$

중과 건물중도 비슷한 추세를 보였다.

생육초기 저온 저일조의 영향을 분석하기 위하여 시기별 토마토의 수량을 조사하였다(Fig. 2). 토마토 과실을 조사한 결과 첫 수확일은 정식 후 63일로 같았으나 첫 수량이 대조구, 저온 처리구, 저온차광 처리구 순으로 각각 177, 99, 53g/plant이었으며 최대 3.3배까지 차이를 보였다. 이 추세는 다소 경감되어 최종 수확일인 정식 후 87일에는 대조구, 저온 처리구, 저온차광 처리구의 누적수량이 각각 1734, 1131, 854g/plant이었다. 이를 분석한 결과 생육 초기 저온, 저온차광에 의하여 수량이 각각 34.8, 50.7% 감소한 것을 확인할 수 있었다. 이는 엽면적 차이가 작물의 광합성 총량 차이로 이어지고(Kläring와 Krumbein, 2013), 궁극적으로 과실의 수량에 영향을 준 것으로 보인다. 저온 및 저일조에 의한 과실의 품질 변화를 구명하

기 위하여 당도와 산도를 분석하였으나 처리구 및 수확시기에 따른 유의미한 차이를 보이지 않았다(Table 2). 토마토 과실은 저온에 노출될 경우 착과수는 감소하지만 단위 중량당 glucose, fructose, sucrose가 증가한다(Ntatisi 등, 2014). 그러나 본 실험의 경우 저온 및 저온 저일조 처리 종료 후에 과실 비대기가 이루어져 당도 및 산도 등에 영향을 받지 않은 것으로 보인다.

토마토의 생육과 과실 수량을 종합하여 분석한 결과 정식 초기 저온과 저일조에 의하여 엽면적 등이 처리 후에도 회복하지 못하는 등 장애를 보였으며, 이는 광합성량 감소로 이어져 과실 수량이 감소된 것을 확인할 수 있었다. 이를 해결하기 위해서는 저온 및 저온저일조 발생시 보온 및 보광이 필요한 것으로 보인다.

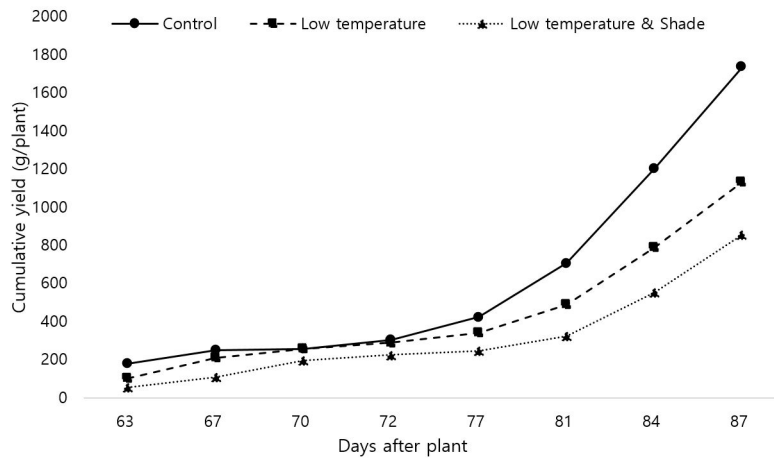


Fig. 2. Cumulative yields of tomato plants grown in environments such as control, low temperature, low temperature with shade from 17 to 42 days after plant.

Table 2. Fruit quality of tomato plants grown in environments such as control, low temperature, low temperature with shade from 17 to 42 days after plant.

Days after plant	Control		Low Temp.		Low Temp. & Shade	
	Brix (°Bx)	Acidity (%)	Brix (°Bx)	Acidity (%)	Brix (°Bx)	Acidity (%)
63	5.4 ± 1.3	0.57 ± 0.27	5.1 ± 0.5	0.58 ± 0.12	4.5 ± 0.2	0.71 ± 0.08
67	4.8 ± 0.4	0.65 ± 0.23	4.9 ± 0.4	0.70 ± 0.14	5.1 ± 0.5	0.80 ± 0.19
70	5.3 ± 0.0	0.92 ± 0.00	5.0 ± 0.9	0.64 ± 0.11	4.5 ± 0.4	0.68 ± 0.11
72	4.2 ± 0.4	0.64 ± 0.19	4.4 ± 0.7	0.71 ± 0.01	4.6 ± 0.8	0.57 ± 0.17
77	4.5 ± 0.5	0.51 ± 0.10	4.4 ± 0.6	0.40 ± 0.12	4.6 ± 0.5	0.49 ± 0.11
81	4.2 ± 0.6	0.55 ± 0.15	4.9 ± 0.9	0.75 ± 0.35	5.1 ± 0.5	0.79 ± 0.14
84	4.9 ± 0.5	0.65 ± 0.14	4.5 ± 0.5	0.54 ± 0.16	4.8 ± 0.6	0.54 ± 0.14
87	4.4 ± 0.4	0.69 ± 0.15	4.9 ± 0.3	0.67 ± 0.11	5.0 ± 0.4	0.67 ± 0.15

Data show mean values ± standard error.

2. 저온 저일조에 따른 광합성 특성

생육초기 저온 및 저일조에 따른 토마토의 광합성 특성을 구명하기 위하여 처리구별 CO₂ 반응 곡선을 작성하였다(Fig. 3). CO₂ 반응 곡선을 분석한 결과 무처리와 저온처리의 경우 최대 순 광합성 속도가 각각 24.6, 26.2 μmol CO₂·m⁻²·s⁻¹로 서로 차이를 보이지 않았으나 저온차광 처리구는 20.6 μmol CO₂·m⁻²·s⁻¹으로 낮았다. 처리구별 CO₂ 반응곡선과 광합성 기구의 생화학적 모델을 활용하여 얻은 광합성 특성을 분석한 결과 V_{max}(최대 카르복실화 속도), J(전자전달계효율), TPU(삼인산화율), R_d(호흡률)에서 처리에 따른 차이를 보였으며 g_m(엽육 이산화탄소 전달저항)의 경우 차이를 보이지 않았다(Table 3). V_{max}값은 대조구, 저온 처리구, 저온차광 처리구 순으로 점차 감소하며, J, TPU, R_d 값은 저온에 의하여 값이 감소하지 않았으나 차광에 의하여 감소하였다. 이는 저일조의 영향으로 광합성 속도가 낮아짐에 따라 값이 감소한 것으로 광량이 낮을 경우 광합성 특성 값이 감소한다는 보고와 일치

하였으며(Idris 등, 2018), 온도환경에 따라 작물이 순응하여 광합성 속도와 특성에 변화가 생긴다는 보고와 일치하였다(Way와 Yamori, 2014). 이로 보아 토마토의 온도나 광량이 적정재배조건 범위를 벗어날 경우 광합성이 저해됨을 확인하였으며, 따라서 토마토의 안정생산을 위해서는 적정재배환경을 유지해야 한다는 것을 알 수 있었다.

적 요

본 연구는 생육초기 저온 저일조 조건이 토마토의 수량 및 품질에 미치는 영향을 구명하기 위해서 수행되었다. 비가림 하우스에서 정식 후 17일에 측창 개폐와 차광막을 이용하여 26일간 저온, 저온차광 처리하였다. 처리기간 동안의 토마토 GDD를 산출한 결과 저온 처리로 인해 GDD가 5.5% 감소하였다. 차광 처리에 의한 평균 일사량을 분석한 결과 대조구 대비 차광처리가 25.3% 수준이었으며, 일 최고광량의 평균을

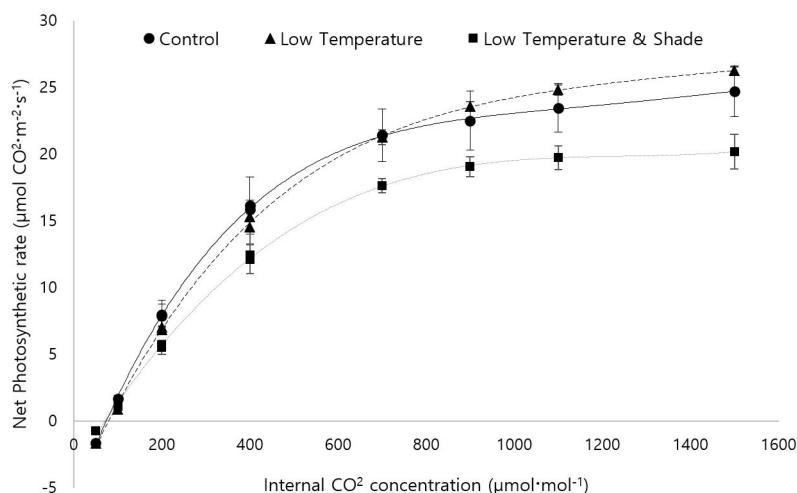


Fig. 3. A-Ci curve of tomatoes in control, low temperature, and low temperature with shade environments (n = 3).

Table 3. Estimated photosynthetic parameters of biochemical model for tomatoes in control, low temperature, and low temperature with shade environments (n = 3).

Treatment ^z	Control	Low Temp	Low Temp & Shade
V _{max} (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	78.6 a ^y	64.0 b	41.7 c
J (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	116.0 a	110.3 a	83.3 b
TPU (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	8.8 a	9.1 a	6.9 b
R _d (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	3.3 a	3.4 a	0.9 b
g _m (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹ ·Pa ⁻¹)	30.0 a	30.0 a	28.5 a

^z V_{max}, maximum Rubisco carboxylation efficiency; J, maximum rate of electron transport for the given light intensity; TPU, maximum rate of triose phosphate use; R_d, day respiration; g_m, mesophyll conductance to CO₂ transfer.

^y Different letters within columns indicate significant difference based on LSD test, 5% level.

분석한 결과 대조구, 차광처리가 각각 634, 156W·m⁻²였다. 처리 결과 저온차광에 의하여 엽수, 엽면적, 생체중, 건물중, SPAD를 분석한 결과 차광에 처리에 의하여 생육이 저하된 것을 볼 수 있었으며 초장은 웃자란 것을 확인할 수 있었다. 수량을 분석한 결과 첫 수확일은 정식 후 63일로 동일 하였으나 무처리구, 저온처리, 저온 강차광 순으로 각각 177, 99, 53g/plant로 최대 3.3배까지 차이를 보였으며, 최종 수확일인 정식 후 87일의 누적수량은 각각 1734, 1131, 854g/plant로 생육 초기 저온, 저온차광 처리에 의하여 수량이 각각 34.8, 50.7% 감소한 것을 확인할 수 있었다. 처리와 수확기에 따른 토마토의 품질을 조사한 결과 당도와 산도는 처리 및 수확기에 따른 차이가 없었다. 처리에 따른 광합성 특성을 조사하기 위하여 이산화탄소반응 곡선을 작성하고 광합성 기구의 생화학적 모델을 활용하여 분석한 결과 최대 광합성 속도와 J, TPU, R_d는 온도에 따른 차이를 보이지 않았으나 차광에 의하여 감소된 것을 확인할 수 있으며, V_{cm_{max}}의 경우 저온 과 차광에 따라서 값이 감소되는 것을 확인할 수 있었다. 이로 보아 정식 후 생육초기 저온 저일조는 토마토의 초기생육과 광합성능력을 감소시키며, 생육이 진행되면서 생육에 대한 차이가 없어지거나 줄어들고 품질 변화도 나타나지 않았지만 누적 수량이 감소하기에 이를 방지하기 위해서는 생육초기 저온 및 저온저일조 등 이상기상 발생시 보온 및 보광이 필요하다.

추가주제어: 수량, 이상기상, 저온, 저일조, 품질, 토마토

사 사

본 성과물은 농촌진흥청 연구사업(세부과제번호: PJ01266601)의 지원에 의해 이루어진 것임.

Literature Cited

Abdel-Mawgoud A.M.R., S.O. El-Abd, S.M. Singer, A.F. Abou-Hadid, and T.C. Hsiao 1996, Effect of shade on the growth and yield of tomato plants. *Acta Hort* 434:313-320. doi:10.17660/ActaHortic.1996.434.38

Adams S.R., K.E. Cockshull, and C.R.J. Cave 2001a, Effect of temperature on the growth and development of tomato fruits. *Ann Bot* 88:869-877. doi:10.1006/anbo.2001.1524

Adams S.R., V.M. Valdeés, C.R.J. Cave, and J.S. Fenlon 2001b, The impact of changing light levels and fruit load on the pattern of tomato yields. *J Hort Sci Biotechnol* 76:368-373. doi:10.1080/14620316.2001.11511379

Choi Y.H., J.H. Lee, D.K. Park, J.K. Kwon, and Y.C. Um 2000, Effect of greenhouse cooling method on the growth and

yield of the tomato cv. Momotaro in warm season. *J Bio-Env Con* 9:60-65. (in Korean)

Cockshull K.E., C.J. Graves, and C.R. Cave 1992, The influence of shading on yield of glasshouse tomatoes. *J Hort Sci* 67:11-24. doi:10.1080/00221589.1992.11516215

Farquhar G.D., S.V. von Caemmerer, and J.A. Berry 1980, A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C3 species. *Planta* 149:78-90. doi:10.1007/BF00386231

Gent M.P. 2007, Effect of degree and duration of shade on quality of greenhouse tomato. *HortScience* 42:514-520. doi:10.21273/HORTSCI.42.3.514

Heuvelink E. (Ed.) 2018, Tomatoes. CABI, Boston, USA.

Idris A, A.C. Linatoc, M.F. Bin Abu Bakar 2018, Effect of light intensity on the gas exchange characteristics of *Melothria pendula*. In IOP Conference Series: Earth and Environment Science, 269:012021. doi:10.1088/1755-1315/269/1/012021

Ilić Z.S., L. Milenković, L. Stanojević, D. Cvetković, and E. Fallik 2012, Effects of the modification of light intensity by color shade nets on yield and quality of tomato fruits. *Sci Hort* 139:90-95. doi:10.1016/j.scienta.2012.03.009

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2014, AR5 synthesis report: Climate change 2014, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf, pp 35-38.

Kläring H.P., and A. Krumbein 2013, The effect of constraining the intensity of solar radiation on the photosynthesis, growth, yield and product quality of tomato. *J Agron Crop Sci* 199:351-359. doi:10.1111/jac.12018

KMA 2019, 2018 abnormal climate report, Korea Meteorological Administration, Seoul, Korea, pp 78-79. (in Korean)

Lim C.H., D. Kim, Y.S. Shin, and W.K. Lee 2015, Assessment of drought severity on cropland in Korea Peninsula using normalized precipitation evapotranspiration index (NPEI). *J Clim Chang* 6:223-231. (in Korean) doi:10.15531/kscer.2015.6.3.223

Moon W., J.K. Kim, and J.W. Lee 2012, Horticulture 1, Knou press, Seoul, Korea, pp 209. (in Korean)

Moon W., Y.B. Lee, and J.I. Son 2011, Protected Horticulture, Knou press, Seoul, Korea, pp 131-133. (in Korean)

Moriondo M., C. Giannakopoulos, and M. Bindi 2011, Climate change impact assessment: the role of climate extremes in crop yield simulation. *Climatic change* 104:679-701. doi:10.1007/s10584-010-9871-0

Nam S.W., Y.S. Kim, and D.U. Seo 2014, Change in the plant temperature of tomato by fogging and airflow in plastic greenhouse. *Protected Hort Plant Fac* 23:11-18. (in Korean) doi:10.12791/KSBEC.2014.23.1.011

Ntatisi G., D. Savvas, H.P. Kläring, and D. Schwarz 2014, Growth, yield, and metabolic responses of temperature-stressed tomato to grafting onto rootstocks differing in cold tolerance. *J Amer Soc Hort Sci* 139:230-243. doi:10.21273/

- JASHS.139.2.230
- Park K.S., S.K. Kim, S.G. Lee, H.J. Lee, and J.K. Kwon 2018, Application of plasma lighting for growth and flowering of tomato plants. *HEB* 59:827-833. doi:10.1007/s13580-018-0052-9
- Pathak T.B., and C.S. Stoddard 2018, Climate change effects on the processing tomato growing season in California using growing degree day model. *Modeling Earth Systems and Environment* 4:765-775. doi:10.1007/s40808-018-0460-y
- RDA 2020, Tomato, Rural Development Administration, Junju, Korea, pp 38-39. (in Korean)
- Ryu S.N., and K.S. Kim 2010, The principal of cultivation, Knou press, Seoul, Korea, pp 193. (in Korean)
- Sharkey T.D. 1985, Photosynthesis in intact leaves of C3 plants: physics, physiology and rate limitations. *Bot Rev* 51:53-105. doi:10.1007/BF02861058
- Sharkey T.D. 2016, What gas exchange data can tell us about photosynthesis. *Plant Cell Environ* 39:1161-1163. doi:10.1111/pce.12641
- Sharkey T.D., C.J. Bernacchi, G.D. Farquhar, and E.L. Singsaas 2007, Fitting photosynthetic carbon dioxide response curves for C3 leaves. *Plant Cell Environ* 30:1035-1040. doi:10.1111/j.1365-3040.2007.01710.x
- Van Ploeg D., and E. Heuvelink 2005, Influence of sub-optimal temperature on tomato growth and yield: a review. *J Horticult Sci Biotechnol* 80:652-659. doi:10.1080/14620316.2005.11511994
- Way D.A., and W. Yamori 2014, Thermal acclimation of photosynthesis: on the importance of adjusting our definitions and accounting for thermal acclimation of respiration. *Photosynth Res* 119:89-100, doi:10.1007/s11120-013-9873-7