

Research Article



CrossMark

Open Access

장기간 온도상승이 시설재배 ‘부지화’의 수체 생장 및 과실 품질에 미치는 영향

김미선^{1†}, 문영일^{1†}, 김상숙¹, 좌재호¹, 윤석규², 박요섭^{1*}

¹농촌진흥청 국립원예특작과학원 감귤연구소, ²농촌진흥청 국립원예특작과학원 온난화대응농업연구소

Long-term Elevated Temperature Affects the Growth and Quality of ‘Shiranuhi’ Mandarin Grown in a Green House

Misun Kim^{1†}, Young-Eel Moon^{1†}, Sang Suk Kim¹, Jaeho Joa¹, Seok Kyu Yun², YoSup Park^{1*} (¹Citrus Research Institute, National Institute of Horticultural & Herbal Science, Rural Development Administration, Jeju 63607, Korea, ²Climate Change and Agriculture, National Institute of Horticultural & Herbal Science, Rural Development Administration, Jeju 63240, Korea)

Received: 7 October 2022/ Revised: 19 November 2022/ Accepted: 20 December 2022

Copyright © 2022 The Korean Society of Environmental Agriculture

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID

Misun Kim

<https://orcid.org/0000-0002-5275-3691>

Young-Eel Moon

<https://orcid.org/0000-0002-1334-7711>

Sang Suk Kim

<https://orcid.org/0000-0002-1934-671x>

Jaeho Joa

<https://orcid.org/0000-0001-5421-6286>

Seok Kyu Yun

<https://orcid.org/0000-0001-5354-6777>

YoSup Park

<https://orcid.org/0000-0001-5762-1033>

Abstract

BACKGROUND: The mean annual temperature of the Korean Peninsula will continue to rise due to global warming. ‘Shiranuhi’ mandarin—a late-harvest cultivar—is primarily cultivated in plastic greenhouses where high temperatures cannot be directly avoided. Therefore, growth and fruit quality changes under elevated temperatures must be investigated.

METHODS AND RESULTS: Elevated temperatures were divided into three groups [2°C (T-I), 4°C (T-II), and 6°C (T-III) above the ambient temperature] during the 2019-2020 season. Mean temperatures were 17.1°C, 18.6°C, and 20.2°C in T-I, T-II, and T-III, respectively. The

bud bursts in T-II and T-III were earlier than that in T-I at 7 days and 11 days, respectively. And the full blooms in T-II and T-III were earlier than that in T-I at 11 days and 23 days, respectively. Fruit size significantly increased with increased temperature. The citrus color index in the coloring phase markedly differed across treatments. Further, total soluble solid and acid contents markedly changed with temperature rise but the sugar-to-acid ratio did not. Sucrose content tended to decrease with increase in temperature, but citric acid content remained unaffected. **CONCLUSION(S):** Elevated temperature accelerated plant growth and development but delayed rind color development in ‘Shiranuhi’ mandarin. Therefore, rise in ambient temperature by >4.6°C may negatively affect yield and fruit quality.

Key words: Citric acid, Elevated temperature, ‘Shiranuhi’ mandarin, Sucrose

[†]These two authors contributed equally to this work.

* Corresponding author: YoSup Park

Phone: +82-64-730-4172; Fax: +82-64-730-4111;

E-mail: yspark1219@korea.kr

서론

기후변화에 관한 정부간 패널(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)의 제6차 보고서에 의하면, 지구 온난화로 인하여 2011-2020년 지구 표면 온도는 1850-1900년보다 1.09°C 높으며, 이는 2001-2020년보다 0.1°C 더 높은 수치를 나타내었다. 이는 온도상승이 현재에도 진행중임을 내포하고 있다. 또한 기상청은 한반도의 연평균 기온이 온실가스 배출 정도에 따라 2081-2100년에는 2.6-7.0°C 상승할 것으로 보고하였다. 온주밀감의 발아기와 만개기는 지난 60년대 이래 0.3-0.5일 앞당겨졌으나, 최근 10년 동안 매년 1.4일로 더 앞당겨지고 있다[1]. 따라서 앞으로도 발아기와 만개기는 더 빨라질 것으로 예상된다. 기후 변화시나리오를 적용한 결과 온주밀감과는 다르게 만감류의 재배는 북위도로 확장되어 증가할 것으로 예측한 바 있다[2].

감귤은 미기상에 민감하며, 온도는 감귤류의 과일 품질 특성에 가장 중요한 영향을 미친다[3]. 특히 고온과 같은 환경요소 변화는 감귤 생산성을 크게 떨어뜨리며, 착색 지연, 산함량 등의 감소를 동반한다[4-7]. '부지화' [(*Citrus unshiu* × *Citrus sinensis*) × *Citrus reticulata*]는 일본에서 육성된 품종으로 1980년 후반에 도입된 이래 지난 30여년간 한국에서 대표적인 만감류이다[6]. 생육 온도가 높은 '부지화'는 우리나라에서는 노지재배보다는 주로 시설재배 위주로 가온 또는 비가림 형태로 이뤄지고 있다[2]. 따라서 시설이라는 밀폐된 환경에서 다년생 과수의 특성상 이동이 제한되어 고온을 회피하기에는 많은 어려움이 있을 것으로 생각된다. 이전 연구에서는 '부지화' 시설 재배에 있어 온도상승과 관련하여 봄철 또는 봄철-수확기와 같은 한정된 기간 동안만 연구가 이뤄진 바 있으나[6, 8], 전체 생육기간 동안에 온도상승이 '부지화'의 수체 생육 및 과실 품질에 미치는 영향에 대한 연구는 미미한 실정이다.

따라서 본 연구는 전체 생육기 동안의 온도상승 처리가 '부지화'의 생장 및 과실품질에 미치는 영향을 구명하여 미래 기온상승에 대비하기 위한 '부지화'의 고품질 과실을 생산하기 위한 기초자료를 얻고자 수행하였다.

재료 및 방법

식물재료 및 고온 재배환경

본 연구는 제주도 서귀포시 남원읍에 위치한 농촌진흥청 감귤연구소 온도구배터널 하우스에 2.7 × 2.7 m로 식재된 주간 직경이 70-75 mm, 수고는 1.6-1.8 m의 12년생 '부지화' 감귤을 공시품종(대목: 탕자)으로 이용하였다. 하우스 피복은 0.1 mm 폴리에틸렌 필름을 사용하여 피복하였고, 광환경은 자연광의 약 80%가 투과되도록 하였다. 시설 내 온도 측정은 2.5 m 높이에 설치된 온도센서(1400-101, LI-COR Inc., USA)를 이용하여 10분 간격으로 측정하였고, 데이터로거를 통해 정보를 수집하였다(CR1000, Campbell Scientific Inc., USA). 온도처리는 시설 바깥쪽에 설치된 실시간 수집된 기상데이터

(TGC-soldan, Soldan Corp., Korea)를 바탕으로 대기 외부 온도보다 입구에서부터 터널 끝쪽까지 2-6°C 점진적으로 온도 구배를 이룰 수 있도록 설정하여 TI(입구), T-II(중앙), T-III(터널 끝)로 구분하였다. 온도 처리 기간은 2019년 1월부터 2021년 2월 초순까지 전체 생육기를 걸쳐서 이뤄졌으며, 하우스 내 병해충 및 재배법은 농촌진흥청에서 고시한 표준영농교본을 따라 관리하였다.

광합성 특성 분석

2020년 8월 중순 오전 8시부터 12시 사이에 처리구별 나무 3개체, 랜덤 5반복으로 나무의 중간에 위치한 전년도 봄 신초의 끝에서 3-4번째 잎을 분석에 이용하였다. 광합성 측정 조건은 포화광 1,000 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 온도 25°C, 상대습도 50%, CO₂ 농도 400 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 공기유속 400 $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$ 으로 인공광 챔버가 부착된 광합성측정기(LI-6800, LI-COR Inc., USA)를 이용하여 광합성률, 기공전도도 및 증산율을 측정하였다.

개화, 수체 생육 및 과실 특성 분석

발아기 및 만개기 조사는 정아 및 액아 3 mm 이상 발생한 시기를 발아기, 꽃이 70-80% 이상 개화되었을 때 만개기로 정하여 육안으로 실시하였다. 화염비는 개화기 전후에 나무의 중간 정도에 위치한 100내외의 구엽(오래된 잎)을 가진 측지를 처리당 9개를 무작위로 설정하여 표시한 후 구엽에 대한 꽃의 수로 나타내었다. 또한, 표시된 측지를 대상으로 6월에 각 처리구당 30개의 순을 무작위로 설정하여 순 길이를 조사하였다.

착과율은 2차 생리적 낙과 종료시점인 7월 초순에 조사하였고, 수확량은 수확이 끝난 2월 초순에 전수 조사를 실시하였다. 과실의 비대는 7월 중순부터 12월 중순까지 나무의 중간 상부에 위치한 과실에 대하여 처리당 15과씩 선정하여 1개월 간격으로 과실의 중경과 횡경을 측정하였다. 과실의 특성 분석을 위해 11-1월에는 각 처리당 9과, 2월에는 각 처리당 30과를 이용하였다. 색차 분석은 CR-400 색차계(Konica Minolta Sensing Inc., Japan)를 이용하여 L, a, b값을 구한 후, 다음의 식에서 Citrus colour index (CCI)를 산출하였다[9].

$$CCI = (1000 \times a) / (L \times b)$$

당산 측정은 '부지화'의 과피와 과육을 분리한 후 거즈를 사용하여 착즙하였다. 가용성 고형물 함량은 휴대용 당도계(PAL-1, Atago co. Ltd., Japan)를 이용하여 측정하였고, 산함량은 착즙액을 증류수로 5배 희석하여 1% 페놀프탈레인 용액 1-2방울이 첨가된 0.1 N 수산화나트륨 용액에 적정하여 환산하였다. 모든 분석은 3회 반복 측정하였다. 남은 시료는 유리당과 유기산 측정을 위해 초저온냉동고(-80°C)에 보관하여 사용하였다.

유리당 및 유기산 함량 분석

과즙의 유리당 및 유기산 분석 조건은 Kim 등의 방법에 의하여 수행되었다[6]. 유리당과 유기산은 착즙액을 3차 종류

수로 각각 10배 및 5배 희석하였고, 희석된 착즙액은 glass fiber (GF) pre-filter가 장착된 polytetrafluoroethylene (PTFE) 실린지필터(0.2 μm , chromdisc, Taiwan)를 통해 여과하였다. 유리당은 RI 검출기(refractive index detector, RID-20A, Shimadzu Co., Ltd, Japan), 유기산은 UV-Visible 검출기(SPD 20A, Shimadzu Co., Ltd, Japan)가 장착된 Prominence ultrafast liquid chromatography (UFLC, Shimadzu Co., Ltd, Japan) 기기를 이용하여 각각 분석하였다.

유리당의 컬럼은 Zorbax NH2 (4.6 mm \times 250 mm \times 5 μm , Agilent Technologies Inc., USA), 이동상은 acetonitrile (ACN)/water (75/25, v/v), 유속은 1 mL/분을 유지하였고, 컬럼온도는 30°C, 시료는 10 μL 주입하였고, 40분 동안 분석하였다. 유기산 컬럼은 Shim-pack GIS C18 (4.6 mm \times 250 mm \times 5 μm , Shimadzu Co., Ltd, Japan), 이동상 용매는 10 mM sodium phosphate 용액(pH 2.6, 용매 A)와 ACN(용매B) 용액을 이용하였다. gradient조건은 A 용액 100%를 10분 동안 실시한 후, A용액 20%와 B용액 80% 비율로 10-17분, B용액 100%로 17-30분 동안 수행하였다. 유속은 1mL/분, 컬럼온도는 30°C, 주입량은 10 μL , 30분 동안, UV 226 nm에서 분석하였다. 분석을 위한 소프트웨어 프로그램은 Shimadzu의 LabSolutions를 사용하였다.

표준 물질은 sucrose, fructose, glucose, citric acid, malic acid (Sigma-Aldrich, USA)을 이용하였고, 표준 검량선을 작성하여 정량 분석에 사용하였다.

통계분석

자료의 통계분석은 R version 3.6.3 software package (R studio)를 사용하여 5% 유의수준에서 Scheffe's multiple range test를 수행하였다.

결과 및 고찰

시설내 온도환경

온주밀감의 과실생산에 적절한 온도는 연평균 15-18°C이다[10]. 온도구배 터널 하우스 내 온도 처리에 따른 일평균 대기온도 및 광량을 Fig. 1에 나타내었다. 2019년과 2020년도 온도에 대한 평년 값을 산출한 결과 일평균 외부 대기온도는 15.6°C이며, T-I처리구는 17.1°C, T-II처리구는 18.6°C, T-III처리구는 20.2°C로, 각각 외부대기온도에 대비하여 1.5°C, 2.9°C, 4.6°C 더 높게 확인되었다. 봄철(3-5월)의 주야간일평균온도는 T-I처리구가 18.5/12.2°C, T-II처리구는 19.7/13.5°C, T-III처리구가 21.7/15.1°C였고, 과실비대기(7-9월)에는 T-I처리구, T-II처리구, 및 T-III처리구의 온도는 각각 28.2/23.5°C, 29.5/24.8°C, 30.8/25.8°C이었다. 또한 10-12월에는 T-I처리구가 16.7/11.2°C, T-II처리구는 18.2/12.7°C, T-III처리구가 20.1/14.2°C를 나타내었다. 본 연구에서 온도구배 하우스 입구에 위치한 T-I처리구의 온도는 노지보다 약 2°C 높지만(Fig. 1), 이전 연구결과에서 보고한 '부지화' 무가온하우스의 내부 온도와 비슷하였다[6]. 따라서 노지와 하우스재배 환경을 비교하는 것은 강우, 일사량 등 내외부 환경 요인 차이가 크기 때문에 본 연구의 T-I처리구가 T-II처리구 및 T-III처리구의 대조구로 판단된다.

광합성 특성

감귤의 광합성이 가장 왕성하게 일어나는 온도는 25-30°C로 품종에 따라 다르며, 시기적으로는 우리나라의 7-9월에 해당한다[8]. 온도상승에 따른 여름철 '부지화'의 광합성특성을 조사한 결과, 광합성속도는 T-I처리구가 8.8 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 으로 T-II처리구 및 T-III처리의 8.0-8.6 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 과 차이가 없었다(Fig. 2). 또한 증산율, 기공전도도, 및 잎 온도에 대한 수

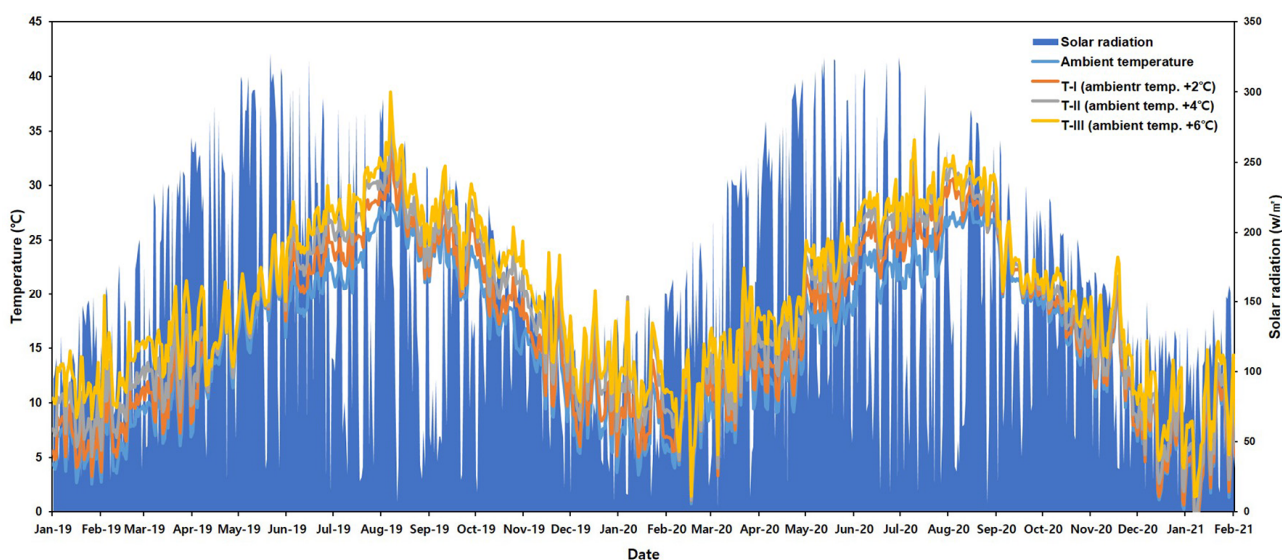


Fig. 1. Changes in daily mean air and mean solar radiation of 'Shiranuhi' mandarin fruit grown under elevated temperatures from 2019 and 2020.

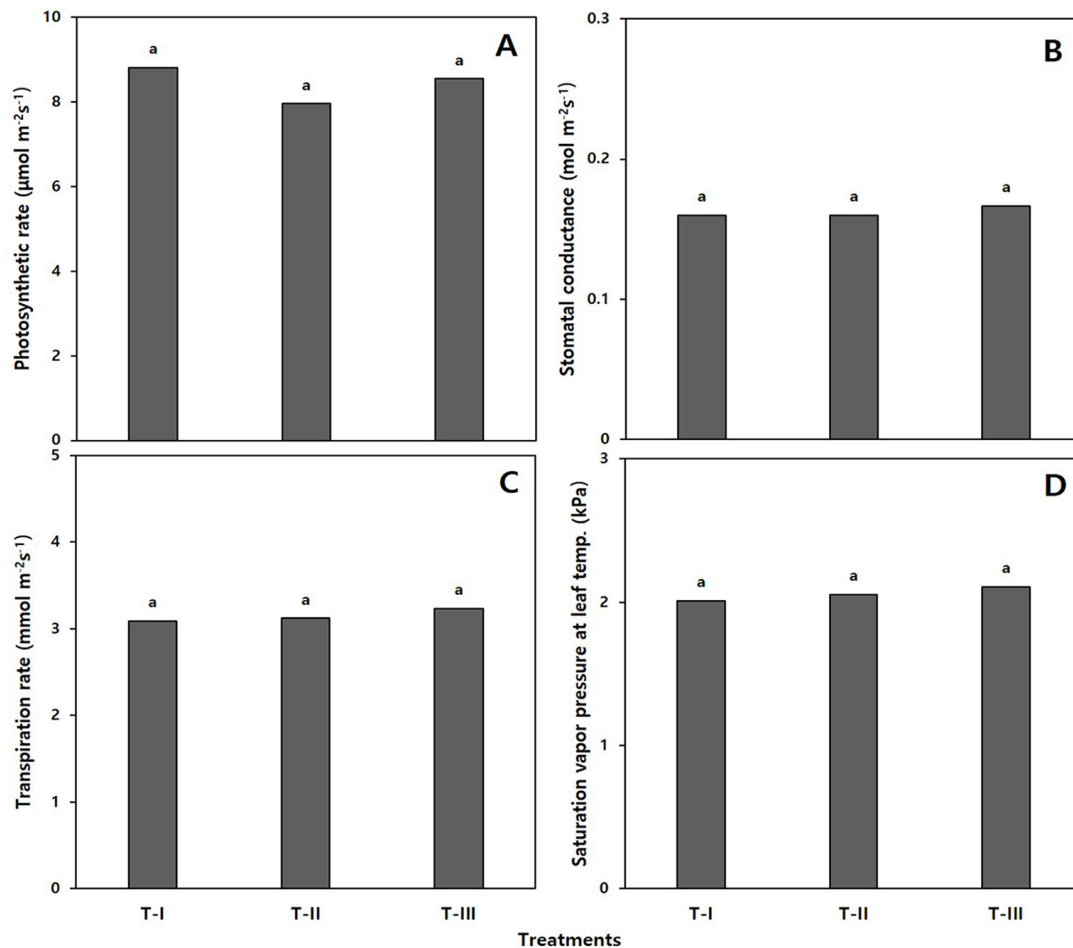


Fig. 2. Effect of elevated temperatures on photosynthetic rate (A), transpiration rate (B), stomatal conductance (C), and saturation vapor pressure at leaf temperature of 'Shiranuhi' mandarin fruit grown in plastic greenhouses, analyzed in mid-August in 2020.

Means followed by the same letter are not significantly different using Scheffe's multiple range test at 5% level.

증기압차에 있어서도 차이를 보이지 않았다(Fig. 2). 그러나 Moon et al.은 봄철에 주야가온(25/15°C 또는 28/18°C) 처리한 연구 결과에서 '부지화'의 광합성속도, 증산율 및 기공전도도가 무가온처리구보다 상당히 높게 나타났다고 보고한 바 있다[8]. 본 실험에서 7-9월의 평균온도는 25.3-28.0°C으로 광합성에 최적 온도 범위였지만[8], 처리간 광합성 특성에 차이가 없었던 것은 하우스 특성상 평균 일 최고 기온이 30.0°C 이상의 고온으로 인한 것으로 판단되었다. 이는 갈풀(*Phalaris arundinacea* L.)에서 전체 생육기 동안 3.5°C의 상승 온도 처리는 생장 초기 단계에서 잎의 광합성 능력과 탄소 축적을 크게 향상시켰으나, 최종 수확에서는 노화가 빨라지고 탄소저장능력이 감소하는 것으로 보고[11], 포도의 광합성 속도는 최적온도인 28.7°C에서 최대치가 되었다가 35°C를 초과하면 점차 감소하였다는 보고[12]와 동일하였다. 즉, '부지화'가 온주밀감에 비하여 고온에 강한 품종이지만 여름철의 지나친 고온 환경에서 지속적으로 노출될 경우 잎의 광합성 능력을 향상시키는 데는 한계가 있기 때문[8]에, 시기별 광합성 능력을 좀 더 체계적으로 검토해 볼 필요가 있을 것으로 생각된다.

수체 생장 특성

2019-2020년 전체 생육기 상승 온도 처리가 '부지화'의 발아 및 개화에 대한 조사결과를 Table 1에 나타내었다. 처리 1년차(2019년)에는 T-III 처리구의 발아가 3월 5일로, T-I처리구 및 T-II처리구에 비해 각각 13일, 7일 앞당겨졌으며, T-III처리구의 만개기는 T-I처리구 및 T-II처리구에 비해 각각 20일, 14일 앞당겨졌다. 처리 2년차(2020년)에는 T-III처리구의 발아가 3월 9일로, T-I처리구 및 T-II처리구에 비해 각각 9일, 1일 앞당겨졌다. 만개기도 T-III처리구가 T-I처리구 및 T-II처리구에 비해 각각 26일, 10일 앞당겨졌다. 처리 1년차와 2년차에 대한 발아기와 만개기 값에 대해 각각 합산 후 평균으로 나누어 산출한 결과, T-II처리구와 T-III처리구의 발아기는 각각 3월 11일, 3월 7일로, T-I처리구의 3월 18일보다 각각 7일, 11일 앞당겨졌으며, 만개기 역시 T-II처리구와 T-III처리구는 4월 26일, 4월 14일로, T-I처리구의 5월 7일보다 각각 11일, 23일 앞당겨졌다. 이 결과는 '부지화'의 봄철 주/야 가온시(25/15°C 및 28/18°C) 발아기는 11-15일, 만개기는 22-45일 앞당겨졌다고 보고한 이전 결과와 유사하였다[8]. 또한

Table 1. Changes in vegetative growth of 'Shiranuhi' mandarin fruit grown under elevated temperatures from 2019 and 2020

Year	Treat	Bud burst	Full bloom	Flower/leaves	Shoot length (cm)
2019	T-I	Mar. 18	May 6	0.76 a ^z	9.0 b
	T-II	Mar. 12	Apr. 30	0.77 a	17.2 a
	T-III	Mar. 5	Apr. 16	0.77 a	24.0 a
2020	T-I	Mar. 18	May 9	0.20 bz	17.3 b
	T-II	Mar. 10	Apr. 23	0.57 ab	32.4 a
	T-III	Mar. 9	Apr. 13	0.64 a	33.1 a

^zMeans followed by the same letter are not significantly different using Sheffe's multiple range test at 5% level.

감귤 발아는 봄철 고온에 감응하여 진행되기 때문이며, 온도가 높고 기온이 상승할수록 앞당겨지며, 기후변화에 따른 기온상승으로 인하여 온주밀감에서 발아 시기가 지속적으로 빨라지고 있다[1]. 한편, 그레이프프루트(grapefruit)에서는 고온이 꽃의 발달을 가속화하고 개화기간을 단축시킨다는 보고도 있다[13].

화엽비에 있어서는 처리 1년차에는 0.76-0.77개로 상승온도 처리간 유의차가 없었으나 신초장은 T-II처리구 및 T-III처리구에 비해 T-I처리구가 약 1.9-2.6배 작아 통계적으로 유의하였다(Table 1). 처리 2년차에는 화엽비가 T-III처리구에서 0.64개로 T-I처리구 및 T-II처리구에 비해 많았고, 신초장도 T-III처리구에서 33.1 cm로 가장 길게 나타나 처리간 유의차를 나타내었다. '부지화' 관련 기온상승 연구들을 살펴보면, 봄철 가온 처리시 온도가 높을 수록 화엽비 및 신초발생율은 감소한 반면에 신초장은 유의하게 증가하였다고 보고[8]와 주간 온도가 대기온도보다 8°C 상승한 처리구는 신초발생율과 신초장이 대조구보다 유의하게 증가한 반면에, 야간온도만 4°C 상승한 처리구에서는 신초 발생율이 대조구보다 적고, 신초장은 유의하게 증가하였다고 보고가 있다[6]. 따라서 주야간 고온은 '부지화'의 신초생장을 유도하는 경향이 있는 것으로 판단된다.

처리 1년차 착과율과 과실수는 T-I처리구가 각각 11.4% 및 150개를 나타내었지만 온도처리간 유의차는 없었다. 상품율과 수확량도 T-I처리구에서 각각 85.9% 및 28.0 kg를 나타내었

다(Table 2). 처리 2년차에서는 착과율이 T-I처리구가 20.8%로 T-II처리구 및 T-III처리구에 비해 유의하게 높게 나타났으나, 착과수에는 차이가 없었다. 상품율은 T-I처리구에서 94.1%였고, 수확량은 T-II처리구에서 34 kg를 나타내었으나 처리간 유의성은 인정되지 않았다. 이전 연구에서 봄철 가온처리시에는 '부지화' 착과율에 영향이 없었다는 보고하였는데[8], 본 연구의 2년차인 2020년의 착과율에 영향을 미친 원인은 '부지화'의 생리낙과 종료기인 6월의 일평균최대온도가 T-II처리구 및 T-III처리구에서 30-32°C로 2019년의 28-30°C보다 높은 고온으로 인해 낙과율이 90% 이상을 나타낸 것이 원인으로 판단된다.

과실 생장 및 품질 특성

온도상승이 과실 비대에 미치는 영향을 알아보기 위하여 '부지화'의 과실 비대기인 7월부터 비대종료기인 12월까지 조사하였다(Fig. 3). 처리 1년차 및 2년차의 횡경의 크기는 T-II처리구와 T-III처리구는 T-I처리구에 비해서는 우세한 차이를 보이며 온도가 상승함에 따라 증가하였으나 두 처리 간에는 비슷하였다. 종경의 크기도 T-I처리구에 비해 T-II처리구 및 T-III처리구가 온도 상승에 따라 현저한 증가를 나타내었다. 수확 후 과실의 횡경 및 종경은 온도상승에 따라 현저하게 증가하였다(Table 3). 온도상승이 '부지화'의 과실 비대 촉진에 영향을 끼친다고 보고한 이전 연구 결과와 유사하였다[6, 8].

Table 2. Changes in fruit set and total fruit weight of 'Shiranuhi' mandarin fruit grown under elevated temperatures from 2019 and 2020

Year	Treat	Fruit set (%) ^z	No. fruits/tree	Yield rate (%) ^y	Total fruit weight (kg)/tree
2019	T-I	11.4 a ^x	150.7 a	85.9 a	28.0 a
	T-II	7.0 a	151.0 a	67.5 a	27.0 a
	T-III	6.3 a	108.3 a	70.5 a	17.0 a
2020	T-I	20.8 ax	110.3 a	94.1 a	26.2 a
	T-II	5.3 b	143.3 a	84.1 a	34.0 a
	T-III	2.5 b	71.7 a	79.4 a	17.2 a

^zThe percentage of fruit set was calculated as the number of fruit per number of flowers × 100.

^yThe percentage of yield was calculated as the number of fruit per loss with physiological disorders and decay × 100.

^xMeans followed by the same letter are not significantly different using Sheffe's multiple range test at 5% level.

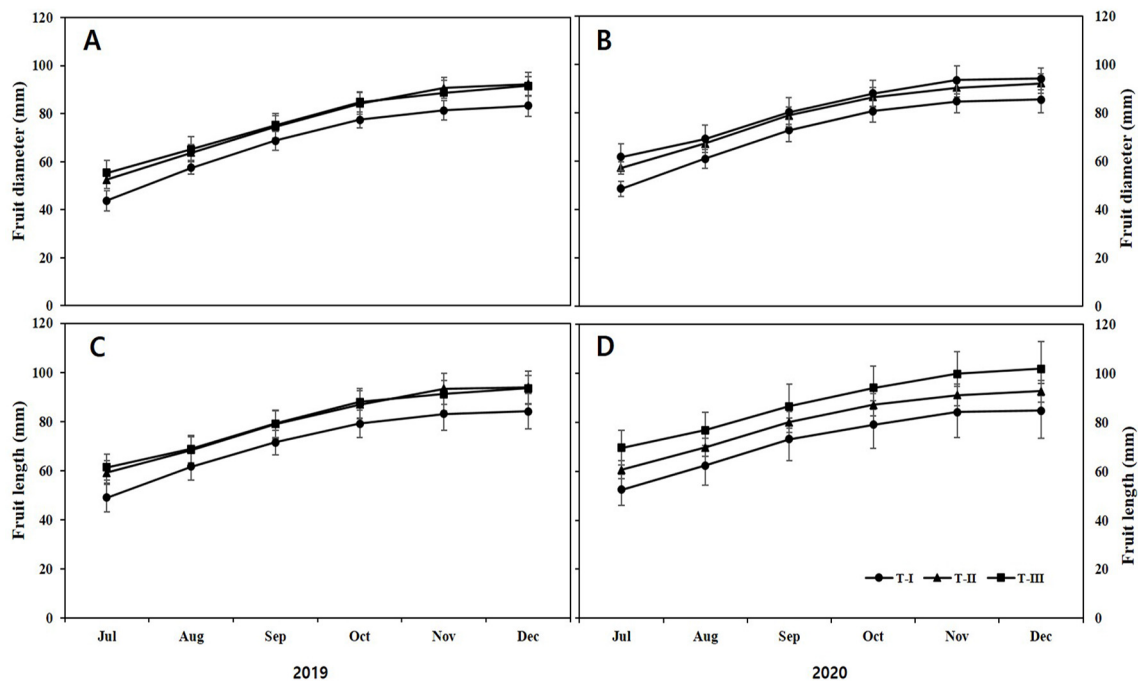


Fig. 3 Changes in fruit diameter (A and B) and length (C and D) of 'Shiranuhi' mandarin fruit grown under elevated temperatures from 2019 and 2020.

Each symbol with an error bar represents the mean \pm SD (n=15).

Table 3. Changes in fruit characteristic of 'Shiranuhi' mandarin fruit grown under elevated temperatures at harvest time

Year	Treat	Fruit			Edible portion (%) ^z	Peel thickness (mm)	Total soluble solids	Acidity (%)	TSS/Acidity	Color			CCI ^y
		Diameter (mm)	Length (mm)	Weight (g)						L	a	b	
2019	T-I	83.4 b ^x	86.2 b	271.3 b	74.3 b	4.2 a	14.8 a	1.6 a	9.8 a	64.7 a	22.9 a	38.1 a	9.4 b
	T-II	89.5 a	93.3 a	329.5 a	75.2 a	4.2 a	14.5 a	1.4 a	10.8 a	62.0 b	23.5 a	36.1 b	10.6 a
	T-III	88.8 a	92.3 a	324.4 a	71.8 b	4.6 a	15.0 a	1.4 a	10.3 a	61.2 b	22.8 a	35.2 b	10.3 a
2020	T-I	80.8 c ^z	79.4 c	244.1 c	75.8 a	3.9 b	15.2 a	1.2 a	12.9 a	60.9 a	25.9 a	36.8 a	11.6 b
	T-II	89.4 b	89.4 b	331.1 b	76.4 a	4.3 ab	14.8 a	1.1 ab	13.6 a	59.4 b	24.7 b	35.7 b	11.7 ab
	T-III	98.5 a	95.4 a	386.2 a	74.6 a	4.7 a	14.0 b	1.1 b	13.9 a	57.1 c	24.4 b	34.3 c	12.5 a

^zThe percentage of edible portion was calculated as the pulp weight per fruit weight \times 100.

^yThe CCI was calculated as the $(1000 \times a) / (L \times b)$.

^xMeans followed by the same letter are not significantly different using Sheffe's multiple range test at 5% level

감귤의 성숙 기준은 나라별 법적 시행기준 및 종과 품종에 따라 다르지만 일반적으로 당산비, 최소주스함량 및 과피색을 가지고 판단한다[14]. 그 중 우리나라에서는 '부지화' 상품출하 기준은 당도 12 °brix 이상, 산함량 1.1% 이하로 즉, 당산비 12 이상이며 상품과 무게 기준은 200 g 이상이다[15]. 소비자 들은 '부지화' 구입시 300-370g의 대과를 선호하는 것으로 나타났다[16].

11월에서 1월까지 가용성고형물 함량은 증가하였는데, 처리 1년차에는 처리간 차이가 없었다. 2월 수확 후에도 14.5-15.0 °Brix로 처리간 유의차가 없었다. 처리 2년차에는 11월과 1월에는 가용성고형물 함량이 T-I처리구에서 높게 나타나 온도상승에 따라 감소하는 경향을 나타내었고, 2월 수확 후의

가용성고형물 함량은 T-III처리구가 14.0° Brix로 가장 낮게 나타나 온도 상승에 따라 유의하게 감소하였다(Table 3 and Fig. 4A).

산함량은 처리 1년차에서는 11월에서 2월 수확기에서도 온도 처리간 유의차가 없었다. 처리 2년차에서는 처리 1년차와 비슷한 경향을 나타내었으나, 2월 수확기에는 T-I처리구가 1.2%로 T-III처리구에 비해 유의하게 높게 나타났다(Table 3 and Fig. 4B).

당산비는 1년차 및 2년차에서 11월에서 1월까지 처리간 유의차는 없었다. 2월 수확기에도 1년차는 9.8-10.8를, 2년차에서는 12.9-13.9를 나타내었으나, 온도처리간 유의차는 없었다 (Table 3 and Fig. 4C).

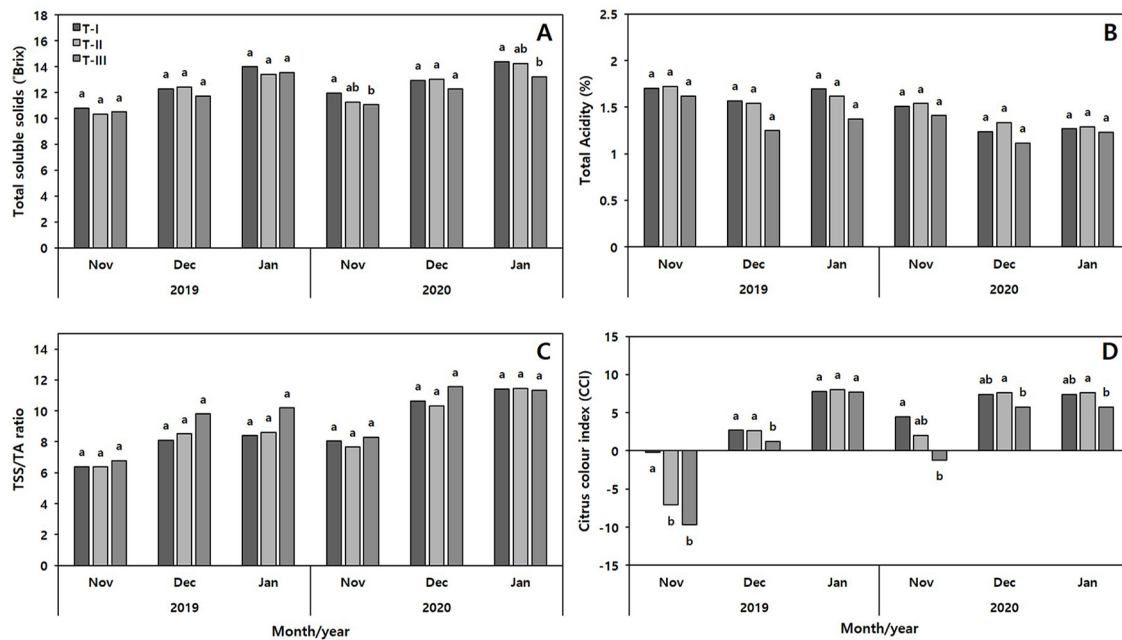


Fig. 4. Changes in total soluble solids (A), total acidity (B), TSS/TA ratio (C), and citrus colour index (D) of 'Shiranuhi' mandarin fruit grown under elevated temperatures from 2019 and 2020.

Means followed by the same letter are not significantly different using Sheffe's multiple range test at 5% level.

본 연구에서 장기간 '부지화'의 상승온도 처리는 2월 수확기의 총 가용성고형물량과 산함량에 있어 1년차에는 처리간 차이가 없었으나 2년차에는 T-III처리구에서 유의하게 낮게 나타났다. 당산비에는 차이가 없었다. Moon et al.이 '부지화'의 봄철 가온 처리에 따라 총가용성고형물 함량과 산함량은 감소하였지만 당산비에는 영향을 끼치지 않았다고 보고한 선행 연구 결과와 유사하였다[8]. 한편 '부지화'에서 대기온도보다 8°C 높은 주간 가온처리는 총 가용성고형물함량의 감소를 초래하고, 대기온도보다 4°C 높은 주야간 온도의 상승은 산함량 감소에 많은 영향을 끼친다고 보고한 바 있다[6]. 따라서 '부지화' 시설재배에서 고온은 총가용성고형물 및 산함량 감소와 관련이 있는 것으로 판단된다. 온도가 상승함에 따라 과일 크기 역시 확대되었는데, 감귤류에서 과실 크기 증가에 따라 과즙량은 많아지고, 가용성고형물 함량 및 산함량이 감소하였다는 보고[17]가 있다. 따라서 과실 크기 증가에 의한 총 가용성고형물 및 산함량이 줄어들 가능성도 있다. 또한, 온주밀감 과피의 광합성과 대기중 이산화탄소를 옥살로아세트산으로 고정시키는 효소인 Phosphoenolpyruvate Carboxylase (PEPC)가 가장 활발하게 증가하여 이산화탄소가 적극적으로 동화되는 시기는 만개 후 92-126일이며, 이는 유과기로 수확시 당 농도를 결정한다고 하였다[18]. 시설재배 '부지화'에서 있어 이 시기가 여름철 고온기인 7-9월에 해당된다. 따라서 차후 '부지화' 과실의 시기별 광합성 능력 및 PEPC활성에 대한 추가적인 조사가 필요할 것으로 사료된다.

감귤의 내외부 착색에 관여하는 주요 성분은 카로티노이드 색소이며, 감귤의 외관(과피)은 소비자가 첫번째로 인식하는 중요한 요소이다[19]. 감귤의 착색정도를 나타내는 감귤착색지수

(CCI)는 처리 1년차에서 착색 중기인 11월에는 T-II 및 T-III 처리구에서 부(-)의 값을 나타내면서 T-I처리구에 비해 유의하게 작았지만 착색 후기인 12월에서는 양(+)의 값으로 점차 회복되었다. 2월 수확 후에는 T-III처리구는 T-I처리구에 비해 CCI 값이 높게 나타났다. 처리 2년차도 1년차와 비슷한 경향을 나타내면서 회복되었다(Table 3 and Fig. 4D). 수확후 T-III처리구의 CCI값의 증가를 나타낸 원인은 명도를 나타내는 L값과 황색을 나타내는 b값의 감소 때문으로 판단된다(Table 3). 감귤류의 변색은 약 13°C에서 이뤄진다고 알려져 있다[20]. 본 연구 기간 동안 10월의 T-I처리구의 일평균야간 온도는 약 13°C였으며, T-II처리구와 T-III처리구는 15°C 이상으로(Fig. 1), '부지화'의 변색을 방해하는 비교적 고온에 해당되었기 때문에 착색에 영향을 끼친 것으로 판단된다.

2월 수확 후 평균 과중은 처리 1년차 온도 처리에 따라 271-324 g이었고, 2년차는 244-386 g으로 온도상승에 따라 현저하게 증가하였다(Table 3). 과육의 비율은 처리 1년차에서는 T-II처리구에서 75.2%로 가장 높아 통계적으로 유의하였으나, 2년차에서는 74.6-75.8%으로 처리간 유의차가 없었다. '부지화'는 온주밀감에 비해 두꺼운 과피를 지니고 있는데, 과피 두께는 처리 1년차에서 온도상승에 따른 차이는 없었으나 2년차에는 T-III처리구에서 4.7 mm로 통계적으로 높게 나타났다.

온도상승 처리에 따른 '부지화'의 fructose, glucose, sucrose를 분석한 결과, 11월부터 수확기인 2월까지 현저한 증가를 나타내었다(Fig. 5). 시기별 Fructose는 22.1-29.7 mg/mL, glucose는 22.5-29.3 mg/mL, sucrose는 53.4-88.2 mg/mL, 총 유리당 함량은 98.2-147.7 mg/mL를 나타내었다. Fruc-

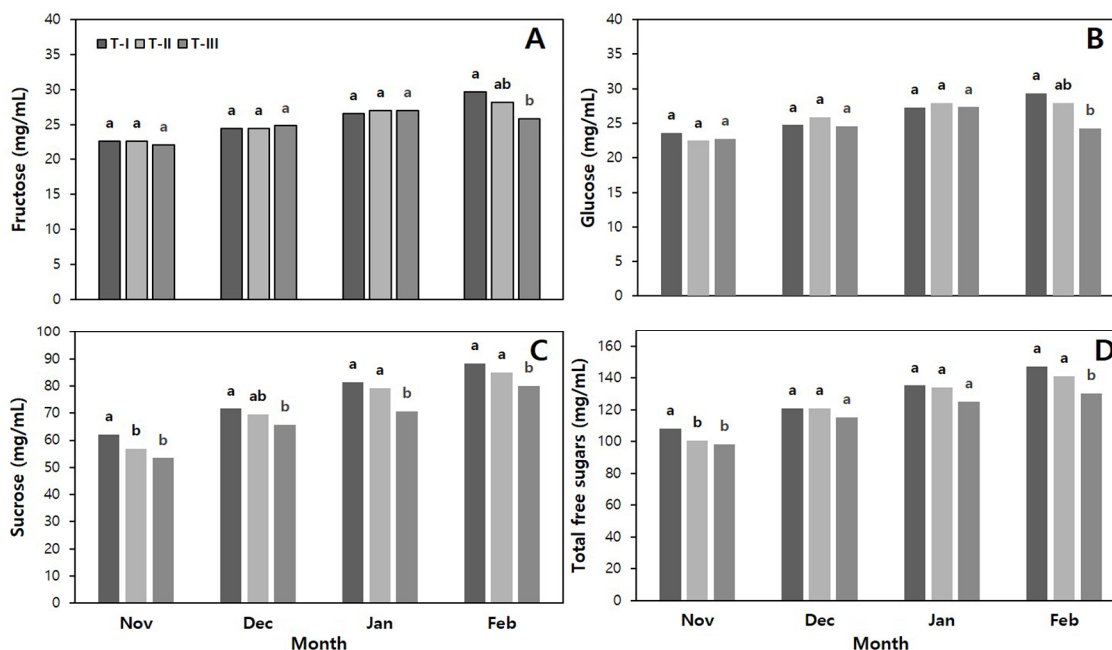


Fig. 5. Change in fructose (A), glucose (B), sucrose (C), and total free sugars (D) content of 'Shiranuhi' mandarin fruit grown under elevated temperatures for 2020.

Means followed by the same letter are not significantly different using Sheffe's multiple range test at 5% level

tose와 glucose는 11월~1월에는 온도 처리간 차이가 없었지만, 수확기인 2월에는 T-I처리구와 T-III처리구의 온도 처리간 유의차를 나타내었다(Fig. 5A and 5B). 감귤류에서 수확시기에 따라 품종별 유리당 함량은 증가하였으며, 품종에 따라 다르지만 전체 유리당 중 sucrose가 차지하는 비율이 44.9-66%이라고 하였다[21]. 본 연구에서도 '부지화'의 전체 유리당 함량중 약 54.4-61.5%를 차지한 sucrose는 11월부터 수확기인 2월까지 T-III처리구에서 T-I처리구 및 T-II처리구에 비해 유의하게 감소하는 경향을 나타내었다(Fig. 5C). 총 유리당 함량은 11월과 수확기인 2월에 T-I처리구가 T-III처리구에 비해 유의하게 높게 나타났다(Fig. 5D). 자당과 포도당은 세포 호흡을 위한 기질이나 세포 항상성을 유지하기 위한 삼투물질로 작용하는 반면에 과당은 삼투 보호와 무관하며 2차 대사 산물 합성과 관련이 있다고 하였다[22]. 따라서 대기온도보다 4.

6°C 이상 높은 T-III처리구에서는 한계온도를 벗어나는 고온 스트레스로 인하여 자당과 포도당이 호흡기질 또는 삼투물질로 소비되었을 가능성이 있을 것으로 판단된다.

'부지화'의 주요 유기산인 malic acid와 citric acid와 분석결과를 Fig. 6과 같다. 시기별 Malic acid는 2.8-8.2 mg/mL, Citric acid 함량은 9.7-28.4 mg/mL, 총 유기산 함량은 13.3-35.0 mg/mL이었다. Malic acid는 11월부터 1월까지 처리 간 차이가 없었으나, 수확기인 2월에는 T-I처리구는 T-II처리구 및 T-III처리구보다 약 1.3배 감소하였다. 감귤의 주요 유기산인 Citric acid는 11월부터 수확기인 2월까지 현저한 감소를 나타내었으나, 온도 처리간 유의차가 없었다. 총 유기산 함량도 마찬가지로 11월부터 2월까지 현저한 감소를 나타내었으나 처리 간에는 유의차가 없었다.

결론적으로, 미래 온도상승은 '부지화'의 생장과 과실 비대

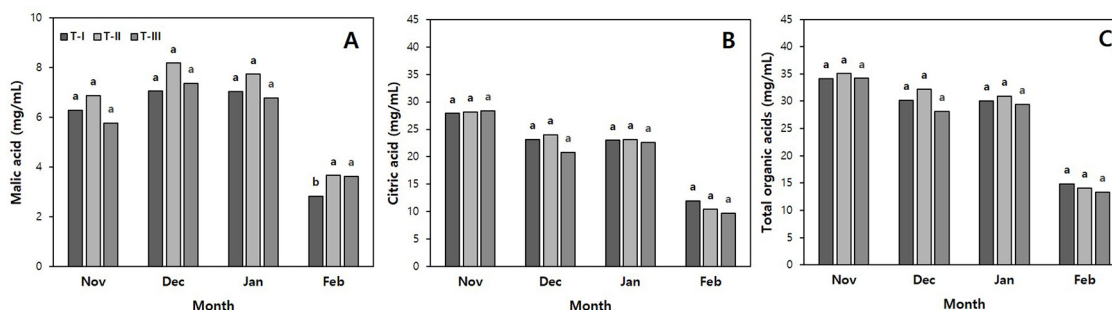


Fig. 6. Changes in malic acid (A), citric acid (B), and total organic acids (C) content of 'Shiranuhi' mandarin fruit grown under elevated temperature for 2020

Means followed by the same letter are not significantly different using Sheffe's multiple range test at 5% level

에 있어 우호적으로 작용할 것이나, 대기온도보다 4.6°C 높은 온도에서는 과실 품질은 감소될 것으로 예측된다.

최근 여름철 폭염 또한 자주 발생하고 있어 시설재배에서 과실비대기인 7-9월에는 내부 온도가 35-40°C 이상의 고온 환경이 되지 않도록 할 수 있는 온도저감 기술에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단되었다.

Note

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement

This study was supported by the Research Program for Horticultural Science and Technology Development, National Institute of Horticultural and Herbal Science, Rural Development Administration (RDA), Republic of Korea (PJ 01414603). In addition, this study was supported by the 2019-2020 RDA Fellowship Program of the National Institute of Horticultural and Herbal Science, Rural Development Administration (RDA), Republic of Korea.

References

1. Kwon SH, Yun SK, Kim SS, Park Y (2021) Phenological shifts of buds and flowers caused by early heat recognition in citrus in Jeju, Korea. *Scientia Horticulturae*, 283, 110092. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110092>.
2. Moon YE, Kang SB, Lee H, Choi YH, Son IC, Lee DH, Kim SK, An MI (2017) Projection of potential cultivation region of satsuma mandarin and 'Shiranuhi' mandarin hybrid based on RCP 8.5 emission scenario. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 19, 215-222. <https://doi.org/10.5532/KJAFM.2017.19.4.215>.
3. Khurshid T, Hutton RJ (2005) Heat unit mapping - A decision support system for selection and evaluation of citrus cultivars. *Acta Horticulturae*, 694, 265-269. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.694.43>.
4. Goldschmidt EE (1997) Effect of climate on fruit development and maturation, in: Futch SH, Kender WJ, Citrus Flowering and Fruiting Short Course. pp. 93-97, University of Florida, Lake Alfred, FL, USA.
5. Koshita Y (2014) Effect of temperature on fruit color development, in: Kanayama Y, Kochetov A, Abiotic Stress Biology in Horticultural Plants. pp. 47-58, Springer, Tokyo, Japan, https://doi.org/10.1007/978-4-431-55251-2_4.
6. Kim M, Kang SB, Yun SK, Kim SS, Joa J, Park Y (2021) Influence of excessively high temperatures on the fruit growth and physicochemical properties of Shiranuhi mandarin in plastic-film greenhouse cultivation. *Plants*, 10, 1525. <https://doi.org/10.3390/plants10081525>.
7. Vencent C, Morillon R, Arbona V, Gómez-Cadenas A (2020) Citrus in changing environments, in: Talon, M, Caruso M, Gmitter FG Jr, The Genus Citrus. pp. 271-289, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
8. Moon YE, Kang SB, Han SG, Kim YH, Choi YH, Koh SC, Oh S (2015) Effects of elevated spring temperatures on the growth and fruit quality of the mandarin hybrid 'Shiranuhi'. *Horticultural Science and Technology*, 33, 459-469. <https://doi.org/10.7235/hort.2015.14190>.
9. Jimenez-Cuesta M, Cuquerella J, Martínez-Jávega JM (1981) Determination of a color index for citrus fruit degreening. *Proceedings of the International Society of Citriculture*, 2, 750-753.
10. Sugiura T, Yokozawa M (2004) Impact of global warming on environments for apple and satsuma mandarin production estimated from changes of the annual mean temperature. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 73, 72-78. <https://doi.org/10.2503/jjshs.73.72>.
11. Ge ZM, Zhou X, Kellomäki S, Biasi C, Wang KY, Peltola H, Martikainen PJ (2011) Carbon assimilation and allocation (^{13}C labeling) in a boreal perennial grass (*Phalaris arundinacea*) subjected to elevated temperature and CO_2 through a growing season. *Environmental and Experimental Botany*, 75, 150-158. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2011.09.008>.
12. Tombesi S, Cincera I, Frioni T, Ughini V, Gatti M, Palliotti A, Poni S (2019) Relationship among night temperature, carbohydrate translocation and inhibition of grapevine leaf photosynthesis. *Environmental and Experimental Botany*, 157, 293-298. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.10.023>.
13. Bustan A, Goldschmidt EE (1998) Estimating the cost of flowering in a grapefruit tree. *Plant Cell and Environment*, 21, 217-224. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.1998.00267.x>.
14. Spiegel-Roy P, Goldschmidt EE (1996) *Biology of Citrus* Cambridge, pp. 101-104, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
15. Kim SW, Ko SB (2022) A study on the ordinance in connection with the production and distribution of citrus in Jeju Special Self-Governing Province. *Jour-*

- nal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 23, 351-359. <https://doi.org/10.5762/KAIS.23.6.351>.
16. Ko SB, Hyun CS (2011) Setting the Hallabong Tangor's quality standards based on consumer preference survey. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 12, 2996-3005. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.7.2996>.
 17. Ketsa S (1988) Effects of fruit size on juice content and chemical composition of tangerine. *Journal of Horticultural Science*, 63, 171-174. <https://doi.org/10.1080/14620316.1988.11515843>.
 18. Hiratsuka S, Yokoyama Y, Nishimura H, Miyazaki T, Nada K (2012) Fruit photosynthesis and phosphoenolpyruvate carboxylase activity as affected by light-proof fruit bagging in satsuma mandarin. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 137, 215-220. <https://doi.org/10.21273/JASHS.137.4.215>.
 19. Alquézar B, Rodrigo MJ, Zacarías L (2008) Carotenoid biosynthesis and their regulation in citrus fruits. *Tree and Forestry Science and Biotechnology*, 2, 23-37.
 20. Stearns CR, Young G (1942) The relation of climatic conditions to color development in citrus fruit. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*, 55, 59-61.
 21. Song EY, Choi YH, Kang KH, Koh JS (1998) Free sugar, organic acid, hesperidin, naringin and inorganic elements changes of Cheju citrus fruits according to harvest date. *Korean Journal of Food Science and Technology*, 30, 306-312.
 22. Rosa M, Prado C, Podazza G, Interdonato R, González JA, Hilal M, Prado FE (2009) Soluble sugars – Metabolism, sensing and abiotic stress: A complex network in the life of plants. *Plant Signaling and Behavior*, 4, 388-393. <https://doi.org/10.4161/psb.4.5.8294>.