

온도구배터널 내 상승온도에 의한 난지형 마늘(*Allium sativum* L.)의 광합성 및 생육 특성의 변화

오서영¹ · 문경환¹ · 송은영¹ · 신민지¹ · 고석찬^{2*}

¹농촌진흥청 국립원예특작과학원 온난화대응농업연구소, ²제주대학교 생물학과
(2019년 11월 11일 접수; 2019년 12월 17일 수정; 2019년 12월 18일 수락)

Photosynthesis and Growth of Southern-type Garlic (*Allium sativum* L.) in Response to Elevated Temperatures in a Temperature Gradient Tunnel

Seo-Young Oh¹, Kyung Hwan Moon¹, Eun Young Song¹, Minji Shin¹ and Seok Chan Koh^{2*}

¹Research Institute of Climate Change and Agriculture, National Institute of
Horticultural and Herbal Science, Jeju 63240, Korea

²Department of Biology, Jeju National University, Jeju 63241, Korea

(Received November 11, 2019; Revised December 17, 2019; Accepted December 18, 2019)

ABSTRACT

This study assessed clove germination, shoot growth, photosynthesis and bulb development of southern-type garlic (*Allium sativum* L.) in a temperature gradient tunnel (TGT), to examine the impacts of increases in temperature on the growth of garlic and find a way to minimize them. The temperatures in the middle and outlet of the TGT were 3.2°C and 5.8°C higher, respectively, than the ambient temperature at the tunnel inlet. The germination of garlic cloves was late at temperatures of ambient+3°C (in the middle of the TGT) and ambient+6°C (at the outlet) than at ambient temperature (at the inlet). However, bolting and the timing of maximum leaf number per plant were faster at ambient+3°C or +6°C than at ambient temperature. Shoot growth was generally greater at ambient temperature. Bulb growth did not significantly differ according to cultivation temperatures, but fresh and dry weights were slightly higher at ambient temperature and ambient+3°C in the late growth stage. The photosynthesis rate (A), stomatal conductance (g_s), and transpiration rate (E) were higher at ambient+3°C than at ambient temperature. Furthermore, at ambient+3°C, the net photosynthetic rate (A_{max}) was high, while the dark respiration rate (R_d) was low. At ambient temperature and ambient+3°C, bulb development was healthier, resulting in better productivity and more commercial bulbs, while at ambient+6°C, the bulbs were small and secondary cloves developed, resulting in low commercial value. Therefore, at elevated temperatures caused by global warming, it is necessary to meet the low-temperature requirements before clove sowing, or to delay the sowing time, to improve germination rate and increase yield. The harvest should also be advanced to escape high-temperature stress in the bulb development stage.

Key words: *Allium sativum* L., Bulb development, Emergence, Photosynthetic rate, Temperature gradient tunnel system, Vegetative growth



* Corresponding Author : Seok Chan Koh
(sckoh@jejunu.ac.kr)

I. 서 언

온도 상승에 따른 기후변화는 작물에 심각한 고온 스트레스를 야기하고, 세계 식량 안보에도 심각한 위협을 일으킨다(IPCC, 2012). 더욱이 대다수의 작물은 특정 기후나 환경에 적합하도록 품종이 개량되어 있어서 재배 기후조건이 변화할 경우 예상치 못한 피해를 초래할 수 있다. 예를 들어, 열대 및 온대지역에서는 고온과 같은 이상 기온으로 인해 밀(*Triticum aestivum* L.), 벼(*Oryza sativa* L.), 옥수수(*Zea mays* L.)의 수확량이 감소할 것으로 추정되며, 이는 식량 안보에 위협을 초래할 가능성이 있다(Field et al., 2014). 국내에서도 최근의 기온상승으로 고랭지 배추(*Brassica campestris* L.)의 안정적인 재배가 위협을 받고 있으며, 이상기상의 잦은 발생으로 생산량 변동 폭이 심하여 시장 공급의 불안정성이 심화되고 있다(Lee and Heo, 2018). 특히, 고랭지 기온이 현재보다 상승한다면 고온에 의한 배추의 생육 저하뿐만이 아니라, 무름병에 의해 생체중이 크게 감소할 것으로 예측되고 있다(Son et al., 2015). 이처럼, 다양한 기상환경 중 온도는 농작물의 생육에 가장 큰 영향을 주며, 작물들은 생육에 적합한 온도 범위를 벗어나면 고온에 의해 피해를 받는다(Sim et al., 2013).

따라서 기온상승에 따른 농작물에 대한 피해분석 및 영향평가가 필요하다. 지구온난화가 작물에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 재배포장과 유사한 환경(광량, 일주기, 대기 CO₂ 농도 등)에서 온도가 상승하였을 때 작물의 반응을 평가하기 위해 제작된 온도구배터널에서 생육 실험을 하는 것이 유용하다. Oh et al.(2014)와 Oh et al.(2017)는 배추(*B. campestris* L. ssp. *napus* var. *pekinensis* Makino)와 무(*Raphanus sativus* L. var. *hortensis* Backer)를 대상으로 온도구배터널(temperature gradient tunnel system)을 이용하여 기후변화 시나리오에 의해 예측되는 겨울철과 봄철 온도상승이 작물의 생장에 미치는 영향을 실험하여 정량적으로 분석한 바 있다. 호냉성 작물인 마늘(*Allium sativum* L.)에서도 겨울철과 봄철 동안의 온도상승이 발아와 생장, 그리고 생산성에 있어서 그 영향이 상당할 것으로 예상되어 기온상승의 영향을 파악하는 것이 중요하다.

마늘(*A. sativum* L.)은 백합과(Liliaceae) 파속(*Allium*)에 속하는 인경채소작물로 향신료 및 약용자원으로 가치가 높아 유럽, 아시아, 아메리카 대륙 등

세계 각지에서 재배되고 있으며, 우리나라에서는 중부와 남부지역을 중심으로 재배하고 있다(Hwang and Lee, 1990; Hwang et al., 2009). 마늘은 인편이나 주아 등 영양번식에 의해 주로 재배가 이루어지기 때문에 그 지역의 자연환경, 특히 기온 환경에 적응되어 왔으며, 비교적 겨울이 따뜻한 남부지역에서 재배하는 난지형 마늘과 상대적으로 추운 중부지역에서 재배하는 한지형 마늘로 구분된다. 마늘은 생육초기에 일정 기간 저온기를 거친 후 고온과 장일조건 하에서 인경이 비대하는 특성을 가지고 있어서(Bandara et al., 2000; Rahim and Fordham, 2001), 우리나라에서는 가을에 파종하여 겨울을 거친 후 이듬해 늦은 봄이나 초여름에 수확을 하고 있다(Song et al., 2001).

작물의 생산성은 잎의 광합성과 꽃, 열매, 인경 또는 잎과 같은 다른 기관으로 동화산물의 분배에 달려 있다. 특히, 잎의 광합성은 작물의 생장 및 발달, 물질 축적 및 최종 수확량에 중요한 영향을 미친다(Makino, 2011). 본 연구에서는 난지형 마늘에 대한 온난화 영향을 모의하기 위해 마늘을 생육기간 동안 온도구배터널에서 재배하면서 인편 발아, 지상부 생육과 광합성 특성, 인경 발달 등을 조사하여 마늘 생육 전반에 미치는 기온상승의 영향을 살펴보고 온도의 영향을 최소화할 수 있는 방안을 제시하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 식물재료 및 재배조건

본 실험에 사용한 마늘(*Allium sativum* L.)은 난지형인 “남도(Namdo)”이며, 2016년 8월 29일에 5~6g 정도 되는 중간 크기의 건전한 인편을 온도구배터널(25m×3m×3m) 내의 암갈색 비화산회토(동홍통, 미사질양토)에 20×10cm 간격으로 직파하였다. 온도구배터널 내 토양은 인편을 직파하기 15일 전에 둔분발효 퇴비(50kg·100m²)와 복합비료(NPK 21-17-17, 20kg·100m²)를 사용하고 토심 20cm 깊이로 경운하여 토양과 고르게 혼합한 후 평평하게 골랐다. 토양수분은 재배기간 동안 3-4일 간격으로 관수하여 포장 용수량 정도를 유지하였으며, 진딧물 등 병충해 방제를 위하여 재배기간 중에 저독성 약제인 이미다클로프리드 수화제(0.5g·L⁻¹, Farm Hannong Co., Seoul, Korea), 테부코나졸 유제(0.5g·L⁻¹, Farm Hannong Co., Seoul, Korea), 에마멕틴벤조에이트 유제(0.5g·L⁻¹, Syngenta Co., Seoul, Korea)와 이미녹타딘트리스-알

베실레이트 수화제($1.0\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, Kyung Nong Co., Seoul, Korea)를 각각 1회씩 살포하였다.

2.2. 온도구배터널 내 환경의 제어

온도구배터널은 농촌진흥청 온난화대응농업연구소(N33°28'E126°31', 200m, Jeju, Korea)에 위치한 시설을 이용하였으며, 이 시설은 불소 필름으로 피복되어 있어 온도를 제외한 다른 환경인자(광량, 일주기, 대기 CO_2 농도 등)는 자연 상태와 유사하게 유지된다. 시험 기간 동안 터널 입구의 온도에 비해 중앙부와 후미부의 온도는 각각 3°C 와 6°C 더 높게 유지되도록 복합환경제어시스템(TGC-Soldan, Soldan Crop., Korea)을 이용하여 제어하였으며, 온도는 터널의 입구, 중앙부, 후미부에 지상부로부터 2.5m 높이에 설치한 온도센서(1400-101, LI-COR Inc., USA)를 이용하여 측정하였다. 그리고 재배기간(2016년 8월 29일~2017년 5월 17일) 동안의 일평균 온도를 토대로 일 누적온도를 산출하여 나타내었다.

2.3. 광합성 특성의 분석

광합성 특성은 파종 후 180-190일째(2월 하순-3월 초순) 10시부터 13시 사이에 온도구배터널의 입구, 중앙부, 후미부에서 식물체 각각 8-9개체를 대상으로 조사하였다. 마늘 잎에 660nm의 LED 광원이 부착된 휴대용 광합성 측정기 LCpro⁺ Portable Photosynthesis System (ADC Bio Scientific Ltd., Hoddesdon, UK)을 사용하여 20°C 조건에서 $1,400\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 포화 광을 조사하여 광합성률(photosynthetic rate, A), 기공 전도도(stomatal conductance, g_s), 증산률(transpiration rate, E)을 측정하였다. 그리고 수분이용효율(water use efficiency, WUE)은 증산률에 대한 광합성률로 산출하였다.

광반응곡선(A-PPFD curves)은 파종 후 185-190일째(3월 초순)에 터널 입구, 중앙부, 후미부에서 식물체 각각 4-5개체를 대상으로 LED 광원이 부착된 LCpro⁺ Portable Photosynthesis System (ADC Bio Scientific Ltd., Hoddesdon, UK)을 이용하여 광량(0, 50, 100, 200, 400, 800, 1200, 1600, 1800 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)의 변화에 대한 광합성 반응을 측정하고, SigmaPlot 10.0 (Systat Software Inc., Erkrath, Germany)을 이용하여 광반응곡선을 작성하였다. 최대광합성률(maximum photosynthetic rate, A_{max})과 암호흡률(dark respiration

rate, R_d)은 광반응곡선으로부터 산출하였다(Marshall and Biscoe, 1980; Oh *et al.*, 2015).

2.4. 인편 발아 및 추대

인편의 발아는 인편 파종 후 지표면으로부터 1.0cm 이상 돌아나온 것을 조사하였으며, 파종한 인편수의 40%가 발아하는데 소요되는 기간을 발아기간으로 나타내었다. 그리고 지상부 상단에 화경의 형성유무를 확인하고 전체 생육주 중 40%가 추대하는데 소요되는 기간을 추대기간으로 나타내었다.

2.5. 지상부 생육 및 인경 발달

마늘 지상부의 외형적 특성은 파종 후 45일(10월 초순)부터 255일(5월 초순)까지 일정 간격으로 터널 입구, 중앙부, 후미부에서 각각 5개체를 무작위로 선발하여 지상부(엽수, 엽면적, 생체량과 견체량, 건물량)와 인경(생체량과 견체량, 건물량)의 특성을 조사하였다. 엽수는 맹아엽을 제외한 주당 녹색 엽수로 나타내었으며, 엽면적은 녹색 상태의 잎을 각각 분리하고 잘 펼쳐서 엽면적계(LI-3100, Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA)를 사용하여 측정하였다. 무게는 지상부와 인경으로 구분하여 각각의 생체량을 측정하였으며, 이후 70°C 항온건조기에서 5일간 건조하여 견체량을 측정하였다. 건물량은 (견체량/생체량) $\times 100$ 으로 하여 계산하였다.

그리고, 인경 무게, 인편의 수와 무게, 총포 무게 등은 수확기(265일, 5월 중순)에 재배온도별로 각각 10개체를 무작위로 선발하여 실온에서 10일간 건조시킨 후 조사하였다.

2.6. 통계분석

모든 통계분석은 SPSS 통계 패키지 18.0 (SPSS, Chicago, IL, USA)를 이용하여 수행하였으며, ANOVA에 이은 Duncan의 다중검정($p < 0.05$ 또는 $p < 0.01$)으로 평균치 간의 차이에 대한 유의성을 검정하였다.

III. 결 과

3.1. 생육기간 동안 온도의 변화

마늘의 생육기간 동안 터널 입구의 대기온도(T_{amb})는 일평균 11.8°C (일최저평균 -0.7°C , 일최고평균

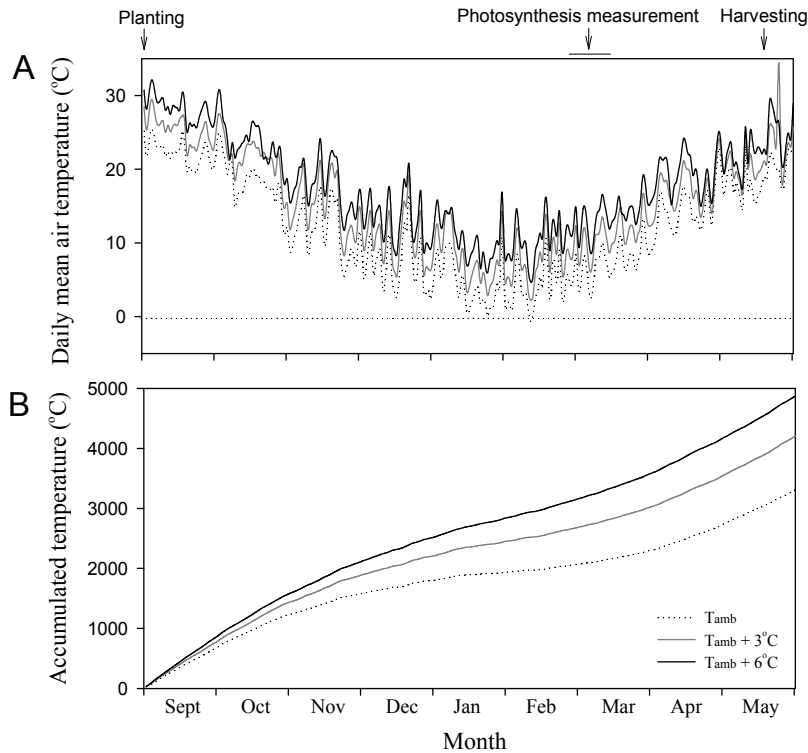


Fig. 1. Seasonal changes in daily mean air temperature (A), and accumulated temperature (B) in a temperature gradient tunnel (TGT) for cultivation of southern-type garlic (*Allium sativum* L.) during the experimental period (September 2016 - May 2017). The arrows in A indicate the days when garlic cloves were sown and photosynthesis measurement and bulb harvesting were carried out *in situ*. Dotted line represent daily mean ambient temperature in the inlet of the TGT; gray and black solid lines represent elevated ambient temperatures in the middle and outlet of the TGT, respectively.

25.3°C)를 나타내었으며, 터널 중앙부의 온도 (T_{amb}+3°C)는 일평균 15.0°C(일최저평균 0.5°C, 일최고평균 28.2°C), 후미부의 온도(T_{amb}+6°C)는 일평균 17.6°C(일최저평균 4.7°C, 일최고평균 31.5°C)로 측정되었으며, 터널 입구에 비해 중앙부와 후미부는 각각 3.2°C와 5.8°C가 높았다(Fig. 1A). 그리고 터널 입구에서는 11월 하순 이후로 이듬해 3월 하순까지 일평균 10°C 이하의 온도가 지속적으로 유지되는데 반해, 터널의 중앙부에서는 12월 상순부터 이듬해 3월 상순까지, 후미부에서는 1월 중순부터 2월 하순까지로 10°C 이하의 온도가 유지되는 기간이 짧아졌다. 그리고 생육 기간 동안 터널의 입구, 중앙부, 후미부에서의 일 누적온도는 각각 선형적으로 증가하였다(Fig. 1B).

3.2. 생육 온도별 인편 발아와 추대의 변화

인편의 발아기간과 추대기간, 그리고 발아와 추대

기간 동안의 평균온도와 누적온도의 변화를 살펴보았다(Table 1). 인편의 발아기간은 터널 입구(T_{amb})에서 19.2일이 소요되었는데 반해 중앙부(T_{amb}+3°C)와 후미부(T_{amb}+6°C)에서 재배하였을 때에는 각각 23.5일과 25.0일이 소요되어 재배온도가 높아짐에 따라 발아가 저조한 것으로 나타났다. 그리고 발아기간 동안의 터널 입구의 평균온도는 22.9°C(누적온도 437.1°C)이고, 중앙부와 후미부에서의 평균온도는 각각 25.7°C(누적온도 604.2°C)와 28.4°C(누적온도 711.8°C)이다. 반면에 추대기간은 터널 입구에서 209일이 소요되었고 중앙부와 후미부에서는 각각 199일과 195일이 소요되어 온도가 높아졌을 때 화경이 일찍 형성되었다. 추대기간 동안의 터널 입구의 평균온도는 11.4°C(누적온도 2058.4°C)이고, 중앙부와 후미부에서의 평균온도는 각각 15.1°C(누적온도 2580.1°C)와 17.8°C(누적온도 2969.0°C)이다. 그리고 재배온도별 개체당

Table 1. The clove germination, bolting and leaf number of southern-type garlic (*Allium sativum* L.) grown for 265 days under different culture temperatures in a temperature gradient tunnel

Temperature	Clove germination date ^z (Days after planting)	Temperature during germination period, °C		Bolting date ^y (Days after planting)	Temperature during bolting period, °C		Leaf number/plant (days after planting)	
		Mean	Accumulated		Mean	Accumulated	Max. leaf number	Max. green leaf number
T _{amb}	17-September (19.2)	22.9	437.1	27-March (209)	11.4	2058.4	16.6 (210.7)	10.9 (172.1)
T _{amb} + 3°C	21-September (23.5)	25.7	604.2	17-March (199)	15.1	2580.1	16.3 (210.7)	10.9 (174.6)
T _{amb} + 6°C	23-September (25.0)	28.4	711.8	13-March (195)	17.8	2969.0	16.0 (202.5)	10.7 (170.5)

^zClove germination represents the sprout emergence from 40% or more cloves through soil surface.

^yBolting represents the emergence of clearly visible inflorescences (>3cm) from shoot apices of 40% or more garlic plants.

최대 엽수에 도달하는 시기는 터널 후미부에서 빠르게 나타났다. 즉, 최대 엽수는 16.0-16.6개로 재배온도 간에 큰 차이를 보이지 않았으나 터널 후미부에서 202일에 최대 엽수가 관찰되어 터널 입구와 중앙부에서 보다 8일 일찍 나타났다. 녹색 상태의 엽수는 보통 11개 이내이며, 터널 후미부에서 170일에 최대 엽수에 도달하여 터널 입구와 중앙부에서 보다 2-4일 일찍 나타났다.

하였으나 후기에는 감소하였으며, 터널 중앙부(T_{amb}+3°C)나 후미부(T_{amb}+6°C)에서 재배하였을 때에 비해 터널 입구(T_{amb})에서 재배하였을 때 전반적으로 더 높았다(Fig. 2A). 전체량도 생체량과 유사한 변화양상을 보였으나 생육 후기에는 큰 변화가 없었으며, 생체량과 같이 터널 중앙부나 후미부에 비해 터널 입구에서 전반적으로 높았다(Fig. 2B). 그리고 건물물은 생육기간 동안 완만하게, 그리고 생육 후기에 급속하게 증가하였으며, 생육 초·중기에 터널 입구에서 다소 높고 이후에는 재배온도 간에 유의한 차이를 보이

3.3. 생육 온도별 지상부 성장 및 인경 발달

지상부의 생체량은 생육기간 동안 지속적으로 증가

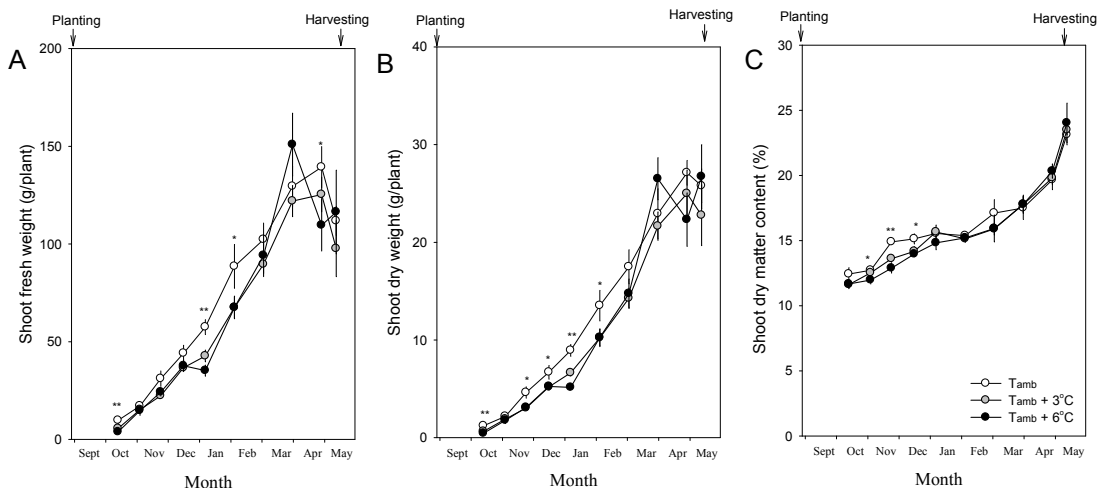


Fig. 2. Shoot growth of southern-type garlic (*Allium sativum* L.) grown under different culture temperatures in a temperature gradient tunnel during the experimental period. Data are the means ± SE of 5 replicates. * and ** show significance at $p < 0.05$ and $p < 0.01$ by using ANOVA, respectively.

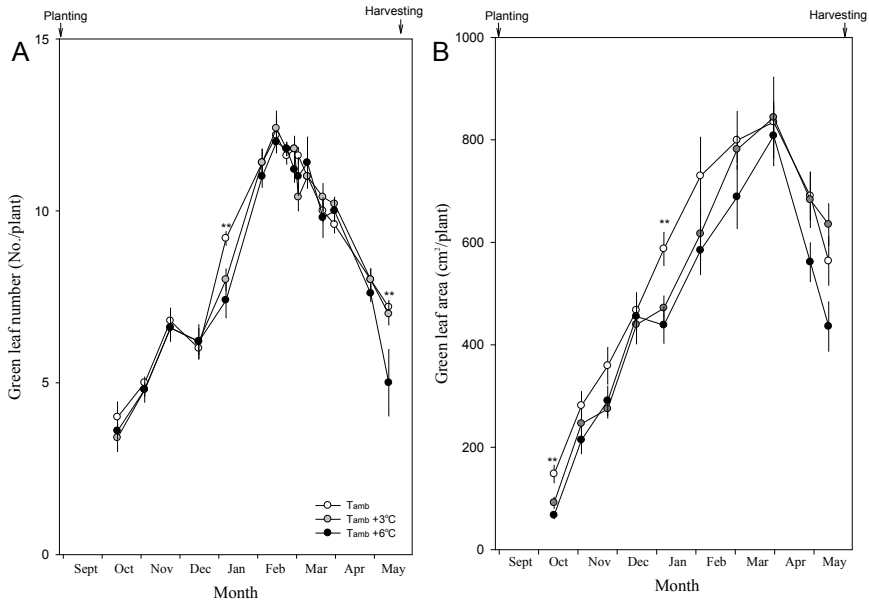


Fig. 3. Green leaf number (A) and leaf area (B) of southern-type garlic (*Allium sativum* L.) grown under different culture temperatures in a temperature gradient tunnel during the experimental period. Data are the means \pm SE of 5 replicates. * and ** show significance at $p < 0.05$ and $p < 0.01$ by using ANOVA, respectively.

지는 않았었다(Fig. 2C).

엽수는 재배온도 간에 큰 차이를 보이지는 않았으며 2월 중순까지 크게 증가하고 이후에 감소하였다(Fig. 3A). 엽면적은 생육 초기부터 중기에 이르기까지 큰 폭으로 증가하고 생육 후기에는 점차 감소하였으

며, 터널 입구에서 재배하였을 때 더 빠르게 증가하였으며 수확기에 이르러서는 터널 후미부에서 큰 폭으로 감소하였다(Fig. 3B).

인경 생체량과 건체량은 3월 초순부터 발달하기 시작하여 수확기에 이르러서는 크게 증가하였으며, 재배

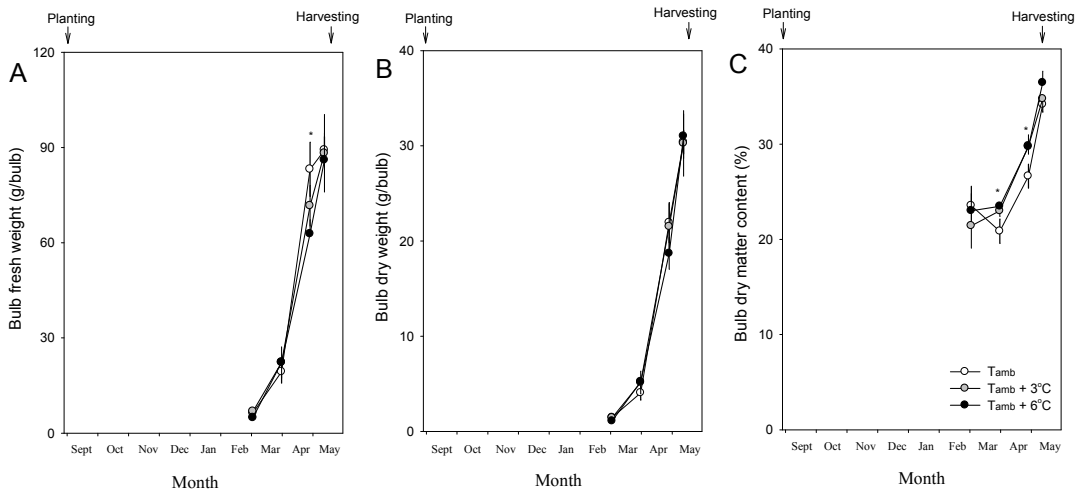


Fig. 4. Bulb growth of southern-type garlic (*Allium sativum* L.) grown under different culture temperatures in temperature gradient tunnel during the experimental period. Data are the means \pm SE of 5 replicates. * and ** show significance at $p < 0.05$ and $p < 0.01$ by using ANOVA, respectively.

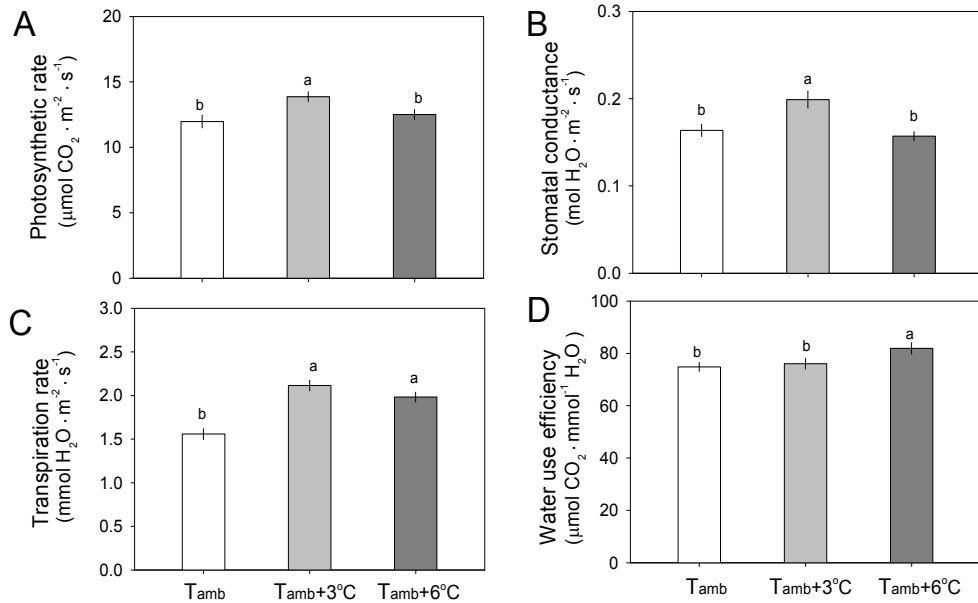


Fig. 5. Photosynthetic rate (A), stomatal conductance (B), transpiration rate (C), and water use efficiency (D) from leaves of southern-type garlic (*Allium sativum* L.) grown for 180-185 days under different culture temperatures in a temperature gradient tunnel. Each column and error bar represents the mean \pm SE of 8-9 replicates. The different letters above bars indicate significant differences among temperature treatments ($p < 0.05$) by Duncan's multiple range test.

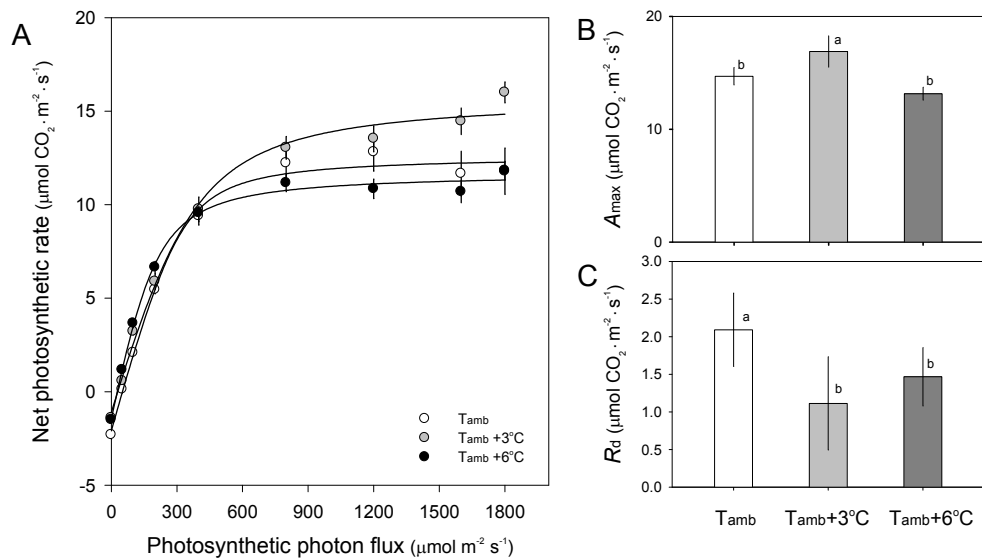


Fig. 6. Photosynthetic light-curves (A), maximum photosynthetic rate (B), and dark respiration rate (C) obtained from leaves of southern-type garlic (*Allium sativum* L.) grown under different culture temperatures in a temperature gradient tunnel. The curves in A were fitted with the non-rectangular hyperbola. Each value in B and C represents the mean \pm SE measured from leaves of 4-5 independent plants. The different letters above bars indicate significant differences among temperature treatments ($p < 0.05$) by Duncan's multiple range test.

온도 간에 큰 차이를 보이지는 않았으나 생육 후기에 터널 입구와 중앙부에서 재배하였을 때 다소 높았다 (Fig. 4A and 4B). 그리고 건물물은 터널 입구에서 보다 중앙부와 후미부에서 높았다(Fig. 4C).

3.4. 생육 온도별 마늘의 광합성 특성

광합성률(*A*)과 기공전도도(*g_s*)는 터널 입구(*T_{amb}*)나 후미부(*T_{amb}+6°C*) 보다 중앙부(*T_{amb}+3°C*)에서 재배하였을 때 더 높았으며, 증산률(*E*)은 중앙부나 후미부에서 재배하였을 때 더 높았고, 수분이용효율은 후미부에서 다소 높게 나타났다(Fig. 5).

터널 입구와 중앙부, 그리고 후미부에서 재배한 마늘 잎의 광반응 곡선(A-PPFD curve)을 얻고, 이로부터 최대광합성률(*A_{max}*)과 호흡률(*R_d*)을 산출하였다 (Fig. 6). 최대광합성률(*A_{max}*)은 터널 중앙부에서 재배하였을 때 16.9μmol CO₂ · m⁻² · s⁻¹로 더 높았으며, 터널 입구와 후미부에서는 각각 14.7μmol CO₂ · m⁻² · s⁻¹, 13.2μmol CO₂ · m⁻² · s⁻¹로 낮았다(Fig. 6B). 반면에 호흡률(*R_d*)은 터널 입구에서 재배하였을 때 2.09μmol CO₂ · m⁻² · s⁻¹로 중앙부(1.11μmol CO₂ · m⁻² · s⁻¹)와 후미부(1.46μmol CO₂ · m⁻² · s⁻¹)에서 보다 1.5-2.0배 더 높았다(Fig. 6C).

3.5. 마늘의 생산성

파종 후 265일째인 수확기에 생육 온도별로 수확한 마늘의 생산성을 살펴보면(Table 2), 인경무게는 터널 입구(*T_{amb}*)와 중앙부(*T_{amb}+3°C*)에서 재배하였을 때 각각 84.7g, 91.6g으로 무거웠으나 후미부(*T_{amb}+6°C*)에서는 51.3g으로 크게 감소하였다. 인경 당 인편 수는 모든 처리에서 7-8개로 나타났으나 통계적으로 터널 입구와 중앙부에서 재배하였을 때 다소 많은 것으로 나타났다. 그러나 내부를 절단하였을 때 터널의 중앙부와 후미부에서 재배한 마늘에서는 각각의 인편 내부

에서 이차생장에 의한 소인편의 분화가 이루어지고 있었다(데이터 미제시). 인편무게는 터널 입구와 중앙부에서 재배하였을 때 9.6-9.8g으로 무거웠으나 후미부에서는 7.7g으로 낮았다. 그리고 총포무게는 터널 중앙부에서 14.0g으로 가장 무거웠으며 터널 입구와 후미부에서는 각각 12.9g, 10.0g으로 다소 낮았다.

IV. 고 찰

마늘의 발달은 인편 발아, 초기 영양생장, 인경의 형성과 발달, 그리고 성숙 단계로 구분되며(del Pozo and González, 2005), 각 발달 단계에는 온도가 중요하게 작용한다. 인편 발아는 온도에 민감하여 최적온도인 12.7°C 보다 높아지면 발아율과 발아 속도가 감소하는 것으로 보고된 바 있다(Moon *et al.*, 2014). 본 연구에서도 Table 1에서 보는 바와 같이 터널 입구(*T_{amb}*)에서 보다 중앙부(*T_{amb}+3°C*)와 후미부(*T_{amb}+6°C*)에서 생육하였을 때 인편 발아가 지연되었는데, 이는 터널 중앙부와 후미부에서 생육온도 상승으로 인해 인편 발아에 필요한 저온 요구도를 충족시키지 못한 결과로 보인다. 따라서 인편 발아를 위해서는 파종 전에 미리 저온처리를 하여 재배하거나 또는 파종시기를 늦춰서 재배할 필요가 있다. 저온처리는 인편의 휴면을 타파하여 맹아의 출현을 유도할 수 있으며(de Resende *et al.*, 2011), 이렇게 함으로써 인편 파종 시 기온 상승에 의한 영향을 어느 정도 대체할 수 있을 뿐만 아니라 생육을 촉진시킬 수도 있다. 이러한 효과는 인편을 파종하고 10°C에서 10일간 저온처리한 후 재배온도를 달리하여 재배하였을 때 저온보다 고온이 지상부 생장과 엽수 발달, 광합성에 더 우호적으로 작용한 사실로도 유추해 볼 수 있다(Oh *et al.*, 2015).

반면, 마늘의 추대형성은 터널 입구에서 보다 중앙부와 후미부에서 더 일찍 앞당길 수 있음을 Table 1에

Table 2. The bulb and involucre growth of southern-type garlic (*Allium sativum* L.) grown for 265 days in different culture temperatures in a temperature gradient tunnel

Temperature	Bulb fresh weight (g)	Clove number (no./bulb)	Clove fresh weight (g)	Involucre fresh weight (g)
<i>T_{amb}</i>	84.7±4.32 ^a	7.9±0.38ab	9.6±0.36a	12.9±0.83ab
<i>T_{amb} + 3°C</i>	91.6±5.69a	8.4±0.34a	9.8±0.62a	14.0±1.29a
<i>T_{amb} + 6°C</i>	51.3±2.50b	7.1±0.28b	7.7±0.42b	10.0±1.00b

^aValues are expressed as means ± SE of 10 replicates.

^bDifferent letters within each column indicate significant differences among treatments (*p*<0.05) by Duncan's multiple range test.

서 확인할 수 있다. 그리고 개체당 최대 엽수에 도달하는 시기도 Table 1과 Fig. 2에서와 같이 터널 입구에서 보다 중앙부와 후미부에서 더 빠르게 나타나고 있다. 이러한 결과는 일정기간 저온을 거친 후 20°C의 높은 온도와 14시간의 장일 조건에서 마늘의 추대가 더 잘 이루어졌다는 보고와 유사하다(Wu *et al.*, 2016). 본 연구에서도 마늘이 광량과 일조시간이 동일한 환경조건에서 온도만 달리하여 재배되었음을 감안할 때 대기 온도에서 보다 높은 대기온도+3°C와 +6°C에서 추대가 일찍 형성되고 있음을 알 수 있다. 더군다나, 저온이 마늘의 꽃의 발달을 촉진하기도 하고, 긴 광주기가 화경 신장에 필수적이며(Takagi, 1990), 생육초기에 저온과 짧은 광주기가 있는 후 고온과 긴 광주기가 마늘의 화경 신장과 인경 형성에 중요하게 작용하는 것으로 알려졌다(Guevara-Figueroa *et al.*, 2015). 그리고 양파(*Allium cepa* L.)의 경우도 온도가 높아지고 광주기를 길게 함으로써 인경 발달이 선형적으로 증가하였으며, 인경 성숙기간은 짧아졌다고 한다(Khokhar, 2008). 따라서 양파와 같은 속 식물인 마늘에서도 온도와 일장에 의해 추대뿐만 아니라 인경 형성이나 발달에 있어서도 변화가 예상되며(Wu *et al.*, 2016), 이는 다른 *Allium*속에 속하는 식물에서 나타나는 것과 유사할 가능성이 높다.

지상부의 생장은 Fig. 2와 Fig. 3에서 살펴본 바와 같이 터널 입구에서 생육하였을 때 전반적으로 높고 중앙부와 후미부에서는 낮은 양상을 보였으며, 인경은 Fig. 4에서처럼 터널 내부의 재배온도에 따라 큰 차이를 보이지는 않았으나, 생육 후기에 인경 생체량과 견체량은 터널 입구와 중앙부에서 재배하였을 때 다소 높았다. 마늘과 같은 속 식물인 양파를 온도구배터널에서 재배하였을 때에도, 고온 지역에서 자란 식물체의 초장, 생체량과 견체량, 총 엽수, 인경 비대 및 인경 생체량과 견체량이 중온 및 저온 구역의 식물에 비해 현저하게 감소되었을 뿐만 아니라 도복도 일찍 나타나는 것으로 보고된 바 있다(Ikeda *et al.*, 2019).

한편 인경 크기는 마늘의 생산성을 결정하는 중요한 요소이며, 적당한 크기의 인경 생산은 재배농가의 최우선 목표라고 할 수 있다. 이전 연구에서 인경 발달이 온도에 의해 영향을 받으며(Wu *et al.*, 2016), 마늘의 재배기간 중 생육 초·중기에는 온도가 높아지면 지상부의 생장과 광합성에는 우호적으로 작용하였다(Oh *et al.*, 2017; 2019). 본 연구에서도 Table 2에서와 같이 터널 중앙부에서 인경의 크기가 상대적으로 크게

형성되었는데, 이는 Fig. 5와 Fig. 6에서 보는 바와 같이 광합성률(A)과 최대광합성률(A_{max})이 터널 중앙부에서 더 높고 호흡률(R_d)이 낮은 것과 관련이 있어 보인다. 이와 유사한 결과로 상승된 온도에 순화된 초본, 목초류, 상록성 교목이나 관목 등에서도 일정 온도 범위(14-28°C)까지는 CO₂ 고정률이 차이가 없거나 증가하는데 반해, 호흡률은 전반적으로 감소하는 것으로 보고된 바 있다(Campbell *et al.*, 2007). 그리고, 호냉성 채소작물인 배추(*Brassica campestris* L. ssp. *napus* var. *pekinensis* Makino)나 월동무(*Raphanus sativus* L. var. *hortensis* Backer)에서도 재배 온도가 높아졌을 때 호흡률이 감소하였다(Oh *et al.*, 2014; 2017). 많은 식물 종들에 있어서 호흡률은 온도에 의존적으로 증가하지만, 특정 온도 이상의 조건에서 자랐을 때에는 Q₁₀이 낮아지는 양상을 보인다(Atkin and Tjoelker, 2003). 본 연구의 터널 중앙부에서 고온에 순화된 마늘의 광합성 증가와 호흡률 감소는 생산성을 높이는 결과를 가져올 수 있음을 시사한다.

그리고 Fig. 3에서와 같이 터널 입구에서 보다 중앙부와 후미부에서 재배하였을 때 성장기에 지상부 생체량이 낮고 엽수 또한 적어 대기온도+3°C 또는 대기온도+6°C에서 재배하였을 때에는 좀 더 일찍 수확이 가능한 것으로 나타났다. 그러나 Fig. 4와 Table 2에서 보는 바와 같이 대기온도+6°C에서 인경 및 인편 무게가 감소하거나 인편 내부에서 이차생장에 의한 소인편의 분화가 이루어지는 등 상품성 하락 및 생산량 감소 등의 부정적인 영향이 나타났다. 더군다나 영양생장 단계에서 Fig. 3에서 보는 바와 같이 녹색 엽수와 엽면적이 감소할 뿐만 아니라 광합성 또한 제한되어 수확량 감소로 나타난 것으로 보인다. 이에 반해 터널 입구에서는 광합성이 다소 낮으나 성장기 동안 녹색 엽수와 엽면적이 상대적으로 증가에 의해, 그리고 중앙부에서는 녹색 엽수와 엽면적이 다소 감소하나 광합성이 활발하게 일어나 최종 수확량이 많아진 것으로 보인다.

최근 기후변화에 의한 이상 기상 현상이 빈번히 발생하고 있고, 미래에는 더욱 심해질 것으로 예측되는 바, 마늘의 생산성을 높이기 위해서는 생육단계별로 온도의 영향을 최소화할 수 있는 방안을 모색할 필요가 있을 것이다. 본 연구에서는 인편 발아와 인경 발달에 있어서 대기온도보다 다소 높은 대기온도+3°C에서는 발아율이 다소 저조하고 늦었으나 추대기와 개체당 최대 엽수에 도달하는 시기가 빨라졌으며 인경 발달도

더 왕성하여 크기가 크고 상품성이 높은 인경을 수확할 수 있었다. 그러나 대기온도+6°C인 고온에서는 발아율도 낮을 뿐만 아니라 수확 시 인경의 크기가 작아지고 소인편들이 생겨서 상품성이 낮은 것으로 판단되었다. 따라서 기온이 상승하였을 때에는 파종 전에 인편 발아에 필요한 저온 요구도를 미리 충족시키거나 파종시기를 늦춰서 파종한다면 인편 발아율을 높이면서 생산량도 증가시킬 수 있을 것으로 보인다. 그리고 인경 발달 단계에서 고온에 의한 상품성 하락을 최소화하기 위하여 수확시기를 앞당겨 이차생장으로 인한 소인편의 분화가 일어나기 전에 수확하는 것도 고려할 필요가 있다.

적 요

본 연구는 마늘을 온도구배터널에서 재배하면서 생육기간 동안 인편의 발아, 지상부 생육과 광합성 특성, 인경 발달 등을 조사함으로써 기후변화에 대응하여 마늘 생육 전반에 미치는 기온상승의 영향을 살펴보고 이를 최소화 할 수 있는 방안을 모색하고자 하였다. 터널 중앙부 온도($T_{amb}+3^{\circ}C$)와 후미부 온도($T_{amb}+6^{\circ}C$)는 입구의 대기온도(T_{amb})를 기준으로 각각 $3.2^{\circ}C$, $5.8^{\circ}C$ 가 높게 유지되었다. 인편의 발아는 터널 입구보다 중앙부와 후미부에서 더 늦었다. 그러나 추대기간과 개체당 최대 엽수에 도달하는 기간이 터널 입구에서 보다 중앙부와 후미부에서 짧게 나타났다. 지상부의 생장은 터널 입구에서 생육하였을 때 전반적으로 높고 중앙부와 후미부에서 감소하는 양상을 보였으며, 인경은 터널 내부의 온도 간에 큰 차이를 보이지는 않았으나 생육후기에 인경 생체량과 견체량은 터널 입구와 중앙부에서 생육하였을 때 다소 높았다. 광합성률(A), 기공전도도(g_s), 증산률(E)은 터널 입구에서 보다 중앙부에서 재배하였을 때 증가하였다. 또한 최대 광합성률(A_{max})은 중앙부에서 생육하였을 때 높았으며, 호흡률(R_d)은 낮았다. 터널 입구 및 중앙부에서 인경발달이 더 왕성하여 크기가 크고 상품성이 높은 인경을 수확할 수 있었으나 터널 후미부인 대기온도+6°C에서는 인경의 크기가 작아지고 소인편들이 생겨서 상품성이 낮았다. 따라서 대기온도보다 기온이 상승하였을 때에는 파종 전에 인편 발아에 필요한 저온 요구도를 미리 충족시키거나 파종시기를 늦춘다면 인편 발아율을 높이면서 생산량도 증가시킬 수 있을 것으로 보인다. 그리고 인경 발달 단계에서 고온에 의한

상품성 하락을 최소화하기 위하여 수확시기를 앞당겨 수확하는 것도 고려할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업 “노지 스마트팜 기술 개발을 위한 마늘 토양-작물 프로세스 모형 개발(과제번호: PJ012787012019)”의 지원에 의해 수행하였습니다.

REFERENCES

Atkin, O. K., and M. G. Tjoelker, 2003: Thermal acclimation and the dynamic response of plant respiration to temperature. *Trends in Plant Science* **8**(7), 343-351.

Benschop, M., R. Kamenetsky, M. Le Nard, H. Okubo, and A. De Hertogh, 2010: The global flower bulb industry: production, utilization, and research. *Horticultural Reviews* **36**, 1-115.

Brewster, J. L., 2008: *Onions and Other Vegetable Alliums*. Wallingford, CAB International.

Campbell, C., L. Atkinson, J. Zaragoza-Castells, M. Lundmark, O. Atkin, and V. Hurry, 2007: Acclimation of photosynthesis and respiration is asynchronous in response to change in temperature regardless of plant functional group. *New Phytologist* **176**(2), 375-389.

de Resende, J. T. V., R. G. F. Moraes, F. V. Resende, M. V. Faria, R. J. de Souza, and A. Marchese, 2011: Garlic vernalization and planting dates in Guarapuava. *Horticultura Brasileira* **29**(2), 193-198.

del Pozo, A. L., and M. I. A. González, 2005: Developmental responses of garlic to temperature and photoperiod. *Agriculture Technica* **65**(2), 119-126.

Dong, Y., Z. Cheng, H. Meng, H. Liu, C. Wu, and A. R. Khan, 2013: The effect of cultivar, sowing date and transplant location in field on bolting of welsh onion (*Allium fistulosum* L.). *BMC Plant Biology* **13**(1), 154pp.

Field, C. B., V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, and L. L. White, 2014: *Climate change. 2014: Impacts, adaptation*

- and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects, working group II contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate changes.* Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA
- Guevara-Figueroa, T., L. López-Hernández, M. G. Lopez, M. D. Hurtado, M. E. Vázquez-Barrios, L. Guevara-Olvera, R. G. González, D. M. Rivera-Pastrana, H. Torres-Robles, and E. M. Mercado-Silva, 2015: Conditioning garlic “seed” cloves at low temperature modifies plant growth, sugar, fructan content, and sucrose sucrose fructosyl transferase (1-SST) expression. *Scientia Horticulturae* **189**, 150-158.
- Ikeda, H., T. Kinoshita, T. Yamamoto, and A. Yamasaki, 2019: Sowing time and temperature influence bulb development in spring-sown onion (*Allium cepa* L.). *Scientia Horticulturae* **244**, 242-248.
- IPCC (Intergovernmental panel on climate change), 2012: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation.* Cambridge University Press, Cambridge, UK
- Kamenetsky, R., and H. D. Rabinowitch, 2002: Florogenesis. In *Allium Crop Science: Recent Advances* (ed. Rabinowitch HD, Currah L), pp. 31-57. Wallingford, CAB International.
- Khokhar, K. M., 2008: Effect of temperature and photoperiod on the incidence of bulbing and bolting in seedlings of onion cultivars of diverse origin. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology* **83**(4), 488-496.
- Khokhar, K. M., P. Hadley, and S. Pearson, 2007: Effect of photoperiod and temperature on inflorescence appearance and subsequent development towards flowering in onion raised from sets. *Scientia Horticulturae* **112**, 9-15.
- Lee, S. H., and I. Heo, 2018: Impact of climate on yield of highland Chinese Cabbage in Gangwon Province, South Korea *Journal of the Korean Geographical Society* **53**(3), 265-282.
- Makino, A., 2011: Photosynthesis, grain yield, and nitrogen utilization in rice and wheat. *Plant Physiology* **155**(1), 125-129.
- Marshall, B., and P. V. Biscoe 1980: A model for C₃ leaves describing the dependence of net photosynthesis on irradiance. *Journal of Experimental Botany* **31**(1), 29-39.
- Moon, K. H., K. S. Choi, I. C. Son, E. Y. Song, and S. Oh, 2014: A simple emergence model of southern type garlic based on temperature. *Korean Journal Agricultural and Forest Meteorology* **16**(4), 343-348.
- Oh, S., K. H. Moon, and S. C. Koh, 2015: Assessment of high temperature impacts on early growth of garlic plant (*Allium sativum* L.) through monitoring of photosystem II activities. *Korean Journal of Horticultural Science and Technology* **33**(6), 829-838.
- Oh, S., K. H. Moon, and S. C. Koh, 2017: Effects of Different Day/Night Temperature Regimes on Growth and Clove Formation of Cool-type Garlic (*Allium sativum* L.) Plant. *Horticultural Science and Technology* **35**(1), 1-10.
- Oh, S., K. H. Moon, I. C. Son, E. Y. Song, Y. E. Moon, and S. C. Koh, 2014: Growth, photosynthesis and chlorophyll fluorescence of Chinese cabbage in response to high temperature. *Korean Journal of Horticultural Science and Technology* **32**(3), 318-329.
- Oh, S., K. H. Moon, E. Y. Song, I. C. Son, and S. C. Koh, 2015: Photosynthesis of Chinese cabbage and radish in response to rising leaf temperature during spring. *Horticulture, Environment, and Biotechnology* **56**(2), 159-166.
- Oh, S., K. H. Moon, E. Y. Song, I. C. Son, S. H. Wi, and S. C. Koh, 2017: Impact of rising global temperatures on the growth, mineral composition, and photosynthesis of radish in a winter cropping system. *Horticultural Science and Technology* **35**(1), 38-45.
- Pooler, M. R., and P. W. Simon, 1993: Garlic flowering in response to clone, photoperiod, growth temperature, and cold storage. *HortScience* **28**(11), 1085-1086.
- Wu, C., M. Wang, Z. Cheng, and H. Meng, 2016: Response of garlic (*Allium sativum* L.) bolting and bulbing to temperature and photoperiod treatments. *Biology open* **5**(4), 507-518.