

한지형 마늘의 생육 및 인편 발달에 미치는 주야간 온도의 영향

오순자¹ · 문경환¹ · 고석찬^{2*}

¹농촌진흥청 국립원예특작과학원 온난화대응농업연구소, ²제주대학교 생물학과

Effects of Different Day / Night Temperature Regimes on Growth and Clove Development in Cool-type Garlic (*Allium sativum* L.)

Soonja Oh¹, Kyung Hwan Moon¹, and Seok Chan Koh^{2*}

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

²Department of Biology, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

*Corresponding author: skoh@jejunu.ac.kr

Abstract

We investigated growth, clove development, and photosystem II activity in garlic (*Allium sativum* L.) grown under different day/night temperature regimes using Soil-Plant-Atmosphere - Research (SPAR) chambers to determine the optimum cultivation temperature and to assess the impact of temperature stress on garlic. In the early stages of growth, plant growth increased markedly with temperature. At harvest time, however, the pseudostem diameter decreased significantly under a relatively low day/night temperature range (14/10 - 17/12°C), suggesting that these temperature conditions favor regular bulb growth. At harvest time, the bulb diameter and height were great at 14/10 - 23/18°C, whereas the bulb fresh weight and number of cloves per bulb were greatest at 17/12 - 20/15°C. However, the number of regularly developed cloves per bulb was highest at the relatively low temperature range of 14/10 - 17/12°C, as were the clove length and fresh weight. The photochemical efficiency (F_v/F_m) and potential photochemical efficiency (F_v/F_o) of photosystem II in the leaves of garlic plants were higher at 14/10 - 20/15°C and lower at temperatures below 14/10°C or above 20/15°C, implying that the 14/10 - 20/15°C temperature range is favorable, whereas temperatures outside this range are stressful for garlic growth. Furthermore, at temperatures above 20/15°C, secondary growth of garlic, defined as lateral bud differentiation into secondary plants, continuous growth of the cloves of the primary plants, or the growth of bulbil buds into secondary plants, was enhanced. Therefore, to achieve commercial production of fresh scapes and bulbs of garlic, it may be better to grow garlic at relatively low temperature ranges of 14/10 - 17/12°C.

Additional key words: bulb, photosystem II activity, secondary growth, SPAR chamber, temperature stress



Hortic. Sci. Technol. 35(1):1-10, 2017
<https://doi.org/10.12972/kjst.20170001>

pISSN : 1226-8763
 eISSN : 2465-8588

Received: March 11, 2016

Revised: August 27, 2016

Accepted: August 30, 2016

Copyright©2017 Korean Society for Horticultural Science.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution NonCommercial License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

본 연구는 농촌진흥청 연구사업 "기온변화에 따른 마늘의 생리·생육반응 연구 (과제번호: PJ0113832016)"의 지원에 의해 이루어진 것임.

서 언

마늘(*Allium sativum* L.)은 백합과(Liliaceae) 파속(*Allium*)에 속하는 초본성 작물로 주로 인경을 이용하며, 향신료자원으로 세계적으로 널리 재배되고 있다. 더군다나, 항암, 혈중 콜레스테롤 감소, 혈압 강하 등 다양한 기능이 밝혀지면서 약용자원으로도 활용되고 있을 뿐만 아니라 세계 10대 건강식품으로 선정되어 소비량이 꾸준히 증가하고 있다. 마늘은 생육초기에 일정 기간 저온기를 거쳐서 고온과 장일 조건 하에서 인경 비대가 진행되는 특성을 가지고 있어서(Bandara et al., 2000; Rahim and Fordham, 2001), 우리나라에서는 가을에 파종하여 겨울을 거친 후 이듬해 초여름에 수확을 하고 있다(Song et al., 2001).

인경 비대는 인편 분화에 관여하는 식물호르몬 등의 내적 요인이나 일장과 온도 등의 외적 요인에 의해서 영향을 받는 것으로 보고되고 있다(Sohn et al., 2010; Takagi, 1990). 인경 형성은 장일 하에서 촉진되며 12시간 이상의 일장 하에서는 완숙기가 단축되고 인경 수확량도 최고에 달하게 된다. 우리나라에서 재배되고 있는 한지형 마늘은 난지형 마늘에 비해 조직이 단단하고 휴면기간이 길어 저장성이 좋으나 인편 분화에 필요한 저온요구 기간이 길며, 인경 형성 및 비대가 이루어지기 위해서는 고온 장일의 조건이 필요하다. 마늘은 출하시기가 계절적으로 여름철에 집중되어 마늘을 수확하여 저장하는 동안 고온다습으로 중량 감소나 부패 등으로 인한 손실이 큰 것으로 알려져 있다(Cho and Lee, 2008). 따라서 마늘의 안정적인 생산과 품질관리를 위해 재배기술을 개발하거나 고온 적응성 품종을 육성하는 등의 다각적인 연구가 진행되고 있으며, 일부 지역에서는 비닐하우스 내에서 재배하거나 멀칭하여 재배함으로써 출하시기를 조절하기도 한다(Hwang and Tae, 2000). 그러나 멀칭하여 재배하였을 때 조기수확이 가능하고 수확량이 많아지는 잇점이 있지만, 지온 상승으로 인해 벌마늘이 발생하는 등 고온 장애가 문제된다(Choi et al., 2009). 따라서 재배관리 측면에서 고온장애가 일어나지 않으면서 조기수확이 가능한 적정 재배온도를 규명할 필요가 있다. 재배온도의 영향을 살펴보기 위해서는 온도조건을 정교하게 조절할 수 있는 설비가 필요하며, 작물재배를 위한 미기상의 연구를 수행하는 데에는 Soil-Plant-Atmosphere-Research (SPAR) 챔버가 유용하다(Reddy et al., 2001). 이 챔버는 온도, CO₂ 농도 등의 환경조건을 인위적으로 제어할 수 있는 반면에 태양광을 이용할 수 있도록 설계된 시스템으로 대상 작물의 재배되고 있는 주산지 환경과 기후변화에 의해 예측되는 미래의 환경을 계절이나 장소에 관계없이 구현할 수 있어서 작물의 수량이나 품질향상에 미치는 기후조건의 영향을 파악하는데 유용하다. 따라서 SPAR 챔버를 활용하여 연구를 수행하면 작물의 생장, 발달 등에 있어서 온도의 영향을 정밀하게 분석할 수 있으며(Fleisher et al., 2009; Reddy et al., 2001), 마늘의 생육 전 기간에 걸쳐 생장, 인경 형성 및 인편 발달 등에 미치는 온도의 영향을 파악하는데 유용하다.

따라서 본 연구에서는 기후변화에 대응하여 SPAR 챔버 내의 주야간 온도를 달리한 조건에서 마늘을 재배하면서 생육 특성과 광계Ⅱ 활성, 수확기 인경 및 인편의 특성 등을 조사함으로써 마늘 생육 전반에 미치는 온도 스트레스의 영향을 밝히고 적합한 재배온도 범위를 알아보고자 하였다.

재료 및 방법

식물재료 및 재배조건

본 연구에 사용한 마늘은 한지형인 단양(Danyang)이며, 3-4g 정도 중간 크기의 건전한 인편을 종구로 사용하였다. 12월 중순에 Soil-Plant-Atmosphere-Research (SPAR) 챔버 내부의 토양에 인편을 파종하고 충분히 관수한 후, 자연조건에서 1주간 유지하여 발아시켰다. 이후 주야간 재배온도를 11/07, 14/10, 17/12, 20/15, 23/18, 28/23°C로 일정하게 유지하여 2013년 12월 20일부터 이듬해 7월 23일까지 재배하였다. SPAR 챔버는 농촌진흥청 온난화대응농업연구소(N33°28' E126°31', 해발고도 200m, Jeju, Korea)의 시설을 이용하였다. 챔버 내부는 2.2m × 1.4m × 2.5m (length × width × height)이며, 1.27cm 두께의 플렉시유리(plexiglass)로 둘러싸여 있어 재배기간 동안 자연광을 이용할 수 있도록 제작되었다(Reddy et al., 2001). 챔버 내부의 주야간 온도는 설정온도 ± 0.5°C 범위가 되도록 유지하였으며, 일출시각부터 주간 온도로, 일몰시각부터 야간 온도로 전환되

록 설정하였다. 챔버 내 CO₂ 농도는 400 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 로 유지되도록 조절하였다. 토양수분은 재배기간 동안 2-3일 간격으로 충분히 관수하였으며, 기타 재배관리는 농촌진흥청 표준영농재배법에 준하여 관리하였다.

생육특성 조사

온도 처리 후 20일(겨울, 1월 초순)부터 210일(이른 여름, 7월 중순)까지 일정 간격으로 지상부 길이, 엽초경, 엽수 등 마늘의 생육특성을 조사하였다. 지상부의 길이는 잎을 길게 늘어뜨렸을 때 인경 바로 윗부분에서부터 잎의 끝부분까지의 길이를, 엽초경은 맹아엽 하단부의 직경을 측정하였다. 엽수는 맹아엽을 제외한 주당 모든 엽수로 나타내었다. 그리고, 수확기(210일, 7월 중순)에는 엽초경, 인경 특성(인경 두께, 인경 길이, 무게, 인편수), 인편 특성(인편의 길이, 너비, 두께, 무게) 등을 조사하였다. 그리고, 인경형성지수와 구형지수는 각각 엽초경에 대한 인경 두께와 인경 길이에 대한 인경 두께로 산출하였다.

광계Ⅲ 활성 분석

광계Ⅲ 활성은 엽록소형광분석기(Plant Efficiency Analyzer, Hansatech Instrument Ltd., King's Lynn, UK)를 이용하여 측정하였다(Strasser and Strasser, 1995). 즉, 온도 처리후 80일째(3월 중순)의 식물체를 대상으로 15분간 광을 차단하여 암적응 시킨 마늘의 잎에 1,500 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 광량을 5초간 조사하여 F_o, F_m, F_v/F_m, F_v/F_o 등의 형광변수를 측정하고 분석하였다.

통계분석

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

결과 및 고찰

환경요인의 변화

마늘의 인경 형성 및 생장은 생육초기 일정기간의 저온기를 거친 후 고온과 장일 조건에서 이루어지므로 온도와 일주기는 마늘의 생산에 있어서 중요한 환경요인이다(Sohn et al., 2010; Takagi, 1990). 잎의 신장과 인편의 형성, 휴면 유도 등에도 고온과 장일 조건이 중요하게 작용한다(Kamenetsky et al., 2004). 본 연구기간 동안 외부 기상 환경요인으로 일장과 일사량의 변화를 살펴보았다(Fig. 1). 일장은 3월 중순까지는 12시간 이내인데 반해, 그 이후에는 12시간 이상으로 길어졌다(Fig. 1A). 일사량은 기복이 심하였으나, 3월 중순 이전에는 낮았으며 그 이후에는 20MJ·m⁻²를 상회하였다(Fig. 1B). 일사량의 기복이 심하게 나타난 것은 연구기간 동안에 구름 낀 날이 많고 비가 내린 날이 많았기 때문이다(데이터 미제시, 기상청자료). 챔버 내부의 기온은 설정한 온도와 유사하게 유지되었으며 각 챔버의 평균온도는 8.6, 11.1, 14.9, 17.2, 21.2, 26.4°C로 나타났다(Table 1). 그리고, 챔버 내 토양의 평균온도는 각각 9.7, 10.9, 14.3, 16.2, 19.4, 22.8°C로 저온 처리구인 11/07°C에서 대기온도보다 다소 높았을 뿐, 다른 처리구에서는 대기 온도와 유사하거나 또는 다소 낮게 유지되었다.

마늘의 지상부 생육특성

지상부의 생장이 왕성하게 일어나는 온도 처리 후 50-100일에는 온도가 높을수록 엽수가 증가하고, 초장이 길어지고, 엽초경이 굵어지는 등 고온이 지상부 생육에 우호적으로 작용하였다. 그러나 온도 처리 후 100-175일에는 엽수는 처리 온도에 관계없이 전체적으로 변화가 거의 없었으나 28/23°C에서는 엽초경과 초장의 생장이 점차 둔화되었다. 수확기(210일)에는

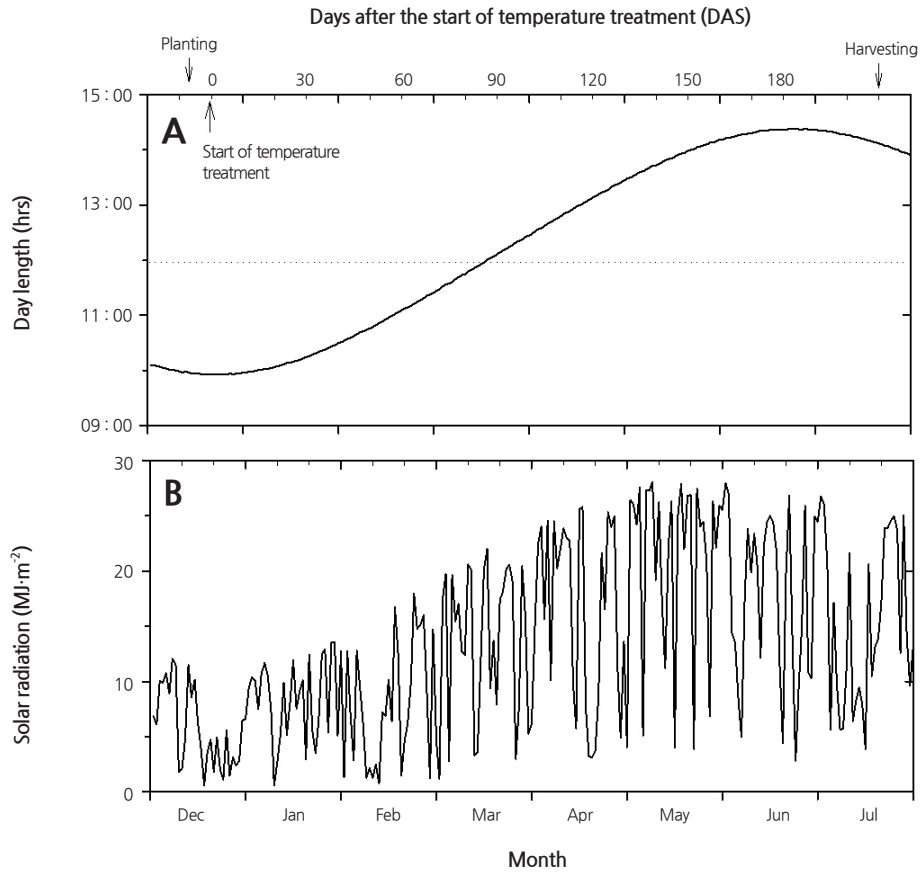


Fig. 1. Seasonal changes in day length (A) and solar radiation (B) measured in the SPAR chamber during the experimental period.

Table 1. Air and soil temperature measured in the SPAR chamber during temperature treatment.

Day / Night temperature (°C)	Air temperature (°C)			Soil temperature (°C)		
	Day	Night	Average	Day	Night	Average
11 / 07	10.5 f ^y	6.2 f	8.6 f	11.7 f	7.0 f	9.7 f
14 / 10	13.2 e	8.8 e	11.1 e	12.7 e	8.8 e	10.9 e
17 / 12	17.2 d	12.0 d	14.9 d	16.5 d	11.5 d	14.3 d
20 / 15	19.5 c	14.5 c	17.2 c	18.5 c	13.6 c	16.2 c
23 / 18	23.4 b	18.5 b	21.2 b	21.5 b	16.7 b	19.4 b
28 / 23	28.6 a	23.9 a	26.4 a	25.0 a	20.3 a	22.8 a

^xThe values are means of temperatures measured during a 210 - day temperature treatment period.

^yDifferent letters within each column indicate significant differences between treatments ($p < 0.05$).

28/23°C에서 재배하였을 때 초장이 점차 짧아졌고, 엽초경은 17/12°C와 14/10°C에서 크게 감소하였으며, 엽수는 대체로 감소하는 경향이었으나 예외적으로 20/15°C와 23/18°C에서는 크게 증가하였다(Fig. 2). 식물체당 엽수는 작물의 생산성을 예측하는 데 있어 중요한 요소이며, 특정 시점까지는 증가한 후 감소하는 양상을 보인다(Moravčević et al., 2011). 본 연구에서도 이러한 특성을 잘 보여주고 있으며, 재배 온도나 기간에 따라 식물체당 엽수도 차이를 보이고 있으며 엽수가 감소하는 시점도 서로 다르게 나타났다. 더군다나 수확기에는 20/15°C와 23/18°C의 온도에서 엽수가 다른 온도에서 보다 크게 증가하는데, 이

는 고온에서 장기간 재배하였을 때 땅속에 형성된 인경 내의 인편 일부가 발아하고 새로운 잎이 발생한 결과이며, 이로 인해 일부 식물체에서는 엽초경이 갈라지고 인편으로부터 발생한 어린 줄기가 옆으로 빠져나오는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 그보다 더 높은 온도인 28/23°C에서는 잎이 누렇게 변하고 점차 마르는 등 노화가 이루어져 Fig 2A에서 보는 바와 같이 수확기에 엽수가 적을 뿐만 아니라 잎이 밀생하여 통엽의 형태로 나타났으며, 재배기간 동안 인편 분화도 전혀 이루어지지 않아 통구를 형성하였다(Fig 3). 그리고 수확기에 28/23°C에서는 초장도 다른 처리구에서 보다 짧았으며, 이는 4월 이후부터 지상부의 생장이 뚜렷하게 둔화됨을 알 수 있다. 엽초경은 수확기에 이르러서 다른 온도에 비하여 17/12°C와 14/10°C에서 가늘어졌으며, 특히 17/12°C에서 6월 이후 엽초경이 뚜렷하게 가늘어졌다. 그러나 다른 온도 조건에서 마늘을 재배하였을 때에는 수확기에 엽초경이 증가하였는데, 저온과 고온에서 보이는 엽초경의 증가는 서로 다른 기작에 의해 나타났다. 즉, 저온 조건인 11/07°C에서 엽초경의 증가는 노화가 지연되어 수확 시까지 지속적으로 성장하기 때문이며, 고온 조건에서 엽초경의 증가는 인경 내의 인편 일부가 발아하고 새로운 잎이 발생하거나(20/15 - 23/18°C) 통엽의 형태로 발달하기 때문인 것으로 보인다(28/23°C). 이로부터 마늘의 지상부 생육은 14/10 - 17/12°C에서 가장 양호하다고 볼 수 있으며 20/15°C를 벗어나지 않는 범위에서 재배하는 것이 바람직할 것으로 보인다. 양파(*A. cepa* L.)에서도 지상부의 생육이 20°C와 25°C에서 재배하였을 때 좋았고, 엽수도 25°C 이내의 온도에서 온도가 낮을수록 많았지만, 30°C에서는 엽수의 감소와 더불어 인경 무게도 감소하여 고온이 스트레스로 작용하는 것으로 보고된 바 있다(Lee and Suh, 2009). 또한, 해발 1,000m 이상의 고산에 분포하는 산마늘(*A. microdictyon*)에서도 25°C 이상의 고온에서 재배하였을 때 생육이 저해되는 것으로 알려졌다(Lee et al., 2012). 이처럼 모든 작물은 성장과 발달에 있어서 최적의 온도 범위를 가지며, 이를 벗어났을 때 식물의 성장과 대사는 심하게 저해된다. 최근 기후 온난화로 인해 지구온도가 지속적으로 상승하고 있고, 이러한 변화는 작물에 스트레스로 작용할 가능성이 높다. 특히, 고온 스트레스는 광합성이 감소, 광계II의 불활성화, 조직의 노화, 백화현상 및 괴사, 생장지연, 수확량 감소 등 다양한 형태로 영향을 미친다.

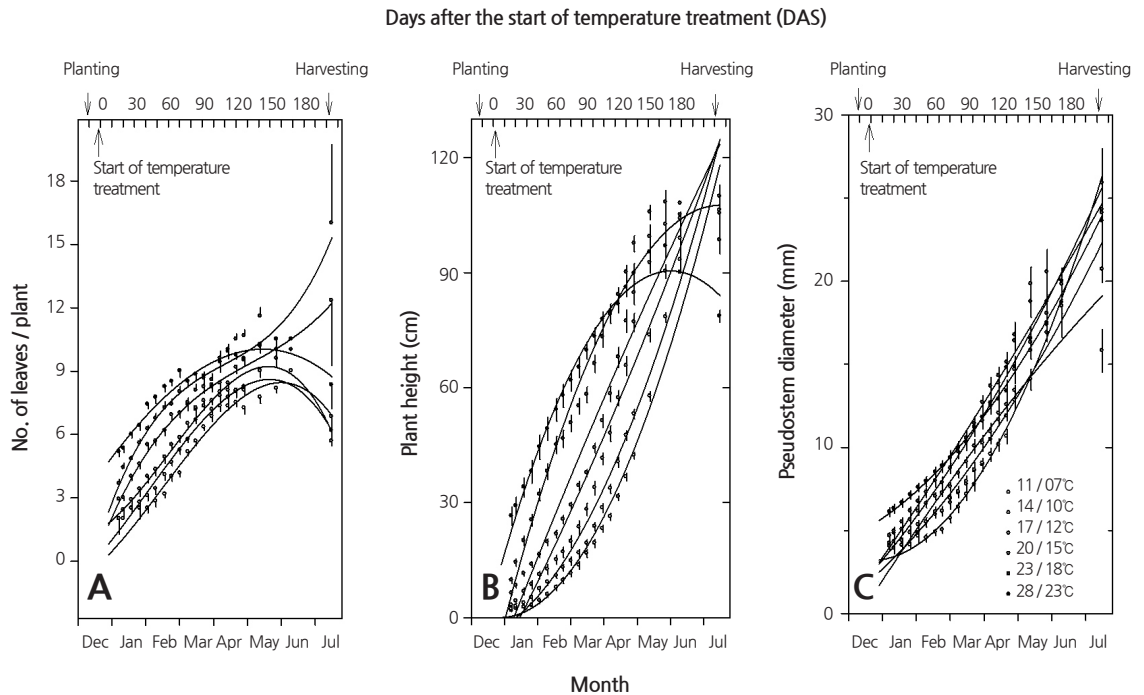


Fig. 2. Changes in the growth of garlic (*Allium sativum* L.) plants under different day / night temperature regimes.

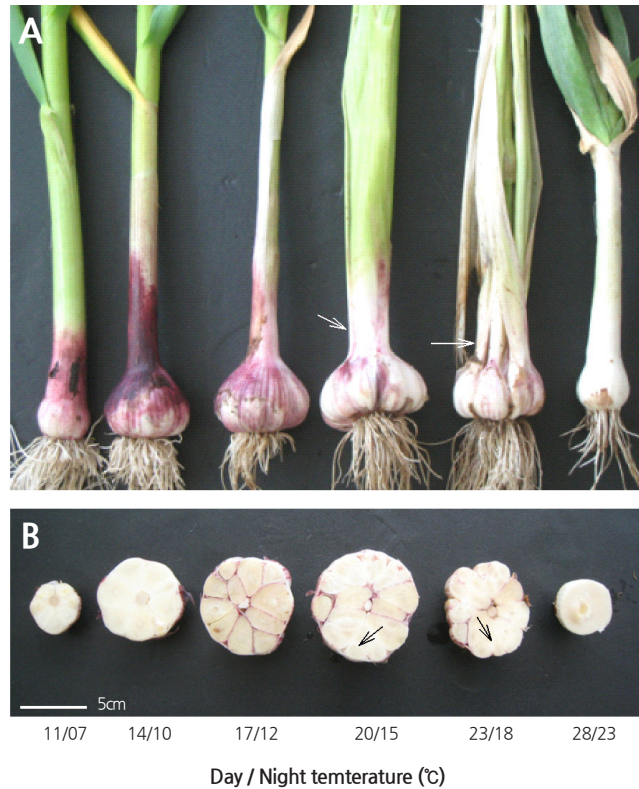


Fig. 3. Morphology (A) and cross sections of bulbs (B) of garlic (*Allium sativum* L.) plants grown for 210 days under different day/night temperature regimes. White arrows on leaf sheath indicate lateral buds that developed into slender leaves, and black arrows on cross sections of garlic bulbs indicate that some cloves divided into a cluster of secondary cloves.

앞의 광계Ⅲ 활성화

광계Ⅲ 활성화는 환경 스트레스에 민감하여 식물 스트레스 분석을 위한 지표로 사용되고 있다(Ball et al., 1995; Oh et al., 2014; Strasser and Strasser, 1995). 본 연구에서 광계Ⅲ의 최대 광화학적 효율(F_v/F_m)과 잠재적 광합성능(F_v/F_o)은 14/10 - 20/15°C 범위에서 가장 높았으며, 그 이상 또는 이하의 온도에서는 감소하였다(Fig. 4A, 4B). 이러한 결과는 11/07°C의 온도와 20/15°C 이상의 온도에서는 불활성상태의 반응중심이 증가하고 광계Ⅲ의 반응중심이 손상되고 있음을 나타낸다(Oh et al., 2014). 한지형 잔디인 켄터키 블루그래스(*Poa pratensis* L.)에서도 생육적온(20/15°C, 주간/야간)과는 달리 고온(35/30°C, 주간/야간)에 노출되었을 때 F_v/F_m 값이 감소하고 품질이 저하되었으며(Du et al., 2013), 마늘의 초기 생장에 있어서도 20°C 이상의 온도에서 이들 형광변수들이 크게 감소할 뿐만 아니라 고온 스트레스의 영향을 받는 것으로 보고된 바 있다(Oh et al., 2015). 그리고 초기형광수율(F_o)은 14/10°C에서 가장 낮고, 23/18°C 이상의 온도에서 크게 증가하였다(Fig. 4C). 최대형광수율(F_m)은 14/10°C에서 다소 높았지만 온도 처리구 간에 유의성을 나타내지는 않았다(Fig. 4D). 이러한 광계Ⅲ 활성화의 변화로부터 11/07°C의 저온과 23/18°C 이상의 고온은 마늘의 생육에 스트레스로 작용하고 있음을 알 수 있다. 그러나, 11/07°C에서의 F_v/F_m 값의 감소는 F_o 의 미약한 증가에 의해 기인하고 있는데 반해 23/18°C 이상의 고온에서는 F_o 의 뚜렷한 증가에 의해 나타나고 있어, 마늘의 생육에 미치는 저온과 고온의 영향은 서로 다른 기작을 통해 일어나는 것으로 보인다. 특히, 고온에 민감한 식물종은 내성을 가진 식물종보다 F_o 가 크게 증가하고 광역제에 의한 손상이 더 심각한 것으로 보고되고 있어(Guo et al., 2006), 본 연구에서 고온에 의한 F_v/F_m 의 감소, F_o 의 증가는 광계Ⅲ의 반응중심에 회복할 수 없는 손상이 일어나고 있음을 보여주고 있다.

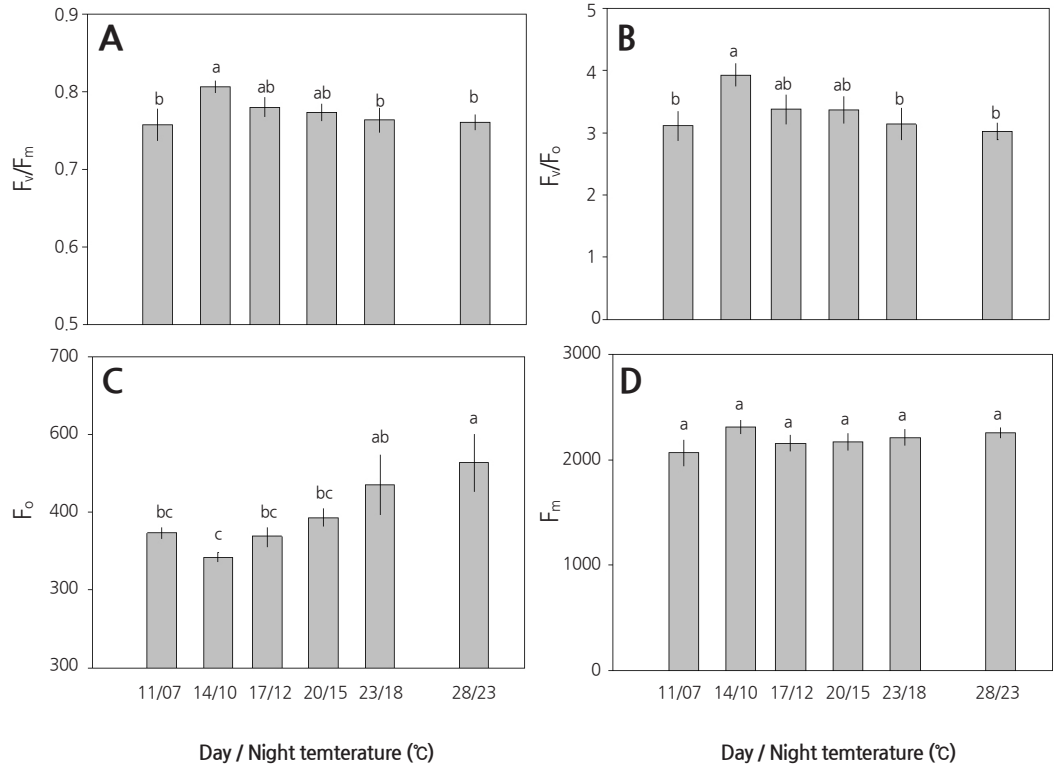


Fig. 4. Changes in photochemical efficiency of photosystem II (F_v/F_m , A), potential photochemical efficient (F_v/F_o , B), initial fluorescence (F_o , C), and maximal fluorescence (F_m , D) in leaves of garlic (*Allium sativum* L.) plant grown for 80 days under different day / night temperature regimes. Different letters above bars indicate significant differences among different day / night temperature regimes ($p < 0.05$). Data are means \pm SE of 9 - 10 independent measurements.

마늘의 생산성

마늘의 수확 대상 부위는 인경이므로 인경의 중량과 인편수, 인편 중량 등은 최종적인 수량과 상품성을 평가하는 중요한 요소이다. 본 연구에서 인경의 중량은 17/12°C와 20/15°C에서 85g 이상으로 많이 나왔으며, 28/23°C에서 가장 가벼웠다. 그리고 인경 당 인편수는 17/12°C와 20/15°C에서 각각 10개와 11개로 많았으며, 14/10°C 이하의 온도와 23/18°C에서는 8개로 나타났다. 수확기 인경 두께와 인경 길이가 14/10 - 23/18°C에서 각각 55mm 이상과 40mm 이상으로 발달하였으며, 28/23°C에서 인경 발달이 가장 저조하였다(Table 2). 이는 마늘이 고온에 매우 취약함을 나타내 주고 있다. 양파에서도 수확 시 구 특성을 살펴보았을 때 구경과 구중이 30°C에서 보다 상대적으로 낮은 25°C에서 재배하였을 때 더 나은 결과를 보여주는 것으로 보고된 바 있다(Lee and Suh, 2009).

한편, 인경형성지수(구비대지수)는 17/12°C에서 3.85로 가장 높았으며, 마늘의 재배에 있어서 17/12°C가 가장 적합한 온도임을 확인할 수 있다. 구형지수는 14/10 - 23/18°C 범위에서 1.3 이상으로 높아 인경이 전반적으로 넓고 편평한 모양을 하고 있었다. 인경형성지수와 구형지수는 14/10 - 23/18°C 범위에서 높았으나, 20/15°C 이상의 온도에서는 Fig. 3에서처럼 일부 인편이 다시 분화되어 새로운 잎이 자라나 잎줄기가 터지고 마늘통이 갈라져 인편이 겉으로 드러나거나(열구) 인편 속에 새로운 작은 인편들이 분화(벌마늘)되는 현상이 나타났다. 이러한 이차 생장, 열구현상과 벌마늘 발생은 생육 적온을 벗어난 고온에서 재배하였을 때 주로 발생하는데 Fig. 4에서 F_v/F_m 이나 F_v/F_o 의 감소, F_o 의 증가에서 보듯이 고온이나 저온 스트레스의 영향인 것으로 보인다(Choi et al., 2009). 특히, 이차생장의 발생은 인경(구)의 상품성을 떨어뜨리는 요인이며, 심할 때에는 인경 내에 소인편이 많이 발생하여 종구로 사용하기도 어렵게 된다. 그리고 23/18°C에서는 인경 크기와 중량이 감소하고, 열구와 더불어 인

편 분화가 많이 이루어져 생육 적은 범위를 벗어난 것으로 보이며, 20/15°C에서는 인경의 크기가 크고 중량이 많이 나가지만 인경 내 일부 인편들이 이차생장으로 인해 소인편들이 많아져서 상품성이 떨어질 수 있으므로 벌마늘이 형성되지 않도록 수확 시기를 앞당겨 수확할 필요가 있을 것으로 보인다. 한편 28/23°C에서는 인경은 형성되었으나 절단하여 내부를 살펴보았을 때 인편 분화가 이루어지지 않아 통구로 나타났으며(Fig. 3), 인경은 스폰지처럼 말랑말랑하여 상품가치가 전혀 없을 뿐만 아니라 다른 처리구와는 달리 화경도 형성되지 않았다. 양파와 다른 *Allium* 속 식물들에서도 생육 적은인 17 - 20°C보다 높은 25 - 30°C에서 재배하였을 때 화경이 형성되지 않는 것으로 보고되어(Krontal et al., 2000), 화경 형성에 온도가 중요하게 작용하고 있음을 알 수 있다. 더군다나, 화경 형성 후 생성되는 주아는 인경의 중량, 인경 두께, 화경 길이와 정의 상관을 나타내는 것으로 보고된 바 있다(Mathew et al., 2005).

마늘 인경은 Fig. 3B에서처럼 보통 10개 내외의 인편들이 화경을 중심으로 둥글게 배열된 형태이며, 각각의 인편들은 분화 및 비대가 진행된 후 성숙함에 따라 뚜렷하게 분리된다. 각각의 인편을 감싸고 있는 겉표면은 완숙단계에 접어들어 따라 점차 적자색으로 변하는데, 17/12 - 23/18°C 범위에서 인편색은 선명한 자색을 띠고 있으며, 11/07 - 14/10°C에서는 인편 상단부분은 약간 자색을 띠지만 전체적으로는 백색 상태로 덜 성숙되었음을 알 수 있다(Fig. 5A). 인편의 길이, 폭, 두께는 모두 14/10°C와 17/12°C에서 재배하였을 때 크게 자라고 균일한 상태의 인편들이 화경을 중심으로 고르게 분포하였으며, 무게도 무거울 뿐만 아니라 인경 당 정상적인 인편 발생률이 90% 이상으로 가장 양호하였다(Fig. 5B, 5C). 그러나 온도가 이보다 높아짐에 따라 인편의 크기가 점차 작아지고, 이차생장에 의한 소인편의 발생으로 상품성이 낮아졌다. 더군다나 28/23°C에서 재배하였을 때에는 인경 내에 인편 분화가 전혀 형성되지 않아 통구를 형성하였다. Table 2에서 보는 바와 같이 인경 당 인편수가 17/12°C와 20/15°C에서 가장 많았으나, 인경 당 정상적인 인편의 수는 14/10°C와 17/12°C에서 가장 많았으며, 인편의 무게는 14/10 - 20/15°C 범위에서 재배하였을 때 5g 이상으로 높았다(Fig. 5). 마늘을 파종하였을 때 인편에서 맹아의 출현, 잎의 발달과 같은 초기 영양생장, 인경의 형성과 발달, 성숙은 마늘의 주요 발달 단계이며(del Pozo and González, 2005), 각각의 단계에 온도가 중요하게 작용하게 된다. 따라서 이차생장 발생률을 낮추면서 상품성이 높은 마늘을 생산하기 위해서는 재배기간 동안 14/10°C와 17/12°C에서 재배하는 것이 바람직하다. 최근 기후변화에 의한 이상기상 현상이 발생하고 있고, 미래에는 더욱 심해질 것으로 예측되는 바 상품성의 좋은 마늘을 수확하기 위해서는 온도의 영향을 최소화 할 수 있는 방안을 모색할 필요가 있을 것이다.

Table 2. Characterization of bulb growth and clove development in garlic (*Allium sativum* L.) plants grown for 210 days under different day / night temperature regimes.

Day / Night temperature (°C)	Bulb fresh weight (g)	Clove number/ Bulb	Pseudo stem diameter (mm)	Bulb height (mm)	Bulb diameter (mm)	Bulbing index	Bulb shape index	Remark
11/07	52.8 cd ²	8.0 b	24.9 a	38.1 bc	47.4 bc	1.82 bc	1.25 bc	Some cloves form secondary cloves, which remain at the early stage.
14/10	75.3 bc	7.8 b	20.7 ab	42.0 ab	55.5 ab	2.69 ab	1.32 ab	Regular cloves form.
17/12	85.0 ab	10.0 ab	15.8 b	43.0 ab	59.6 a	3.85 a	1.39 ab	Regular cloves form.
20/15	110.1 a	11.0 a	24.1 a	46.9 a	65.4 a	2.82 ab	1.39 ab	Some cloves form secondary cloves, which remain at the middle stage.
23/18	79.3 bc	8.0 b	24.3 a	40.0 bc	58.1 a	2.81 ab	1.45 a	Some cloves form secondary cloves, which remain at the late-middle stage.
28/23	31.6 d	N.D.	23.6 a	33.9 c	38.0 c	1.61 c	1.13 c	Single cloves form without differentiation into regular cloves, and garlic scapes do not form.

²Different letters in each column indicate significant difference among different day/night temperature regimes ($p < 0.05$).

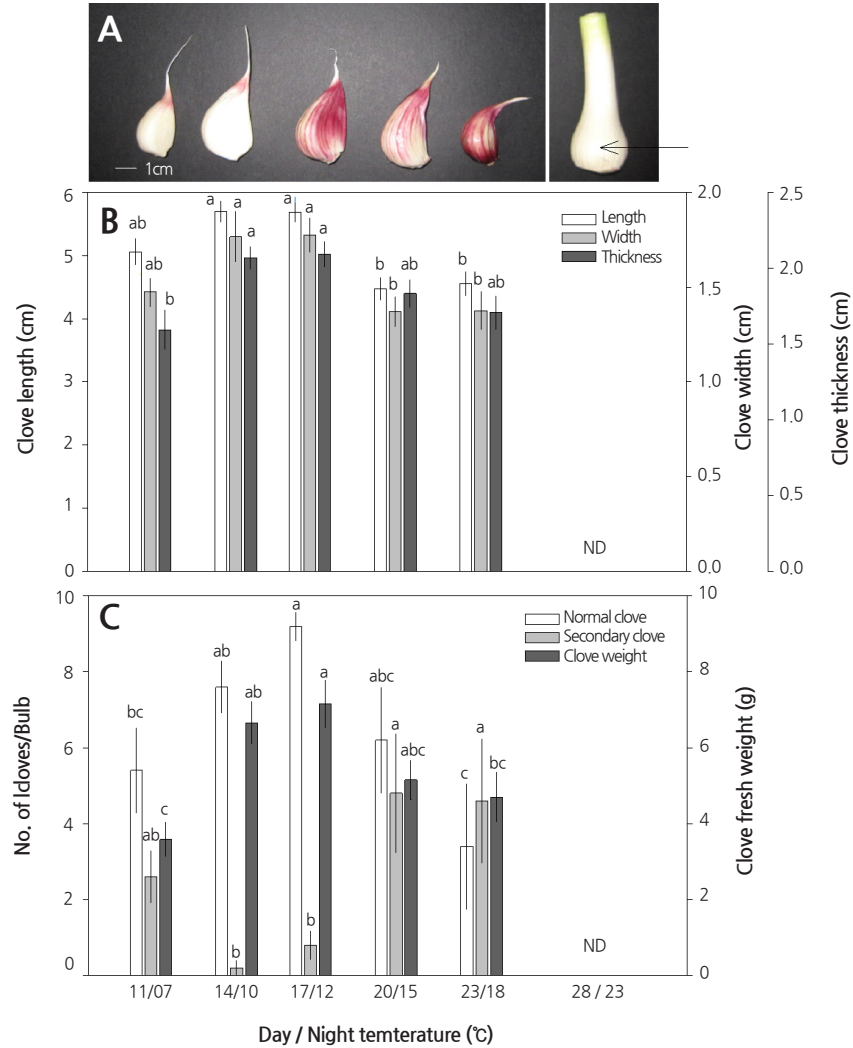


Fig. 5. Shape (A), clove length (B) and clove number (C) of harvested garlic (*Allium sativum* L.) plants grown under different day / night temperature regimes for 210 days. The arrow in A indicates that a single clove formed without differentiation into regular cloves. Different letters above bars indicate significant differences among different day/night temperature regimes ($p < 0.05$).

초 록

본 연구는 기후변화에 대응한 마늘(*Allium sativum* L.)의 생육 전반에 미치는 온도 스트레스의 영향을 밝히고 적합한 재배 온도를 알아보기 위하여 주야간 온도를 달리한 SPAR 챔버 내에서 마늘을 재배하고 그 생육 특성과 광계Ⅱ 활성, 수확기 인경 및 인편의 특성 등을 조사하였다. 온도처리 초기에는 온도가 높을수록 지상부 생육이 양호하였다. 그러나 수확기에는 14/10 - 17/12°C에서 엽초경이 크게 감소하여, 14/10 - 17/12°C가 인경의 정상적인 발육에 적합함을 알 수 있었다. 수확기 인경 두께와 인경 길이는 14/10 - 23/18°C에서 크게 발달하였으며, 인경의 중량은 17/12 - 20/15°C에서 가장 무거웠다. 인경 당 인편 발생률도 17/12 - 20/15°C에서 가장 높았으나, 인경 당 정상적인 인편 발생률은 그보다 낮은 14/10 - 17/12°C에서 가장 양호하였다. 인편의 크기와 무게도 14/10 - 17/12°C에서 재배하였을 때 가장 크고 무거웠다. 광계Ⅱ의 최대 광화학적 효율(F_v/F_m)과 잠재적 광합성능(F_v/F_o)은 14/10 - 20/15°C 범위에서 가장 높았고 그 이상 또는 이하의 온도에서는 감소하여, 14/10 - 20/15°C의 온도 범위가 마늘의 생육에 우호적임을 알 수 있다. 그러나, 20/15°C 이상의 온도에서는 잎줄기가 터지거나 마늘통이 갈

라지거나 별마늘을 형성하는 등의 이차생장 현상을 관찰할 수 있었다. 따라서, 이차생장 발생률을 낮추면서 상품성이 높은 마늘을 생산하기 위해서는 재배기간 동안 14/10 - 17/12°C에서 재배하는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

추가주요어: 인경, 광계Ⅲ 활성, 이차생장, SPAR 챔버, 온도 스트레스

Literature Cited

- Ball MC, Butterworth JA, Roden JS, Christian R, Egerton JIG, Wydrzynski TJ, Chow WS, Badger MR (1995) Applications of chlorophyll fluorescence to forest ecology. *Aust J Plant Physiol* 22:311-319. doi:10.1071/PP9950311
- Bandara MS, Krieger K, Slinkard AE, Tanino KK (2000) Pre-plant chilling requirements for cloving of spring-planted garlic. *Can J Plant Sci* 80:379-384. doi:10.4141/P99-074
- Cho J, Lee SK (2008) Current research status of postharvest technology of garlic (*Allium sativum* L.). *Korean J Hortic Sci Technol* 26:350-356
- Choi HS, Yang EY, Chae WB, Kwack YB, Kim HK (2009) Effect of soil temperature, seedtime, and fertilization rate on the secondary growth in the cultivation of the big bulbils of namdo garlic (*Allium sativum* L.). *J Bio-Environ Control* 18:454-459
- del Pozo AL, Gonz lez MIA (2005) Developmental responses of garlic to temperature and photoperiod. *Agric Tech* 65:119-126. doi:10.4067/S0365-28072005000200001
- Du H, Zhou P, Huang B (2013) Antioxidant enzymatic activities and gene expression associated with heat tolerance in a cool-season perennial grass species. *Environ Exp Bot* 87:159-166. doi:10.1016/j.envexpbot.2012.09.009
- Fleisher DH, Timlin DJ, Yang Y, Reddy VR, Reddy KR (2009) Uniformity of soil-plant-atmosphere-research chambers. *Trans ASAE* 52:1721-1731. doi:10.13031/2013.29134
- Guo YP, Zhou HF, Zhang LC (2006) Photosynthetic characteristics and protective mechanisms against photooxidation during high temperature stress in two citrus species. *Sci Hortic* 108:260-267. doi:10.1016/j.scienta.2006.01.029
- Hwang JM, Tae GS (2000) Changes of microclimates and garlic growth in outdoor by mulching and tunnel treatments. *J Kor Soc Hort Sci* 41:27-30
- Kamenetsky R, Shafir IL, Zemah H, Barzilay A, Rabinowitch HD (2004) Environmental control of garlic growth and florogenesis. *J Am Soc Hort Sci* 129:143-146
- Krontal Y, Kamenetsky R, Rabinowitch HD (2000) Flowering physiology and some vegetative traits of short-day shallot: A comparison with bulb onion. *J Hort Sci Biotechnol* 75:35-41. doi:10.1080/14620316.2000.11511197
- Lee EJ, Suh JK (2009) Effect of temperature on the growth, pyruvic acid and sugar contents in onion bulbs. *Korean J Hortic Sci Technol* 27:554-559
- Lee KC, Kim HS, Noh HS, Kim JW, Han SS (2012) Comparison of photosynthetic responses in *Allium microdictyon* Prokh and *Allium ochotense* Prokh from atmosphere-leaf vapor pressure deficit(VPD). *Korean J Medicinal Crop Sci* 20:171-176. doi:10.7783/KJMCS.2012.20.3.171
- Mathew D, Ahmed Z, Singh N (2005) Formulation of flowering index, morphological relationships, and yield prediction system in true garlic aerial seed bulbil production. *HortSci* 40:2036-2039
- Moravčević D, Bjelić V, Savić D, Varga JG, Beatović D, Jelačić S, Zarić V (2011) Effect of plant density on the characteristics of photosynthetic apparatus of garlic (*Allium sativum* var. *vulgare* L.). *Afr J Biotechnol* 10:15861-15868. doi:10.5897/AJB11.105
- Oh S, Moon KH, Son IC, Song EY, Moon YE, Koh SC (2014) Growth, photosynthesis and chlorophyll fluorescence of Chinese cabbage in response to high temperature. *Korean J Hortic Sci Technol* 32:318-329. doi:10.7235/hort.2014.13174
- Oh S, Moon KH, Koh SC (2015) Assessment of high temperature impacts on early growth of garlic plant (*Allium sativum* L.) through monitoring of photosystem II activities. *Korean J Hortic Sci Technol* 33:829-838. doi:10.7235/hort.2015.15078
- Rahim MA, Fordham R (2001) Environmental manipulation for controlling bulbing in garlic. *Acta Horticult* 555:181-188. doi:10.17660/Acta Horticult 2001.555.27
- Reddy KR, Hodges HF, Read JJ, McKinion JM, Baker JT, Tarpley L, Reddy VR (2001) Soil-plant-atmosphere-research (SPAR) facility: A tool for plant research and modelling. *Biotronics* 30:27-50
- Sohn EY, Kim YH, Kim BS, Seo DH, Lee HS, Lee IJ (2010) Changes in endogenous gibberellin contents during bulb development period in the cold-type cultivar of garlic (*Allium sativum* L.) of Korea. *Korean J Hortic Sci Technol* 28:750-756
- Song IG, Hwang SG, Lee JK (2001) Garlic cultivation. Rural Development Administration, Sammi Publishing Company, Suwon, Korea
- Strasser BJ, Strasser RJ (1995) Measuring fast fluorescence transients to address environmental questions: The JIP test. p.977-980. In: Mathis P (ed.), *Photosynthesis: From Light to Biosphere*. Kluwer Academic, Dordrecht, Netherlands
- Takagi H (1990) Garlic *Allium sativum* L. P.109-146. In: Brewster JL, Rabinowitch HD (eds.). *Onions and Allied Crops III: Biochemistry, Food Science, and Minor Crops*. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA