

지속적인 야간 저온에 의한 수박 품종별 식물체 생장 및 과실 비대 양상

이옥진^{1,2}, 이희주¹, 위승환¹, 김태복¹, 김상규¹, 채원병^{2,*}

¹국립원예특작과학원 채소과, ²단국대학교 환경원예조경학부

Plant growth and fruit enlargement among different watermelon (*Citrullus lanatus*) cultivars in continuous chilling night temperature conditions

Oak Jin Lee^{1,2}, Hee Ju Lee¹, Seung Hwan Wi¹, Tae Bok Kim¹, Sang Gyu Kim¹ and Won Byoung Chae^{2,*}

¹Vegetable Research Division, National Institute of Horticultural and Herbal Science, Rural Development Administration, Wanju 55365, Republic of Korea

²Department of Environmental Horticulture, Dankook University, Cheonan 31116, Republic of Korea

*Corresponding author

Won Byoung Chae
Tel. 041-550-3642
E-mail. wbchae75@dankook.ac.kr

Received: 1 November 2021

First Revised: 18 November 2021

Second Revised: 26 November 2021

Revision accepted: 29 November 2021

Abstract: Watermelon (*Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum. & Nakai) is sensitive to low temperature and shows retarded growth under 10°C. Although early transplanting guarantees higher returns, it requires cost and labor to maintain the appropriate temperature for plant growth. Therefore, cultivars tolerant to chilling stress is necessary to reduce the cost and labor requirements. The purpose of this study is to analyze data on plant growth and fruit enlargement under continuous chilling night temperature to develop new cultivars tolerant to chilling temperature. Two cultivars expected to have chilling tolerance and another cultivar sensitive to chilling temperature were grown in greenhouses with chilling and optimal night temperature conditions. In the early growth stage after transplanting, the cultivars expected to have chilling tolerance showed better vine length, fresh weight and dry weight. However, one of the tolerant cultivars showed significantly lower vine length, leaf length and width, and petiole length than the sensitive cultivar during pollination period and later growth stage, showing genotype specific responses. The fruit length, width, and weight were also significantly lower in the tolerant cultivar. The fruit set ratio was significantly higher in the chilling sensitive cultivar than the two tolerant cultivars. These results suggest that the present chilling tolerant cultivars in watermelon were selected based on their performance in the early growth stage, and further studies on chilling tolerance in different growth and development stages are required to develop cultivars adapted to various forcing cultivation systems.

Keywords: watermelon, chilling stress, plant growth, fruit enlargement, continuous night chilling temperature

서 론

대표적인 여름 과일인 수박(*Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum. & Nakai)은 2019년 기준 국내 재배면적 11,814 ha, 생산량 476,634톤, 생산액 5천 6백억원으로 과채류 중 재배면적이 가장 넓으며 전체 과채류 생산액 약 5조 2천 억원 중 10.9%를 차지하고 있어 딸기, 토마토, 풋고추, 오이, 호박, 참외와 함께 주요 7대 과채에 속하는 작물이다 (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs 2020; Korea Rural Economic Institute 2021). 수박은 주로 시설 내에서 반축성재배 작형으로 재배되어 전체 반입량의 73.3%가 5~7월에 분포하고 있으며 농가에서는 소득 향상과 2~3기작 재배를 위해 정식 시기를 1~2월에서 11~12월로 앞당기고 있다 (Kwon *et al.* 2005; Seoul Agro-Fisheries and Food Corporation 2020).

수박은 남아프리카 원산의 저온에 민감한 작물로 생육 적온은 18~32°C이고 10°C 이하에서는 생육이 지연되거나 억제된다 (Korkmaz and Dufault 2001; Bidabadi and Mehralian 2020; Rural Development Administration 2020). 수박 묘의 95.4%는 접목묘이며 농가는 주로 육묘장에 위탁 육묘하므로 육묘 시 저온에 의한 피해는 드문 편이지만 (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs 2018), 반축성재배 작형보다 이른 축성재배 작형에서 정식 후 생육 초기 이른 봄한파에 의해 냉해(chilling stress)를 입을 수 있다. 수박의 냉해는 기온이 생육 적온에 비하여 10°C 이상 급격히 떨어질 때 발생하며, 야간 최저 온도가 6°C 이하로 1~2일간 지속될 때 앞에서 냉해 증상이 관찰될 수 있다 (Kwon *et al.* 2001). 따라서 수박의 축성재배 시 가온 및 보온이 필수적이고 (Kwon *et al.* 2006; Noh *et al.* 2013) 농가에서는 전열선을 설치하거나 보온 덮개를 이용하여 온도를 조절하고 있다. 그러나 전열선을 설치하여 야간 최저 온도를 18°C로 설정하였을 경우 하루 평균 2,185원의 비용이 발생하고 (Noh *et al.* 2013) 다중보온덮개를 이용하는 경우 자동 개폐 시스템을 갖춘 농가라도 완전한 자동화가 어려워 노동력의 투입이 불가피하다 (Korea Rural Economic Institute 2021). 따라서 저온 피해를 경감시킬 수 있는 재배기술과 저온에서도 생육과 과실 발달이 원활한 축성재배용 수박 품종 개발이 요구되고 있다.

식물은 저온 환경에 놓이게 되면 저온에 대한 저항성을 증진시키기 위해 세포 내 삼투조절물질을 축적하는데 이는 세포 간극의 수분 가용성을 감소시켜 병해의 생성을 억

제하며, 세포의 삼투압을 유지하여 세포 막의 안정성을 증진시키는 역할을 한다 (Theocharis *et al.* 2012; Lu *et al.* 2020). 수박 또한 저온에 노출되었을 때 삼투조절물질인 가용성 당(soluble sugar), 환원당, 자당, 프롤린(proline)의 함량이 증가하는 등 유사한 반응을 보인다 (Lu *et al.* 2020). 냉해에 대한 수박 식물체의 반응은 수침상, 갈변 등 눈에 나타나는 가시적인 피해의 정도를 수치화하여 평가하거나 (Kozik and Wehner 2014; Sheikh *et al.* 2015), 전해질 누출량(electrolyte leakage), 말론디알데히드(malondialdehyde) 함량, H₂O₂ 함량 등을 통해 식물체 조직 내 피해를 측정할 수 있다 (Kwon *et al.* 2003; Rivero *et al.* 2003; Guo *et al.* 2007; Bidabadi and Mehralian 2020; Lu *et al.* 2020). 또한 엽록소 형광반응과 광합성 능력(photosynthetic capacity) 측정을 통해 냉해에 의한 광합성 기구의 피해를 평가하거나 (Korkmaz and Dufalut 2001; Ko *et al.* 2012; Sheikh *et al.* 2015; Cheng *et al.* 2016; Bidabadi and Mehralian 2020; Lu *et al.* 2020) 프롤린 함량, 가용성 당 함량, 항산화 효소 활성 등을 측정하여 저온 대응 기작의 활성을 통해 내냉성을 평가할 수 있다 (Rivero *et al.* 2001; Kwon *et al.* 2003; Rivero *et al.* 2003; Wei *et al.* 2015).

정식 이후의 수박을 27/12°C의 저온에 장기간 노출시켰을 때 32/17°C에서의 생육에 비해 덩굴과 마디의 길이가 짧아지고 마디의 수가 줄어든다고 보고된 바 있으나 (Rudich and Peles 1976), 대부분의 연구는 본엽 4매 이하의 어린 묘를 -2~15°C의 저온에 7일 이하의 짧은 기간 동안 노출시킨 후 식물체 반응을 관찰하므로 (Korkmaz and Dufalut 2001; Ko *et al.* 2012; Sheikh *et al.* 2015; Bidabadi and Mehralian 2020) 이를 통해 실제 재배 중에 나타나는 수박 식물체와 과실의 냉해 반응을 추정하는 데 한계가 있다. 특히 유묘기가 아닌 수박의 재배기간 중 야간 저온이 지속적으로 유지될 때 나타나는 식물체와 과실의 냉해 피해에 관련된 연구는 크게 부족한 실정이다.

따라서 본 연구는 재배기간 중 지속적인 야간 저온에 의한 수박의 성장 및 과실 비대 양상 변화를 조사하여 내냉성 수박 품종개발의 기초자료로 활용하고자 수행하였다.

재료 및 방법

1. 공시품종 및 재배방법

저온기 축성재배용으로 주로 재배하는 ‘스피드꿀’ (Nongwoo Bio Co., Korea) 품종과 내냉성 자원으로 보고된

‘Chaleston gray’ (Kozik and Wehner 2014), 반축성재배에 널리 이용하는 품종인 ‘삼복꿀’ (Hungnong seed Co., Korea)을 대상으로 저온에 따른 생장 및 과실 비대 양상을 비교하였다. 2020년 3월 26일에 원예용 상토 (Hungnong seed Co., Korea)를 채운 50공 트레이 (W 280×L 540×H 48 mm, Bumngong Co., Korea)에 수박 종자를 파종하고 33일간 육묘하였다. 2020년 4월 28일에 부엽토와 원예용 상토를 1:1로 혼합하여 채운 화분 (D 16×H 14, D 30×H 40 cm)에 4~5매의 본엽이 달린 수박 묘를 저온과 적온 처리구별로 품종당 6개의 식물체를 반복구로 정식하였다. 토양의 수분상태를 관찰하면서 2~3일에 한 번씩 화분의 흙이 충분히 젖을 정도로 관수하였으며 정식 14일 후에 어미덩굴 1개와 아들덩굴 1개를 유인하였다.

2. 저온 및 적온처리

저온환경은 국립원예특작과학원 소재의 이상기상 연구동에서 인공기상환경 제어모듈 (EWGC; Modified CEEWS model, Environmental Growth Chamber Chagrin Falls, USA)에 실제 축성재배기 초기의 이중하우스 내부의 온도를 적용하여 주/야간 온도를 26/10°C (최저 3°C, 최고 38°C)로 처리하여 야간 온도를 수박의 생육이 억제되는 10°C 이하로 설정하였다 (Korkmaz and Dufault 2001; Bidabadi and Mehralian 2020; Rural Development Administration 2020). 주간 최대 광도는 수박의 광포화점인 800 μmol·m⁻²·s⁻¹ (12/12 h)까지 점차적으로 증감하도록 설정하여 낮과 밤의 광환경을 조성하였다 (Fig. 1). 대조구인 적온 조건은 길이 40 m, 폭 7 m, 동고 3.7 m, 측고 1.7 m의 단동 이중 비닐

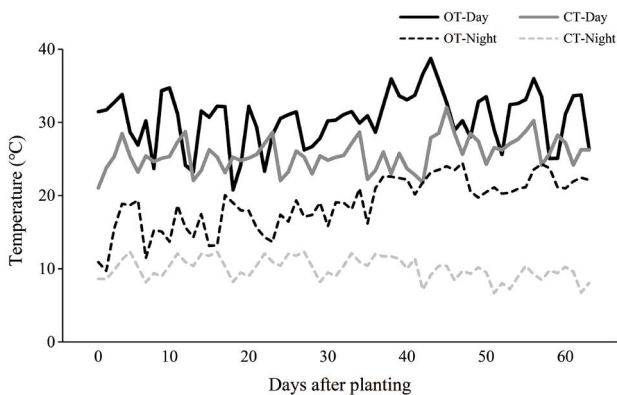


Fig. 1. Average day and night temperatures during growing period. OT; optimal temperature, CT; chilling temperature.

하우스 (210 m²)에서 평균 온도 30/19°C (최저 6°C, 최고 47°C)로 처리하여 수박의 생육 적온인 18~32°C 범위로 설정하였다 (Korkmaz and Dufault 2001; Rural Development Administration 2020). 저온과 적온처리구의 환경데이터는 지면으로부터 약 50 cm 높이의 식물체 주변에 온습도 데이터로거 (Temperature/humidity data logger, TR-72wb; T&D Co., Japan)를 설치하여 수집하였다 (Fig. 1).

3. 생육 초기 덩굴의 생장

생육 초기 온도에 따른 품종 간 생장 비교를 위하여 정식 후 20일에 어미덩굴의 마디 수, 길이, 생체중, 건물중을 조사하였다. 생체중은 전자저울 (CY423C; Aczet, India)을 이용하여 측정하였고 같은 샘플을 열풍건조기 (DS-80-3; Dasol Scientific Co., Korea)로 75°C에서 3일 이상 건조한 후 건물중을 측정하였다.

4. 암꽃의 개화 및 교배기

저온 처리에 따른 각 품종별 교배기를 비교하기 위해 어미덩굴에서 발생한 암꽃의 개화일을 조사하였다. 개화일은 매일 아침 9시 교배가 왕성이 이루어지는 시기에 완전히 꽃잎이 벌어진 암꽃을 대상으로 조사하였으며 3번째 발생한 암꽃에 자가수분하고 개화소요일수를 조사하여 교배기를 조사하였다.

5. 생육 중기 잎과 덩굴의 생장

품종별로 완전히 발달한 잎과 덩굴의 생장비교를 위해 13번째 잎을 대상으로 엽장, 엽폭, 엽병의 길이를 조사하고 전체 어미덩굴의 길이를 측정하였다. 정식 후 35일에 적온 처리구는 13번째 잎이 완전히 전개되어 조사가 가능하였으나 저온처리구는 낮은 온도로 인해 식물체의 생육이 크게 지연되어 13번째 잎과 마디가 발생하지 않았다. 수박은 생장점에서 새로운 마디가 발생하면서 아래 마디의 잎과 꽃 등의 구조가 발달하게 되는데 약 20마디에서 3번째 암꽃이 개화하는 교배기에는 13번째 잎이 완전히 전개되어 있기 때문에 각 처리구의 교배기를 조사일로 설정하고 적온과 저온처리구에서 각각 정식 후 35일과 45일에 실시하였다.

6. 생육 후기 덩굴의 생장

처리구별로 교배 후 15일에 생육 후기 생장을 조사하였

으며 온도에 따른 생육의 차이로 인해 적온처리구는 정식 후 50일, 저온처리구는 정식 후 60일에 실시하였다. 생육 초기와 동일한 방법으로 어미덩굴의 마디 수, 길이, 생체중, 건물중을 조사하여 지속적인 야간 저온에 의한 품종별 생장을 비교하였다.

7. 착과 및 과실 비대

저온이 착과와 과실 비대에 미치는 영향을 알아보기 위해 3번째 암꽃에 자가수분하여 교배를 수행한 후 착과가 정상적으로 이루어져 과장이 5cm 이상으로 발달한 개체의 비율을 조사하여 착과율을 산출하였다. 과실 비대 양상의 변화는 저온과 적온에서 교배 후 15일이 경과한 과실을 대상으로 과장, 과폭, 과중을 측정하여 조사하였다.

8. 온도에 의한 생육변화

식물체 및 과실의 생육조사는 품종당 6반복을 수행하였고 조사한 특성의 저온과 적온재배 시 품종별 생육의 차이는 감소율로 나타냈으며 다음의 식을 통해 산출하였다.

$$\text{감소율}(\%) = \frac{\text{적온재배 측정값} - \text{저온재배 측정값}}{\text{적온재배 측정값}} \times 100$$

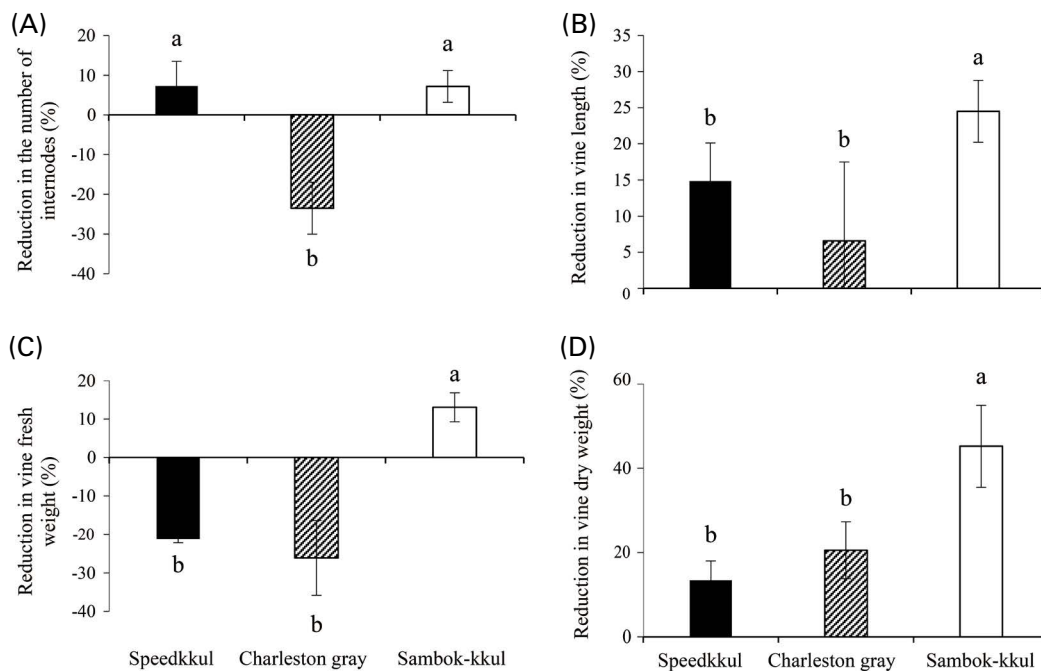


Fig. 2. Reduction ratios in the number of internodes (A) and the length (B), fresh weight (C) and dry weight (D) of vines for different watermelon cultivars grown in chilling temperature in comparison with those in optimal temperature at night on 20 days after transplanting. Bars represent standard deviations. Different letters indicate significant differences by Duncan's multiple range test at $p < 0.05$.

9. 통계 분석

자료는 SPSS 통계프로그램 (version 27, IBM Co., USA)과 Microsoft Excel (version 2016, Microsoft, USA)을 이용하여 분석하였다. 각 처리 간 유의성은 5%의 유의수준에서 분산분석 (Analysis of variance)을 실시하고 던컨의 다중범위검정 (Duncan's multiple range test)으로 비교하거나 t -검정 (Student's t -test)을 실시하여 $p < 0.5$, $p < 0.01$, $p < 0.001$ 수준에서 유의성을 검정하였다.

결 과

1. 생육 초기 덩굴의 생장

정식 후 20일에 온도에 따른 품종별 초기 생육을 조사한 결과, 촉성재배 품종과 내냉성 품종의 야간 저온에 대한 생육 감소율이 반촉성재배 품종보다 적은 것으로 나타났다 (Fig. 2). 마디 수는 촉성재배 품종인 '스피드꿀'과 반촉성재배 품종인 '삼복꿀'에서는 감소율이 비슷했으나 내냉성 품종인 'Charleston gray'는 저온에서 마디 수가 오히려 증가하였다 (Fig. 2A). '삼복꿀'은 저온에서 덩굴 길이가 적온 대비 25% 감소하여 저온의 영향을 가장 크게 받았다 (Fig. 2B).

‘삼복꿀’은 저온에서 생체중이 감소하였으나 다른 두 품종은 오히려 저온에서 생체중이 증가하였다 (Fig. 2C). 건물중도 ‘삼복꿀’은 저온에 의한 감소율이 컸으나 다른 두 품종의 감소율은 통계적으로 유의하게 ‘삼복꿀’보다 적었다 (Fig. 2D).

2. 암꽃의 개화 및 교배시기

암꽃의 개화는 저온에 의해 크게 지연되는 것으로 나타났다 (Table 1) 이는 저온에 의해 마디의 형성이 억제되면서 5~7마디마다 생성되는 암꽃의 착생이 지연되었기 때문이다. 저온처리구에서 ‘삼복꿀’은 적정 착과 위치인 3번째 암꽃의 개화가 적온처리구에 비해 10일 정도 지연되어 정식 후 45일에 교배기에 접어들었으며 다른 두 품종도 저온에서 개화소요일수가 10~15일 정도 증가하며 품종 간에 개화일수는 큰 차이를 보이지 않았다 (Table 1).

3. 생육 중기 잎과 덩굴의 생장

교배기에 저온에 의한 생육 감소율을 조사한 결과, 덩굴 길이는 모든 품종이 저온에 의해 큰 폭으로 감소하였고 ‘Charleston gray’는 저온에 의한 감소율이 33%로 다른 두 품종과 통계적으로 유의하게 덩굴 길이가 감소하였으나

‘스피드꿀’과 ‘삼복꿀’은 감소율이 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다 (Fig. 3A). 저온에 의해 잎의 생장 또한 억제되는 경향을 보였는데, 엽장은 모든 품종에서 감소하였고 감소율은 ‘Charleston gray’가 가장 크고 ‘스피드꿀’이 가장 작았다 (Fig. 3B). 엽폭도 비슷한 경향을 보였으나 ‘스피드꿀’은 저온에서 오히려 엽폭이 증가하였다 (Fig. 3C). 엽병의 길이는 모든 품종이 47% 이상 감소하여 저온에서 가장 크게 감소하는 경향을 보였으며 감소율은 ‘Charleston gray’가 가장 크고 ‘스피드꿀’과 ‘삼복꿀’은 통계적으로 유의한 차이는 없었다 (Fig. 3D).

4. 생육 후기 덩굴의 생장

교배 후 15일에 마디 수는 ‘Charleston gray’에서 약 10% 정도 감소하였으나 ‘스피드꿀’과 ‘삼복꿀’에서는 오히려 증가하였다 (Table 2). 덩굴 길이 또한 ‘Charleston gray’에서 가장 크게 감소하였고, ‘스피드꿀’과 ‘삼복꿀’의 순으로 감소율이 통계적으로 유의하게 적었다 (Table 2). 덩굴의 생체중은 ‘스피드꿀’이 다른 품종에 비해 통계적으로 유의하게 감소폭이 적었으며, 건물중 감소율은 품종 간 차이가 없었다 (Table 2).

Table 1. Differences in days to flowering for the female flowers on fruit set node among watermelon cultivars grown in optimal and chilling night temperature conditions

Cultivars	Days to flowering (days)		Reduction ratio (%)	t-test ² (p)
	Optimal night temperature	Chilling night temperature		
Speedkkul	31.2	43.6	-39.6	-7.368*** (<0.001)
Charleston gray	35.9	51.7	-44.3	-6.996*** (<0.001)
Sambok-kkul	32.8	44.4	-36.2	-4.095** (0.001)

²ns, *, ** and *** represent not significant, significant at the $p < 0.05$, $p < 0.01$, $p < 0.001$ levels in t-test respectively.

Table 2. Differences in vine and fruit growth, and fruit set ratio among watermelon cultivars grown in chilling temperature in comparison with those in optimal temperature at night on 15 days after pollination.

Cultivars	Reduction ratio (%)							Fruit set ratio (%)
	No. of internodes	Vine length	Vine fresh weight	Vine dry weight	Fruit length	Fruit width	Fruit weight	
Speedkkul	-10.4 b ²	30.2 b	45.7 b	36.9 a	43.4 b	46.7 a	84.1 b	14.3
Charleston gray	9.9 a	46.3 a	51.3 a	40.1 a	57.1 a	51.5 a	89.4 a	35.7
Sambok-kkul	-6.2 b	23.5 c	55.4 a	44.4 a	44.6 b	40.8 a	80.8 b	0.0

²Different letters indicate significant differences by Duncan's multiple range test at $p < 0.05$.

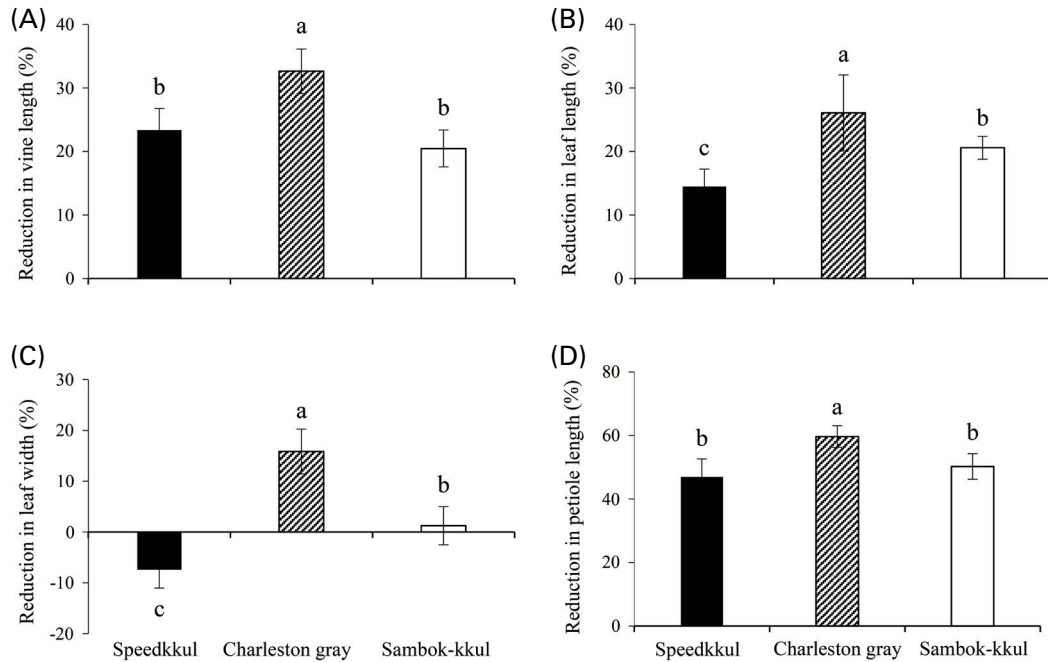


Fig. 3. Reduction ratios in vine length (A) and leaf length (B) and width (C), and petiole length (D) among watermelon cultivars grown in chilling temperature in comparison with those in optimal temperature at night on the day of pollination. Bars represent standard deviations. Different letters indicate significant differences by Duncan's multiple range test at $p < 0.05$.

5. 착과 및 과실 비대

저온이 과실 비대에 미치는 영향을 알아보기 위해 각각 저온과 적온에서 교배 후 15일이 경과한 과실 생육을 비교한 결과 저온에서 과실 길이, 폭, 무게가 큰 폭으로 감소하였다 (Table 2). 과장은 'Charleston gray'가 다른 두 품종에 비해 통계적으로 유의하게 감소하였고 과폭은 'Charleston gray'와 '스피드꿀'이 '삼복꿀'에 비해 통계적으로 유의하게 감소하였다. 과중은 'Charleston gray'에서 통계적으로 유의한 감소를 보였으며 '스피드꿀'과 '삼복꿀' 간의 차이는 없었다. 착과율은 반축성재배 품종인 '삼복꿀'에서 가장 좋았으며 '스피드꿀', 'Charleston gray'의 순서로 감소율이 증가하였다.

고 찰

본 연구는 내냉성과 감수성을 보일 것으로 예상되는 품종들을 야간 저온에 장기간 노출시켜 생육반응을 조사하고 이를 저온기 수박 재배기술 연구 및 품종개발의 기초자료로 활용하고자 수행하였다. 공시품종 중 '스피드꿀'은 저

온기에 재배하는 축성재배 품종, 'Charleston gray'는 유묘기 저온에서 중도 내성을 보인 품종 (Kozik and Wehner 2014), '삼복꿀'은 일반적인 반축성재배 품종이다. 따라서 '삼복꿀'에 비해 'Charleston gray'와 '스피드꿀'이 지속되는 저온환경에서도 내냉성을 보일 것으로 예측하였다.

저온 환경에서는 식물조직을 구성하는 세포주기가 길어지고 세포의 생산이 저하되면서 생장이 억제되어 길이, 줄기 직경, 건물중 등이 감소하기 때문에 저온 하에서도 원활한 생장을 보이는 것을 내냉성 반응으로 평가하고 있다 (Erwin *et al.* 1995; Korkmaz and Dufault 2001; Ploeg *et al.* 2005; Hussain *et al.* 2018). 일반적으로 수박의 생육을 평가할 때 덩굴의 길이가 길고 무게가 증가할수록 생육이 원활한 것으로 판단한다 (Ko *et al.* 2012; Cheng *et al.* 2016; Sherzod *et al.* 2019; Bidabadi and Mehralian 2020)

생육 초기의 야간 저온에서 'Charleston gray'와 '스피드꿀'이 반축성재배 품종보다 더 좋은 생장을 보여 예측한 바와 같이 내냉성을 보이는 것으로 판단되었다 (Fig. 2). 특히 '스피드꿀'과 'Charleston gray'는 생육 초기 야간 저온에서 생체중이 오히려 증가하는 경향을 보였는데 이는 저온에서 자란 수박 유묘가 적온보다 생체중이 증가한 이전 연

구 결과(Sheikh *et al.* 2015)와 유사하였다. 생육 초기 저온에서 식물체의 생체중이 증가하는 이유는 저온에 노출되었을 때 삼투조절물질인 가용성 당, 환원당, 자당, 프롤린의 함량이 증가하여 식물체의 삼투압이 증가한 결과(Lu *et al.* 2020) 낮은 고온기에 수분이 세포 내로 유입되어 지상부의 생체중이 증가한 것으로 판단된다. 또한 생육 초기 저온에 의한 덩굴 길이 감소율은 ‘Charleston gray’와 ‘스피드꿀’에서 유의적인 차이를 보이지 않았으나 ‘Charleston gray’는 저온에서 마디 수가 오히려 증가하여 내냉성 자원 간에도 저온 하에서 성장반응의 차이가 존재하였다(Fig. 2).

내냉성으로 추정되는 ‘스피드꿀’과 ‘Charleston gray’에서 나타난 생육 초기의 높은 저온 신장성(Fig. 2)은 교배기(Fig. 3B)와 생육 후기(Table 2)까지 지속되지 않았는데, 이는 품종의 육성목표와 선발기준이 정식 후 생육 초기의 내냉성에 있기 때문인 것으로 판단된다. 일반적으로 축성재배는 육묘장에서 적온환경에 재배한 묘를 포장에 정식하는 시기가 늦겨울의 저온기와 겹치면서 생육 초기에 어린 식물체가 저온에 노출되고, 봄이 오면서 온도가 점차 증가하여 생육에 유리한 조건이 된다. 따라서 축성재배용 품종의 선발은 주로 정식 초기의 내냉성에 집중되고, 공시품종 중 하나인 ‘Charleston gray’는 유묘기에 저온을 처리하여 내냉성을 확인한 품종이므로(Kozik and Wehner 2014), 전체 생육 기간 동안 지속적으로 저온을 처리했을 때 생육 초기 이후에는 뚜렷한 내냉성을 보이지 않은 것으로 판단된다.

생육 초기의 내냉성은 교배기의 식물체 성장과 과실의 비대에도 큰 영향을 미치지 못했다. 초기 생육이 좋았던 ‘스피드꿀’은 ‘삼복꿀’과 교배기 식물체의 성장 및 과실 비대에 큰 차이가 없었고(Table 2), ‘Charleston gray’의 경우 오히려 교배기의 성장과 과실 비대가 ‘삼복꿀’보다 통계적으로 유의하게 감소하였다(Fig. 3, Table 2). 개화기 또한 품종 간 차이가 없이 10~15일 정도 감소하였는데 이는 수박의 착화 특성과 관련이 있다. 수박은 마디마다 하나의 꽃이 형성되며 5~7마디마다 암꽃이 착생하고 그 외의 마디에는 수꽃이 착생하는 특성을 보이는데(Rural Development Administration 2020), 저온으로 인해 마디의 형성이 지연되어 암꽃의 착생 또한 지연되었기 때문이다. ‘삼복꿀’의 경우 저온에서 착과율이 적온과 큰 차이가 없었는데 이는 ‘스피드꿀’과 ‘Charleston gray’에서 착과율이 크게 감소된 것과 대조되는 결과이다(Table 2). 저온 환경에서 안정적으로 착과를 시키기 위해서는 화기의 발달과 화분의 활력

이 양호해야 하며 화분매개충이 원활히 활동할 수 있도록 20~25°C 범위의 온도가 유지되어야 한다(Lim 2010; Rural Development Administration 2020). 연속적인 15°C의 저온 환경에서 수꽃의 발달에 대해 연구한 결과 화분의 발달은 크게 영향을 받지 않으나 개약의 지연으로 화분이 제 때 방출되지 못하여 활력이 저하되었다(Lyu *et al.* 2019). 공시품종 중 ‘스피드꿀’은 저온기 화분 활력이 좋은 것으로 알려져 있으나 저온에 의한 착과율 저하가 ‘삼복꿀’에 비해 크게 나타나 화분 활력 외에 다른 생육반응이 착과율에 영향을 미친 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 저온에 노출되는 수박의 유묘기, 생육기, 과실 비대기 등 생육단계와 저온이 유지되는 기간에 따라 품종별 내냉성이 다른 양상을 보일 수 있다는 것을 확인하였다. 이 결과는 유묘에 짧은 기간 동안 저온을 처리하여 내냉성 자원을 선발하는 기존 연구 방법으로는 생육 중 후반의 식물체 성장과 저온에서 착과 및 과실 비대를 추정할 수 없다는 것을 보여준다. 재배작형에 따라 식물체가 저온환경에 노출되는 생육단계가 다르므로 억제재배 작형은 과실 비대기, 축성재배 작형은 교배기에 내냉성을 보이는 품종 육성이 필요한 것으로 판단된다. 또한 추후 더 다양한 자원을 대상으로 저온 환경에서의 생육단계별 성장과 과실특성 간의 연관성을 확인할 필요가 있다.

적 요

수박은 저온에 민감한 작물로 10°C 이하에서는 생육이 지연되거나 억제된다. 농가에서는 소득 향상을 위해 정식 시기를 앞당기고 있으나 축성재배 작형에서 안정적으로 수박을 생산하기 위해서는 가온 혹은 보온이 필수적이기 때문에 비용 및 노동력의 부담이 크다. 이에 따라 저온 피해를 경감시킬 수 있는 재배기술과 축성재배용 수박 품종 개발이 요구되고 있으며 본 연구는 재배기간 중 지속적인 야간 저온에 의한 수박의 성장 및 과실 비대 양상 변화를 조사하여 내냉성 수박 품종개발의 기초자료로 활용하고자 수행하였다. 지속적인 야간 저온과 적온 환경에서 내냉성을 보일 것이라 예측되는 품종과 저온에 감수성을 보일 것으로 예측되는 품종을 재배하고 생육을 비교하였다. 정식 후 생육 초기에는 내냉성을 보일 것으로 예측하였던 품종이 저온 조건에서 덩굴 길이의 감소율이 작았으며, 생체중

과 건물중은 증가하였다. 그러나 교배기와 생육 후기에는 내냉성 품종 중 하나에서 감수성 품종보다 덩굴 길이, 엽장, 엽폭, 엽병길이의 생장이 억제되어 자원 간에도 생육단계에 따라 성장반응의 차이가 존재하는 것을 확인하였다. 과장, 과폭, 과중 또한 내냉성 품종에서 통계적으로 유의하게 생육량이 낮았으며 착과율도 감수성 품종에서 높은 값을 보였다. 이는 품종의 육성목표와 선발기준이 정식 후 생육 초기의 내냉성에 있기 때문인 것으로 판단되며, 다양한 저온환경에 적응할 수 있는 품종을 개발하기 위해 유묘기부터 과실 비대기까지의 생육단계에 따른 내냉성에 대한 추가 연구가 필요하다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 연구사업(세부과제번호: PJ01260802)의 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

- Bidabadi SS and M Mehralian. 2020. Arbuscular mycorrhizal fungi inoculation to enhance chilling stress tolerance of watermelon. *Gesunde Pflanzen* 72:171-179.
- Cheng F, J Lu, M Gao, K Shi, Q Kong, Y Huang and Z Bie. 2016. Redox signaling and CBF-responsive pathway are involved in salicylic acid-improved photosynthesis and growth under chilling stress in watermelon. *Front. Plant Sci.* 7:1-16.
- Erwin JE and RD Heins. 1995. Thermomorphogenic responses in stem and leaf development. *HortScience* 30:940-949.
- Guo FX, Y Chen, XR Li, SJ Xu, LZ An and DS Liu. 2007. Enhancement of low-temperature tolerance in Watermelon (*Citrullus lanatus*) seedlings by cool-hardening germination. *Aust. J. Exp. Agr.* 47:749-754.
- Hussain HA, S Hussain, A Khaliq, U Ashraf, SA Anjum, S Men and L Wang. 2018. Chilling and drought stresses in crop plants: Implications, cross talk and potential management opportunities. *Front. Plant Sci.* 9:1-21.
- Ko HC, WM Lee, JJ Noh, KS Park, DK Park, KD Ko, JM Lee and YC Huh. 2012. Growth and development of watermelon plants grafted onto *Citrullus* rootstocks with resistance to fusarium wilt at two temperature regimes. *J. Bio-Env. Con.* 21: 33-38.
- Korea Rural Economic Institute (KREI). 2021. Agricultural Outlook 2021. Korea Rural Economic Institute. Naju, Korea.
- Korkmaz A and RJ Dufault. 2001. Developmental consequences of cold temperature stress at transplanting on seedling and field growth and yield. I. Watermelon. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 126:410-413.
- Kozik EU and TC Wehner. 2014. Tolerance of watermelon seedlings to low-temperature chilling injury. *HortScience* 49:240-243.
- Kwon JK, KH Kang, GB Kweon, YH Choi, NJ Kang and JH Lee. 2006. Effect of thermal tunnel covers and warm-water heating using excel pipe on the growth and wilting of greenhouse watermelon. *Korean J. Hortic. Sci. Technol.* 24:143-147.
- Kwon JK, GB Kweon, KH Kang, YH Choi, NJ Kang, JH Lee, HJ Jeong and JM Park. 2005. Effect of different rootstocks and double grafting on the fruit quality and withering occurrence of greenhouse watermelon. *Korean J. Hortic. Sci. Technol.* 23:382-387.
- Kwon SW, HG Chon, DC Choi and JC Kim. 2001. Incidence and visual symptoms of chilling injury in greenhouse watermelons. *J. Bio-Env. Con.* 10:36-41.
- Kwon SW, BR Ko and DG Bai. 2003. Changes in antioxidant enzymes and polyamines in response to low temperature chilling in watermelon plants. *Acta Horticulturae* 620:111-117.
- Lim CS. 2010. Selection of cultivars and organic solvents to improve fruit set of greenhouse watermelon during cold period. *J. Bio-Env. Con.* 19:147-152.
- Lu J, MA Nawaz, N Wei, F Cheng and Z Bie. 2020. Suboptimal temperature acclimation enhances chilling tolerance by improving photosynthetic adaptability and osmoregulation ability in watermelon. *Hortic. Plant J.* 6:49-60.
- Lyu X, S Chen, N Liao, J Liu, Z Hu, J Yang and M Zhang. 2019. Characterization of watermelon anther and its programmed cell death-associated events during dehiscence under cold stress. *Plant Cell Reports* 38:1551-1561.
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA). 2018. Seed Industry Statistics. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. Sejong, Korea.
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA). 2020. Statistics on Production of Greenhouse Vegetable and Greenhouse Facilities for Vegetable. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. Sejong, Korea.
- Noh JJ, JM Kim, S Sheikh, SG Lee, JH Lim, MH Seong and GT Jung. 2013. Effect of heat treatment around the fruit set region on growth and yield of watermelon [*Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum. and Nakai]. *Physiol. Mol. Biol. Plant.* 19: 509-514.
- Ploeg AVD and E Heuvelink. 2005. Influence of sub-optimal temperature on tomato growth and yield: A review. *J. Hortic. Sci. Biotech.* 80:652-659.

- Rivero RM, JM Ruiz, PC García, LR López-Lefebvre, E Sánchez and L Romero. 2001. Resistance to cold and heat stress: Accumulation of phenolic compounds in tomato and watermelon plants. *Plant Sci.* 160:315–321.
- Rivero RM, E Sanchez, JM Ruiz and L Romero. 2003. Influence of temperature on biomass, iron metabolism and some related bioindicators in tomato and watermelon plants. *J. Plant Physiol.* 160:1065–1071.
- Rudich J and A Peles. 1976. Sex expression in watermelon as affected by photoperiod and temperature. *Sci. Hortic.* 5:339–344.
- Rural Development Administration (RDA). 2020. Watermelon (The textbook for farming no. 104). Rural Development Administration. Jeonju, Korea.
- Seoul Agro-Fisheries and Food Corporation (SAFF). 2020. Analysis in Shipping Region in Korea. Seoul Agro-Fisheries and Food Corporation. Seoul. <https://www.garak.co.kr/bbs/select>
- Bbs.do
- Sheikh S, JJ Noh, MH Seong, GT Jung and JM Kim. 2015. Consequences of chilling stress on watermelon (*Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum. and Nakai) germplasm lines at seedling stage. *Hort. Environ. Biotech.* 56:79–88.
- Sherzod R, EY Yang, MC Cho, SY Chae, JH Kim, CW Nam and WB Chae. 2019. Traits affecting low temperature tolerance in tomato and its application to breeding program. *Plant Breed. Biotech.* 7:350–359.
- Theocharis A, C Clément and EA Barka. 2012. Physiological and molecular changes in plants grown at low temperatures. *Planta* 235:1091–1105.
- Wei H, HS Ai, SY Fu, FZ Yuan, L Shan-Zhen and DZ Zhao. 2015. Effects of sub-optimal temperatures and low light intensity on growth and anti-oxidant enzyme activities in watermelon (*Citrullus Inatus*) Seedlings. *J. Hortic. Sci. Biotech.* 90:92–98.