



Powered by iThenticate Depositor



저온처리 온도와 상대습도가 2년생 인삼의 동해에 미치는 영향

서수정¹ · 문지원² · 권나영³ · 장인복⁴ · 김영창⁵ · 장인배^{6*}

Effects of Cold Temperature and Relative Humidity on the Freezing Stress of Two Year-old Ginseng Seedlings

Su Jeoung Suh¹, Ji Won Moon², Na yeong Kwon³, In Bok Jang⁴, Young Chang Kim⁵ and In bae Jang^{6*}

ABSTRACT

Received: 2021 March 10
1st Revised: 2021 March 30
2nd Revised: 2021 May 18
3rd Revised: 2021 April 1
Accepted: 2021 April 1

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.

Background: Abrupt cold, especially frost after seedling emergence, in spring causes servere losses in ginseng yield as it is a perennial crop and has a determinate growth. Although abnormal temperature occurs more frequently, the physiological aspects of ginseng to cold stress are poorly understood. Here we report the freezing response of ginseng under artificial conditions.

Methods and Results: Cold treatment at -4 °C for 16 h resulted in a 21.4% damage rate in a cold chamber, however, no damage was observed at -2 °C and -4 °C for 2, 4, 6, or 8 h. High humidity increased the damage rate to 59.9% even at the higher temperature (RH 95%, -3 °C) than the ambient temperature (RH 66%, -4 °C) of the cold chamber. Seedlings early in the leaf expansion were damaged more than older ones. The quantum yield (F_v/F_m) of cold-damaged seedlings was lower than the control or seedlings without visual symptoms. The root weight of a damaged seedling one month after cold treatment was 58% of control.

Conclusions: Our results suggested that visual symptoms are correlated with photosynthetic ability and yield after freezing stress in ginseng. We expect our results to contribute to the further understanding of ginseng freezing stress.

Key Words: *Panax ginseng* C. A. Meyer, Chlorophyll Fluorescence, Cold Chamber, Cold Stress, Damage Rate, Freezing, Humidity

서 언

기후변화로 인한 이상기상이 빈번해지는 가운데, 특히 저온은 식물에 즉각적인 피해를 입혀 경제적 손실을 초래한다 (Hopkins and Hüner, 2003; Kim *et al.*, 2014). 식물마다 생육을 위한 적정온도가 다르고 생육적온보다 낮은 온도에서는 대사 작용이 저하되고 생육이 부진하여, 궁극적으로 유동성 저하에 따른 세포막 손상이 발생한다. 온도가 영하로 내려가면 동결 피해가 발생하는데, 일차적으로 세포간극 (apoplast)에 얼음이 형성되고 세포의 수분 손실이 일어나서 건조 스트레스를 받는다. 저온이 심해지면 세포 내에도 얼음이 형성되어 피해

가 가중된다 (Pearce, 2001; Hopkins and Hüner, 2003; Arias *et al.*, 2015).

저온 피해 중 동해 (freezing stress)는 찬 대기가 이동하여 발생하거나 (advective frost) 복사냉각 (radiative frost)에 의해 발생한다. 대부분의 작물 피해는 복사냉각에 의해 일어나는데 단지 몇 시간 안에 대기 온도가 -2°C - -5°C로 내려간다. 복사냉각은 지표면 근처에서 방출되는 복사 에너지가 유입되는 에너지보다 높을 때 냉각이 발생하는데, 주로 야간에, 구름이 없고 바람이 잔잔한 날, 지대가 높은 곳에서 발생이 빈번하다 (Fuller and Le Grice, 1998; Fuller and Telli, 1999; Wisniewski *et al.*, 2002; Hopkins and Hüner, 2003).

*Corresponding author: (Phone) +82-43-871-5610 (E-mail) ikanet@korea.kr

¹국립원예특작과학원 인삼특작부 인삼과 전문연구원 / Researcher, Department of Herbal Crop Research, NIHHS, RDA, Eumseong 27709, Korea.

²국립원예특작과학원 인삼특작부 인삼과 연구사 / Researcher, Department of Herbal Crop Research, NIHHS, RDA, Eumseong 27709, Korea.

³국립원예특작과학원 인삼특작부 인삼과 연구사 / Researcher, Department of Herbal Crop Research, NIHHS, RDA, Eumseong 27709, Korea.

⁴국립원예특작과학원 인삼특작부 인삼과 연구사 / Researcher, Department of Herbal Crop Research, NIHHS, RDA, Eumseong 27709, Korea.

⁵국립원예특작과학원 인삼특작부 인삼과 연구관 / Researcher, Department of Herbal Crop Research, NIHHS, RDA, Eumseong 27709, Korea.

⁶국립원예특작과학원 인삼특작부 인삼과 연구사 / Researcher, Department of Herbal Crop Research, NIHHS, RDA, Eumseong 27709, Korea.

대기 습도가 높을 때는 수분의 잠열방출로 인해 온도 하강을 억제하므로 저온 피해를 경감하는 효과가 있다 (Cameron and Dixon, 1997; Kratsch and Wise, 2000; Keller, 2010). 반대로 강우나 이슬에 의해 잎 표면이 젖은 상태에서 표면에 얼음이 형성되면 더 큰 동결 피해를 발생시킬 수 있다. 특히 *Pseudomonas syringae*와 같은 박테리아는 빙결핵(ice nucleating agent)으로 작용해서 저온 피해 증가 요인이 된다 (Luisetti, 1991; Wisniewski *et al.*, 2002; Keller, 2010).

저온에 노출되면 조직변화, 수분 포텐셜 하락, 세포막 손상, 광합성 기능 저하 등을 수반한다. 저온피해 양상을 조사할 때는 냉각 시 조직의 발열 양상 (exothermic profile), 현미경적 관찰, 전해질 유출, 상대수분함량 등을 측정하며 엽록소 형광 반응의 경우 식물체 손상 없이 측정할 수 있는 저온 스트레스 지표로도 사용된다 (Cary and Maryland, 1970; Kratsch and Wise, 2000; Kuk *et al.*, 2001; Keller, 2010).

수확하기까지 장기간의 생육을 해야 하는 인삼 (*Panax ginseng* C. A. Meyer)은 순간적으로 일어나는 저온 피해에 민감하다. 특히 인삼은 전년도에 생성된 잠아로부터 형성된 지상부가 제한성장 (determinate growth)을 하므로 출아기인 4월 중순부터 5월 상순의 동해는 막대한 피해를 입히게 된다. 인삼의 저온 피해 증상으로는 전엽 불량, 고사, 잎이 오그라드는 증상이 나타나고, 개화기 때 저온 피해는 종자 결실을 불량하게 한다. 또한 서릿발로 인해 토양의 결빙과 해빙이 반복될 경우 뇌두가 상하여 피해가 발생하기도 한다 (Park, 1991; Jeong *et al.*, 2012; RDA, 2018).

최근 들어 2018년 4월 초에 진안, 장수 등 전북 일부 지역의 저온 피해가 컸다. 3월 하순 평균기온은 평년보다 높아 출아가 빨랐으며, 저온 피해 발생일인 4월 8일의 전국 평균기온은 11.8°C로 평년보다 1.6°C 높았다. 그러나 이 지역의 야간 최저기온은 -4.3°C - -4.8°C로 떨어지면서 동해피해가 발생하였으며, 해가림 차광막이 설치되지 않은 밭과 고지대에서 발생빈도가 높았다 (RDA, 2018).

농작물 재해보상을 위한 피해기준 산정, 피해 경감책 마련, 내저온성 유전자원 선별 등을 위해서는 저온 피해 시 인삼의 생육에 미치는 영향이나 생리적 현상에 대한 정보가 필요하다. 그러나 지금까지는 인삼의 배 또는 뿌리의 배양체에서 저온처리에 따른 단편적인 유전자 발현 양상만 보고되었다 (Peng *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2010; Devi *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2020). 이에 본 연구는 인삼의 저온피해 원인과 피해 대책을 마련하기 위한 연구기반을 조성하기 위해 인공 환경에서의 실험을 통한 동결피해 양상을 조사하였다.

재료 및 방법

1. 공시재료 및 인삼 재배

본 실험은 농촌진흥청 국립원예특작과학원 인삼특작부 환경 조절온실에서 2020년 2월과 6월 사이에 수행하였다. 1년생 재래종 묘삼 (*Panax ginseng* C. A. Meyer)을 2019년 겨울에 농가에서 구입하여 -3°C에 저장한 후 실험 전 일주일 이상 2°C에서 두어 천천히 녹인 다음 0.6 g - 0.8 g 크기의 묘삼을 재료로 사용하였다.

실험구는 51 cm (너비) × 33 cm (길이) × 20 cm (높이) 화분에 인삼 전용상토 (Hwanggmpuri, Nongkyung, Jincheon, Korea)를 담고 묘삼을 4 행 × 6 열로 24 주를 이식하여 3 반복으로 조성하였다. 환경조절온실은 광투과율을 20%로 하는 차광막과 지열 냉난방 시스템을 이용하여 일사량과 온도를 조절하였고, 실내 온도가 28°C가 넘을 때는 보온 커튼을 조절하여 온도 상승을 억제하였다. 시험 기간동안 온실 내 평균온도는 2월부터 점차 증가하여 18.6°C - 23.0°C 범위였다.

2. 저온처리

저온처리는 -2°C 또는 -4°C로 설정된 저온 저장고 (Serbingo, Cheonan, Korea)에 인삼이 60% - 80% 출아하였을 때 처리 시간별 (2, 4, 6, 8 h, 또는 16 h)로 1 회 넣었다 꺼내어 다시 온실로 옮기는 방식으로 하였다. 저온처리 시기에 출아한 인삼은 출아를 시작한 것, 잎 전개중인 것 (expanding), 완료된 것 (expanded) 등이 혼재하였다.

저온고의 평균 상대습도는 약 66%로 저온고 전체의 습도를 높이는 어려워 토양수분 증발을 이용하여 극소적으로 고습 환경을 조성하기로 하였다. 17 cm (높이) × 10 cm (상면 직경) 크기의 플라스틱 컵에 공기구멍을 뚫고 개별 출아 인삼에 씌워 상대습도를 높였다. 화분당 약 10 개의 인삼에 플라스틱컵을 덮어 대조구와 고습처리가 동일 화분에서 이루어지게 하였다. 저온처리 시 온·습도는 EasyLog USB (Lascar Electronics Ltd., Wiltshire, UK)을 이용하여 별도의 실험에서 조사하였는데 컵 내부의 온도는 천천히 낮아져서 최종 -3°C였고 상대습도는 95%에 이르렀다 (Fig. 1).

3. 피해율 및 양호도 조사

식물의 손상 정도에 따라 점수를 다음과 같이 부여하여 저온처리 1 주일 후에 양호도 (healthiness)를 조사하였다 [‘1’, 전체 고사, ‘2’, 심한 손상 (50%이상), ‘3’, 부분손상 (생육부진 또는 50% 이하), ‘4’, 양호] (RDA, 2018). 피해율 (damage rate)은 양호도 중 ‘1’, ‘2’, ‘3’을 피해구로 보고, 화분별 출아한 전체 주수에 대한 이들 피해 개체수 합을 백분율을 구하여 (피해주수/전체 주수 × 100) 3 반복에 대한 평균을 산출하였다.

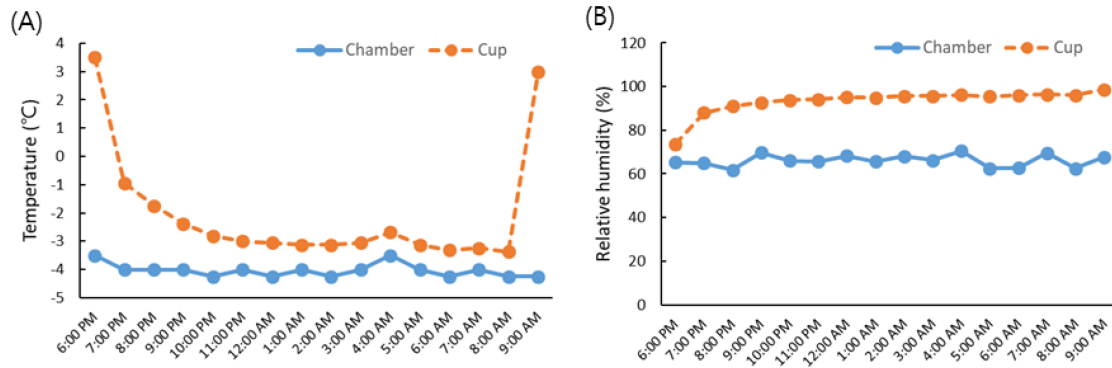


Fig. 1. Temperature (A) and relative humidity (B) in the cold room (line) and in the plastic cup (dash) for cold treatment on ginseng seedlings.

4. 생육조사

저온피해를 유발하는 생육 특징을 조사하기 위해서 16 시간, -4°C를 처리한 후 바로 피해주와 양호주를 회수하여 생육을 조사하였다. 저온처리가 생육에 미치는 영향을 조사하기 위해서는 저온처리를 실시한 날부터 한달 후에 조사하였다.

근경은 버어니어캘리퍼스 (Mitutoyo, Aurora, IL, USA)로 측정하였다. 경장은 뇌두 바로 위부터 잎자루 착생부까지의 길이를 측정하였고, 엽장과 엽폭은 가장 큰 잎의 길이와 폭을 측정하였다. 지상부 무게는 잎과 줄기를 포함한 생체 무게를 측정하였다.

5. 엽록소 형광반응과 엽록소 함량조사

엽록소 형광반응은 -4°C를 16 시간 처리하고 1 주일 후 대조구, 저온 처리구 중 양호구, 피해구로 나누어 리프클립 (leaf clip)으로 30 분간 암처리를 한 후 엽록소 형광을 측정하였다 (FP-100, Photon Systems Instruments, Drasov, Czech Republic). Photosystem II의 양자수율 (quantum yield)은 포화광 펄스에 의한 초기형광 (F_0)과 최대형광 (F_m)으로부터 구해지는데 ($F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m$) 본 실험에서는 측정기에서 제공되는 값을 사용하였다. 엽록소 함량도 저온처리 1 주일 후 엽색계 (SPAD-502Plus, Konica Minolta Inc., Tokyo, Japan)를 이용하여 조사하였다.

6. 통계처리

통계분석은 SAS v9.2 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)을 이용하여 ANOVA분석을 수행 후 DMRT (Duncan's Multiple Range Test)을 이용하거나 ($p < 0.05$), Student t -test를 이용하여 유의성을 검정하였다 ($p < 0.05$).

결과 및 고찰

1. 저온처리 온도와 시간의 영향

2018년 4월 8일 저온 피해가 컸던 장수의 야간 기온을 바탕으로 2년생 인삼 (*Panax ginseng* C. A. Meyer)의 출아기에 -2°C와 -4°C에서 2, 4, 6, 8 시간 동안 저온을 처리하였으나 저온처리구는 대조구와 비교하여 뚜렷한 손상을 받지 않았다 (Table 1).

온도가 영하로 떨어지더라도 얼음이 형성되지 않을 수 있는데 이를 과냉각 (supercooling)이라고 한다. 과냉각은 얼음이 형성되기 위한 빙결핵 (ice nucleating agent)이 없을 때, 물의 양이 극소량일 때, 세포 내 삼투물질에 의한 방해 등에 의해서도 일어난다 (Hopkins and Hüner, 2003; Keller, 2010).

인삼 지상부의 동결온도에 대해서는 알려진 바가 없지만, 지하부는 -5°C에 24 시간동안 노출시켜도 얼지 않았으나 -10°C에서는 5 시간 안에 심한 손상을 받는다고 하였다 (Lee and Proctor, 1996). 또한 대부분의 작물에서 동결 피해는 주로 복사 냉각에 의해 발생하는데, 이를 구현하기 위해 복사냉각이 가능한 장비를 사용하여 좀 더 정확한 냉해 조건을 조사하기

Table 1. Damage rate of ginseng after cold treatment at -2°C and -4°C.

Time	Damage rate (%)	
	Temperature (°C)	
	-2°C	-4°C
0 h	1.6±1.6 ^{ns}	7.2±1.3 ^{ns}
2 h	7.5±5.5	6.1±1.2
4 h	4.6±0.1	5.6±2.8
6 h	2.8±1.4	8.8±4.7
8 h	7.2±2.8	12.8±4.2

ns; not significant. *Means within a column are not significantly different by Duncan's Multiple Range Test (DMRT, $p < 0.05$). Values are means ± SE (n = 3).

도 한다 (Fuller and Le Grice, 1998; Lu *et al.*, 2019). 그 외에도 습도, 바람, 포장에 위치한 곳의 극소적 기상조건 등 여러 요소가 저온 피해에 영향을 줄 수 있으므로 설정 최저 온도가 -4°C로 한정된 저온저장고에서는 노지에서와 같은 동결피해 양상을 구현하기 어려웠을 것으로 생각된다 (Boostma and Brown, 1985; Cameron and Dixon, 1997; Keller, 2010; RDA, 2018).

위와 같은 이유로 저온처리 시간을 늘려 예비실험을 하였을 때 저온처리 16 시간에서 일정 정도의 피해가 관찰되어 이후 저온처리는 -4°C에서 16 시간 동안 하였다. 저온을 처리하였을 때 나타나는 증상으로는 전체적 또는 부분적으로 괴사하거나, 엽맥 주위로 황화가 시작된 후 점차 잎 전체가 황화되는 것이 관찰되었다. 드물게 잎의 피해가 뚜렷이 드러나지 않지만 팽압이 감소하거나, 잎이 주름져있는 경우도 있었다 (Fig. 2).

16 시간 동안 -4°C에서 저온을 처리하였을 때 최종 피해율이 21.4%였으며, 대조구는 잎발달이 불량한 개체가 있어 피해율이 2.9%였다. 저온처리구 중 피해를 받지 않은 나머지는 상태가 매우 양호하였는데 이들을 모두 포함하여 양호도를 조사한 결과 대조구는 3.94였으나 저온 처리구는 3.53으로 대조구보다 11.6% 낮았다 (Table 2). 반면 컵을 덮어 씌어 습도를 높여준 고습처리구는 피해율이 59.9%로 저온만 처리한 것보다 2.8 배 높았으며, 양호도도 2.85로 대조구보다 20% 낮았다 (Table 2).

-4°C에서 16 시간 저온을 처리하여 피해율이 증가하였지만

Table 2. Effects of cold treatment at -4°C for 16 h on damage rate and healthiness of ginseng seedlings.

	Damage rate (%)	Healthiness ¹⁾ (1 - 4)
Control	2.9±1.4 ^b	3.94±0.03 ^a
-4°C	21.4±3.5 ^b	3.53±0.11 ^b
-4°C-95RH ²⁾	59.9±12.7 ^a	2.85±0.12 ^c

¹⁾Healthiness (1; dead, 2; severe leaf damage, 3; delay or abnormal growth, 4; good). ²⁾95RH; > 95% relative humidity. *Different letters within a column are significantly different by Duncan's Multiple Range Test (DMRT, *p* < 0.05). Values are means ± SE (n = 3).

20% 내외로 양호구가 더 많아 인삼 지상부의 동결 피해온도는 더 낮은 곳에서 형성되거나, 다른 요소가 관여할 여지가 있다. 위 실험결과로 보면 대기 중 습도가 한 예일 것으로 생각된다. 고습 조건에서 형성된 이슬은 빙결핵 (ice nucleating agent)으로 작용할 수 있다. 이슬, 강우 등으로 잎표면이 젖거나, 병원균과 같은 이물질이 잎 표면에 있을 때도 빙결핵으로 작용하여 0°C보다 약간만 낮아도 얼음 결정이 형성되는데 이후 기공, 배수조직 (hydathode), 상처 등으로 확장되면 동결피해가 발생한다 (Cary and Mayland 1970; Luisetti *et al.*, 1991; Pearce, 2001; Wisniewski *et al.*, 2002).

본 연구에서도 컵을 씌어 놓음에 따라 표면에 이슬이 많이 발생하여 빙결핵 형성을 촉진하였을 수 있었다. 그러나 대기 중 습도는 일반적으로 저온 피해를 낮추는 특성이 있으므로, 실제로 노지에서 습도가 동해에 어떤 영향을 줄지는 복잡한 기상 상황과 연관되어 있어 단순히 예측하기는 어렵다.

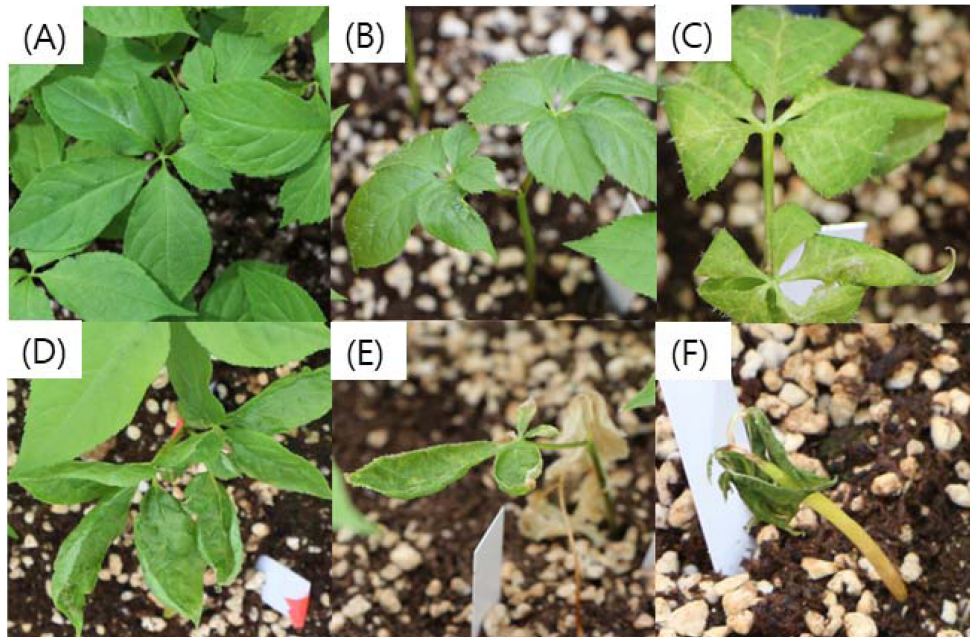


Fig. 2. Symptoms of leaf damage 1 week after cold treatment of cold at -4°C for 16 h. (A); normal, (B); leaf withering, (C); leaf chlorosis, (D); leaf shrinkage, (E); leaf damage, and (F); death.

Table 3. Growth properties of damaged ginseng seedlings by treatment of cold at -4°C for 16 h. Growth properties were measured right after cold treatment.

	Plant length (cm)	Stem length (cm)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Root length (cm)	Root weight (g)
Normal	14.8±0.4*	8.9±0.2 ^{ns}	4.0±0.1 ^{ns}	1.9±0.1 ^{ns}	16.5±1.0 ^{ns}	0.75±0.04 ^{ns}
Damaged+dead	13.5±0.5	8.3±0.3	3.8±0.2	1.9±0.1	16.8±1.3	0.79±0.03

ns; not significant. *Significantly different according to Student's *t*-test ($p < 0.05$). Values are means of 15 seedlings (\pm SE) from 3 replicate pots, except 11 seedlings for leaf length and leaf width for lost by death.

Table 4. Effects of leaf development stage on cold stress. Seedlings were treated with cold at -4°C for 16 hr.

Leaf development	Damage rate (%)	Healthiness ¹⁾ (1 - 4)
Expanding	60.1±10.0	2.6±0.2*
Expanded	30.4±4.0	3.4±0.0

¹⁾Healthiness (1; dead, 2; severe leaf damage, 3; delay or abnormal growth, 4; good). *Significantly different according to Student's *t*-test ($p < 0.05$). Values are means \pm SE obtained from 3 independent experiments. For each experiment, the average was obtained from 14 to 122 seedlings at expanding or expanded leaf stages that were grown in 3 replicate pots.

3. 인삼 소질이 저온피해에 미치는 영향

저온 피해를 입기 쉬운 인삼의 생육 특성이 있는지 조사하기 위해 저온처리 직후 피해를 입은 인삼과 피해를 입지 않은 인삼의 생육상태를 조사하였다. 지상부의 초장, 경장, 엽장, 엽폭은 양호구가 피해구보다 약간 크게 조사되었는데 통계적으로는 초장에서만 차이가 인정되었다 ($p < 0.05$). 이는 초장이 저온 피해에 영향을 주기보다는 피해구의 지상부 팽압상실이 정확한 길이 측정에 영향을 주어 나타난 결과로 생각된다. 근장과 근중에서도 양호구와 피해구 간에 큰 차이가 없었다. 이 결과로 볼 때 외형적 특징으로는 저온피해를 예측하기 어려울 것으로 판단되나 더 다양한 소질을 대상으로 실험해 보아야 할 수 있을 것이다 (Table 3).

발달단계가 저온 피해에 영향을 주었는지 조사하였는데 잎이 전개 중에 있던 인삼이 잎 전개가 끝난 인삼보다 피해율이 높은 편이었지만 통계적 유의성은 없었으며, 양호도도 전개중 인삼이 전엽이 끝난 것보다 유의하게 더 낮았다 ($p < 0.05$) (Table 4).

일반적으로 동절기 휴면상태에 있던 눈 (bud)은 수분을 흡수하고 발달이 진행되면서 저온에 대한 저항성을 잃어버린

다 (Keller, 2010). 감귤류, 복숭아, 포도 등에서는 식물 또는 눈의 발달단계에 따라 저온 피해 양상이 다르다고 보고되었는데 (Anderson *et al.*, 1980; Johnson and Howell, 1981; Andrews *et al.*, 1984) 차이가 없다는 연구 결과도 있다 (Luisetti *et al.*, 1991). 본 연구에 사용한 인삼은 모두 휴면이 끝난 상태이고 비교 대상도 모두 출아기 이후이므로 명확한 특성을 결정짓기는 어려운 점이 있다.

4. 저온처리가 엽록소 형광과 생육에 미치는 영향

저온처리 직후는 전엽이 충분하지 않거나 조직이 연하여 리프클리프를 물리기 어려워 엽록소 형광반응은 1주일 후에 조사하였다. 저온처리 후 대조구의 양자수율은 (Fv/Fm)은 0.785였는데, 외형적 손상이 관찰될 경우 0.770으로 감소하여 광합성 기구에 손상이 발생하였음을 알 수 있었다 ($p < 0.05$). 저온에 노출되었어도 외형적 손상이 없는 저온처리구의 양자수율은 0.784로 대조구와 차이가 없었다.

엽록소 함량도 대조구는 26.0이었고 저온피해구는 22.8로 감소하였는데 엽록소 함량감소가 엽록소 효율을 떨어뜨리는데 기여하였을 것으로 판단된다. 그러나 역시 외형적 손상이 없는 저온처리구의 엽록소 함량은 27.4로 대조구와 차이가 없었다.

저온에 노출되면 엽록소 형광반응이 감소하기도 하지만 저항성 작물의 경우 회복을 하기도 한다 (Kuk *et al.*, 2001; Rizza *et al.*, 2001; Oh and Koh, 2005). 본 연구에서 저온처리 후 외형적 손상이 관찰되지 않았어도 저온처리 시 엽록소 형광반응은 저하되었으나 1주일 후에는 회복되어 차이를 보이지 않았을 가능성도 있다.

5. 저온처리가 생육에 미치는 영향

저온처리 1개월 후 인삼 생육 차이를 비교하였을 때, 저온

Table 5. Effect of cold on chlorophyll fluorescence of ginseng seedlings after cold exposure at -4°C for 16 h.

	SPAD	Fo	Fm	Fv/Fm
Control	26.0±0.8 ^{ab}	12,462±158 ^a	57,997±884 ^a	0.785±0.003 ^a
-4°C (normal)	27.4±0.5 ^a	12,059±264 ^a	55,951±1017 ^a	0.784±0.001 ^a
-4°C (damaged)	22.8±0.7 ^b	12,264±195 ^a	53,361±531 ^b	0.770±0.003 ^b

*Different letters within a column are significantly different by Duncan's Multiple Range Test (DMRT, $p < 0.05$). Values are means \pm SE (n = 3).

Table 6. Growth properties of ginseng seedlings after 1 month of cold treatment at -4°C for 16 h.

Treatment time	Plant length (cm)	Stem length (cm)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Shoot weight (g)	Root length (cm)	Root width (mm)	Root weight (g)
Control	22.5±0.26 ^a	10.2±0.2 ^a	7.7±0.1 ^a	3.7±0.1 ^a	1.24±0.02 ^a	18.3±0.6 ^a	6.83±0.14 ^a	2.33±0.06 ^a
Normal	22.7±0.3 ^a	10.2±0.2 ^a	7.9±0.1 ^a	3.8±0.1 ^a	1.27±0.04 ^a	18.3±0.5 ^a	7.07±0.17 ^a	2.56±0.07 ^a
-4°C Damaged	16.5±0.6 ^b	8.3±0.3 ^b	5.3±0.3 ^b	2.9±0.1 ^b	0.71±0.07 ^b	16.4±0.8 ^{ab}	5.54±0.25 ^b	1.36±0.15 ^b
Dead	ND	ND	ND	ND	ND	14.6±0.9 ^b	5.03±0.17 ^b	1.07±0.08 ^c

ND; not determined. ^aDifferent letters within a column are significantly different by Duncan's Multiple Range Test (DMRT, *p* < 0.05). Values are means ± SE (n = 3).

처리구 중 양호구는 지상부 생육과 지하부 생육 역시 대조구와 차이가 없었다. 저온 피해구는 초장, 경장, 엽장, 엽폭, 지상부 무게, 근장, 근경, 근중 모든 조사항목에서 생육이 불량하였다. 이중 근중은 대조구 대비 58%였으며 지상부가 괴사한 개체의 근중은 대조구 대비 45%였다 (Table 6).

이상의 결과를 볼 때 인삼의 저온피해 연구를 인공적인 환경에서 수행 시에는 인위적으로 장시간 저온을 처리해주거나 적절한 저온처리 시설을 필요로 할 것으로 사료된다. 또한 인삼의 발달단계, 활력 등 다른 생리적 요소와 환경적 요소들도 저온 피해에 영향을 미치는 것으로 생각되므로 상황에 따라 이들을 고려하여 저온 피해 가능성을 연구하여야 할 것이다. 이번 연구를 통해 얻어진 정보들은 인삼의 저온 피해에 대한 이해를 높이고 피해 대책을 수립하는데 유용한 자료로 쓰이기를 기대하는 바이다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 연구사업(과제번호: PJ01482001)과 2021년도 농촌진흥청 국립원예특작과학원 전문연구원 과정 지원 사업에 의해 이루어진 결과로 이에 감사드립니다.

REFERENCES

Anderson KA, Howell GS and Wolpert JA. (1980). Phenological development of different *Vitis*(grape) cultivars(Relation to freeze damage). *Fruit Varieties Journal*. 34:5-7.

Andrews PK, Sandidge CR and Toyama TK. (1984). Deep supercooling of dormant and deacclimating *Vitis* buds. *American Journal of Enology and Viticulture*. 35:175-177.

Arias NS, Bucci SJ, Scholz FG and Goldstein G. (2015). Freezing avoidance by supercooling in *Olea europaea* cultivars: The role of apoplastic water, solute content and cell wall rigidity. *Plant, Cell and Environment*. 38:2061-2070.

Boostma A and Brown DM. (1985). Freeze protection methods for crops. Ministry of agriculture, food and rural affairs. Ottawa, Canada. <http://www.omafra.gov.on.ca/english/crops/facts/85-116.htm> (cited by 2021 Feb 8).

Cameron RWF and Dixon GR. (1997). Air temperature,

humidity and rooting volume affecting freezing injury to *Rhododendron* and other perennials. *Journal of Horticultural Science*. 72:553-562.

Cary JW and Maryland HF. (1970). Factors influencing freezing of supercooled water in tender plants. *Agronomy Journal*. 62:715-719.

Chen J, Zhou Y, Zhang Q, Liu Q, Li L, Sun C, Wang K, Wang Y, Zhao M, Li H, Han Y, Chen P, Li R, Lei J, Zhang M and Wang Y. (2020). Structural variation, functional differentiation and expression characteristics of the AP2/ERF gene family and its response to cold stress and methyl jasmonate in *Panax ginseng* C. A. Meyer. *PLoS ONE*. 15:e0226055. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226055> (cited by 2021 Feb 8).

Devi BSR, Kim YJ, Selvi SK, Gayathri S, Altanzul K, Parvin S, Yang DU, Lee OR, Lee S and Yang DC. (2012). Influence of potassium nitrate on antioxidant level and secondary metabolite genes under cold stress in *Panax ginseng*. *Russian Journal of Plant Physiology*. 59:328-325.

Fuller MP and Le Grice P. (1998). A chamber for the simulation of radiation freezing of plants. *Annals of Applied Biology*. 133: 111-121.

Fuller MP and Telli G. (1999). An investigation of the frost hardiness of grapevine(*Vitis vinifera*) during bud break. *Annals of Applied Biology*. 135:589-595.

Hopkins WG and Hüner NP. (2003). Introduction to Plant Physiology(3rd eds.). John Wiley and Sons Inc. Hoboken, NJ, USA. p.467-476.

Jeong HN, Jeong TS, Heo SJ, Kim SI, Cho YS, Ahn MS, Kim YC, Kim DH, Lee SW and Cha SW. (2012). Early budding characteristics and freezing damage of 5-Year-Old Ginseng(*Panax ginseng* C. A. Meyer) by different shading material in regional unusual temperature. *Proceedings of Journal of Medicinal Crop Science*. 11:137-138.

Johnson DE and Howell GS. (1981). Factors influencing critical temperatures for spring freeze damage to developing primary shoots on Concord grapevines. *American Journal of Enology and Viticulture*. 32:144-149.

Keller M. (2010). The science of grapevines: Anatomy and physiology. Academic Press. Burlington, MA, USA. p.274-286.

Kim JU, Kim YC, Bang KH, Kim DH, Son IC, Jung WS and Kim KH. (2014). Growth characteristics of aerial parts of 2-year-old cultivar of Korean ginseng, Yunpoong, based on climate change scenarios in Jeju. *Proceedings of Journal of Medicinal Crop Science*. 22:94-95.

Kratsch HA and Wise RR. (2000). The ultrastructure of chilling

- stress. *Plant, Cell and Environment*. 23:337-350.
- Kuk YI, Shin JS, Lee HJ and Guh JO.** (2001). Physiological responses of chilling-Tolerant and susceptible rice cultivars during chilling stress and subsequent recovery. *Korean Journal of Environmental Agriculture*. 20:93-98.
- Lee JC and Proctor JTA.** (1996). Low temperature tolerance of *Panax quinquefolium*. *Korean Journal of Ginseng Scicence*. 20:179-183.
- Lee JH, Kim YJ, Jeong DY, Sathiyaraj G, Pulla RK, Shim JS, In JG and Yang DC.** (2010). Isolation and characterization of a Glutamate decarboxylase(GAD) gene and their differential expression in response to abiotic stresses from *Panax ginseng* C. A. Meyer. *Molecular Biology Reports*. 37:3455-3463.
- Liu Q, Sun C, Han J, Li L, Wang K, Wang Y, Chen J, Zhao M, Wang Y and Zhang M.** (2020). Identification, characterization and functional differentiation of the NAC gene family and its roles in response to cold stress in ginseng, *Panax ginseng* C. A. Meyer. *PLoS ONE*. 15:e0234423. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0234423> (cited by 2021 Feb 8).
- Lu YZ, Hu YG, Tian JT, Song H and Snyder RL.** (2019). Artificial radiation frost chamber for frost formation on tea. *Applied Science*. 9:4726. <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/22/4726> (cited by 2021 Feb 8).
- Luisetti J, Gaignard JL and Devaux M.** (1991). *Pseudomonas syringae* pv. *syringae* as one of the factors affecting the ice nucleation of grapevine buds in controlled conditions. *Journal of Phytopathology*. 133:334-344.
- Oh SJ and Koh SC.** (2005). Analysis of O-J-I-P transients from four subtropical plant species for screening of stress indicators under low temperature. *Journal of the Environmental Sciences*. 14:389-395.
- Park H.** (1991). Physiological disorder of *Panax ginseng*. *Korean Journal of Crop Science*. 36:459-480.
- Pearce RS.** (2001). Plant freezing and damage. *Annals of Botany*. 87:417-424.
- Peng Y, Lin W, Cai W and Arora R.** (2007). Overexpression of a *Panax ginseng* tonoplast aquaporin alters salt tolerance, drought tolerance and cold acclimation ability in transgenic *Arabidopsis* plants. *Planta*. 226:729-740.
- Rizza F, Pagani D, Stanca AM and Cattivelli L.** (2001). Use of chlorophyll fluorescence to evaluate the cold acclimation and freezing tolerance of winter and spring oats. *Plant Breeding*. 120:389-396.
- Rural Development Administration(RDA).** (2018). White book for the damage of ginseng by the abnormal climate: Low temperature, high temperature, wind, flooding, and snow. Rural Development Administration, Jeonju, Korea. p.8-31.
- Wisniewski M, Glenn DM and Fuller MP.** (2002). Use of a hydrophobic particle film as a barrier to extrinsic ice nucleation in tomato plants. *Journal of American Society for Horticultural Science*. 127:358-364.
- Zhang R, Zhu J, Cao H, An Y, Huang J, Chen X, Mohammed N, Afrin S and Luo Z.** (2013). Molecular cloning and expression analysis of PDR1-like gene in ginseng subjected to salt and cold stresses or hormonal treatment. *Plant Physiology and Biochemistry*. 71:203-211.