



출아기 인삼 동결 피해가 지하부 생육 및 사포닌 함량에 미치는 영향

서수정¹ · 유진² · 김동휘³ · 장인배^{4†}

Influence of Freezing Damage during Sprouting Periods on Root Growth Characteristics and Saponin Contents in *Panax Ginseng* C. A. Meyer

Su Jeoung Suh¹, Jin Yu², Dong Hwi Kim³ and In Bae Jang^{4†}

ABSTRACT

Received: 2022 February 4
1st Revised: 2022 February 23
2nd Revised: 2022 March 9
3rd Revised: 2022 March 22
Accepted: 2022 March 22

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 temperature decline to freezing temperature in late spring results in severe damage to ginseng. Here we artificially applied freezing stress on ginseng and investigated the damage effects on its growth and saponin contents.

Methods and Results: Freezing stress was applied on 2-year-old ginseng in the pots or 3-year-old ginseng in the field. After 1 month of freezing treatment, the damage degree of the shoot was evaluated as 'dead', 'damage > 50%', 'damage < 50%', and 'healthy'. Roots were harvested after 4 months, and the growth properties were examined according to the shoot damage degree. In both experiments, there was a clear difference in root length, root diameter, and root weight in the order of shoot damage degree. The correlation coefficient between plant height and root weight was 0.979, and the regression model was obtained as $Y = 0.5211 \times e^{0.0806X}$, where Y is root weight and X is shoot length ($R^2 = 0.9947$). Total saponin content was the highest in 'healthy'.

Conclusions: Freezing stress in the early stage of ginseng had significant effect on root growth according to the remaining leaf area. We assume that these results will help evaluating the damage caused by freezing stress.

Key Words: *Panax ginseng* C. A. Meyer, Abnormal Climate Change, Damage Degree, Freezing Damage, Late Spring, Saponin



서 언

기후변화로 인한 이상기상으로 급작스럽게 기온이 내려가거나 고온이 지속되어 농작물 피해가 늘어날 것으로 예측되고 있다 (Lee *et al.*, 2013; Kim *et al.*, 2019). 동결 피해는 순간적으로 빙점 이하로 떨어질 경우 발생할 수 있으며, 건조 스트레스와 유사한 스트레스를 주고 심한 경우 세포막 손상을 일으켜 회복이 불가능하다 (Pearce, 2001; Hopkins and Hüner, 2004; Arias *et al.*, 2015). 지하부는 토양에 묻혀있으므로 직접 영향을 받는 경우는 적지만, 지상부 피해는 광합성량에 영향을 주어 지하부로의 양분 전류량에 영향을 주게 된다 (Mork *et al.*, 1981; Blomme *et al.* 2001; Carles

et al., 2011; Caldwell and O'Hara, 2017).

사과나 배처럼 과수를 생산하는 농작물은 개화기에 동결 피해를 받아 생산성에 치명적인 영향을 주는데, 인삼 (*Panax ginseng* C. A. Meyer)은 주로 출아기에 피해가 발생한다. 인삼은 다년생 작물로서 전년도에 생성된 뇌두로부터 봄에 지상부가 전개되면 추가적인 새로운 지상부의 전개가 일어나지 않는다. 그러므로 한번 손상되면 이후 엽면적 확보가 어려우므로 생육 초기 동결 피해는 막대한 문제를 초래하는데, 2018년도에 주요 저온 피해지역의 통계를 보면 재배면적 1,928 ha 중 211 ha가 피해를 본 것으로 조사되었다 (Park, 1991; RDA, 2018).

3년생 인삼 뿌리는 -5°C에서 24 시간, -10°C에서 5 시간 동

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

¹국립원예특작과학원 인삼특작부 인삼과 연구원 / 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 연구관 / 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.

안 노출되면 동결이 일어나는데 (Lee and Proctor, 1996), 지상부의 동결 피해가 발생하는 온도에 대한 연구는 아직 알려진 바가 없다. Suh 등 (2021)의 연구에서 -4°C 저온저장고에서 16 시간 동안 동결처리를 하였을 때 약 20% 내외의 피해만 발생하였는데, 이보다 더 낮은 온도에서 동결 피해가 발생하거나 다른 환경 조건이 부가되어야 할 것으로 추측된다. 2018년 4월 초에 전라북도 일부 지역에서 발생한 동결 피해의 경우에도 야간 최저 기온이 -4.3°C에서 -4.8°C에 해당하였으므로 인삼의 동결 피해 온도는 -4.0°C 이하일 가능성이 있다 (RDA, 2018). 그러나 북미삼 재배 시 최저 기온이 연속적으로 0°C에서 -3.6°C의 범위로 떨어졌을 때 심각한 동결 피해를 받았다는 보고도 있다 (Schooley and Proctor, 2003).

지형적으로는 산간 지역의 계곡이 형성된 곳에 식재하는 경우 발생하기 쉬우며, 차광막을 내리지 않은 상황에서 출아가 빨라져 동결 피해가 더 크게 발생한다고 보고된 바 있다 (RDA, 2018).

인삼의 농작물재해보상에는 저온에 의한 피해보상이 포함되어 있다. 피해 보상을 하기 위해서는 피해기준 산정이 중요한데 아직 동결 피해로 인한 피해 손실 추정에 참고할 수 있는 자료가 부족한 형편이다. 이에 본 연구는 인삼의 지상부에 인위적으로 동결처리를 하고 지상부의 잔존 면적에 따른 지하부의 생육과 사포닌 함량을 조사하였다. 또한 지상부 피해 정도와 지하부 생육 간에 높은 상관성을 발견하였기에, 저온 피해 평가에 도움이 되도록 그 결과를 보고하고자 한다.

재료 및 방법

1. 2년생 인삼의 조기출아 유도 및 동결 처리

1년생 재래종 묘삼 (*P. ginseng* C. A. Meyer)을 2019년 겨울에 농가에서 구입하여 2°C에 저장한 후 2월 초, 평균 무게 1.1 g 묘삼에 gibberlic acid₃ (GA₃, KisanBio, Seoul,

Korea) 50 ppm을 30 분간 처리하고 수돗물로 씻어 조기 출아를 유도하였다 (Kim *et al.*, 2015).

사각 화분 (51 cm × 33 cm × 20 cm)에 인삼 전용 상토 (Hwanggpuri, Nongkyung, Jincheon, Korea)를 담고 묘삼을 4 행 × 6 열로 이식하였다. 대조구는 3 반복으로 하였으며, 저온처리구의 경우 피해율이 높지 않을 경우를 대비하여 5 반복을 조성하였다. 기상을 예측하기 어려우므로 1 주 간격으로 2 차례 시험구를 조성하였고 차광막이 씌어진 환경조절온실에서 재배하여 기상청 일기예보에 따라 2월 22일 (1 차)과 2월 23일 (2 차) 오후 6시에 각각 1 회씩 온실 밖에 내놓아 외기 저온에 16 시간 노출시켰다. 온도데이터로거 (EasyLog, Lascar, Hong Kong)로 식물체 주변의 외기 온도를 측정하였고, 대조구는 저온처리를 하지 않았다.

저온처리 시 인삼은 출아가 막 일어난 인삼과 앞전개가 상당히 진행된 것들이 혼재하였는데, 2월 22일 처리구는 먼저 재식한 시험구를 사용하여 앞전개가 많이 진행된 것들이 주를 이루었고, 이때 최저 기온은 오전 7 시, -4.5°C였으며, 2월 23일 처리구는 1 주 후에 재식한 시험구를 사용하여 앞전개가 완료되지 않은 것들이 주를 이루었는데 이때 최저 기온은 오전 7 시, -3.6°C였다 (Fig. 1A). 시험 기간 동안 (2월 - 6월) 온실 내 평균온도는 18.6°C에서 22.7°C까지의 범위를 나타내었다.

2. 3년생 인삼의 동결 처리

3년생 인삼에 대한 동결처리는 4월 초 출아가 시작된 충청북도 음성군에 설치된 흑청-4중직 차광막해가림 시설에서 4월 15일과 4월 22일에 하였다. 동결처리 시 시험구 인삼 생육은 갓 출아한 인삼과 앞전개 인삼이 혼재되어 있었고, 4월 15일은 주로 갓 출아한 인삼을, 4월 22일 처리구는 주로 앞전개가 많이 일어난 인삼들을 동결처리하였다. 동결처리는 동결 물질을 앞에 직접 접촉시키거나 드라이아이스로부터 나오는 냉기

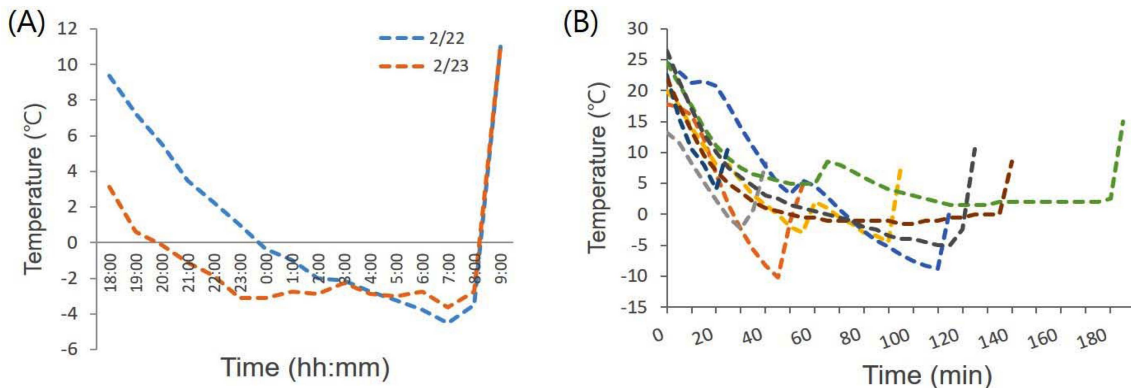


Fig. 1. Air temperature at the outside during freezing treatment on the 2-year-old ginseng at 22 and 23 of February during overnight (A), and air temperature in the container during freezing treatment on 3-year-old ginseng using cold-airflow from dry ice (B). The temperature of 8 times independent trial were overlapped.

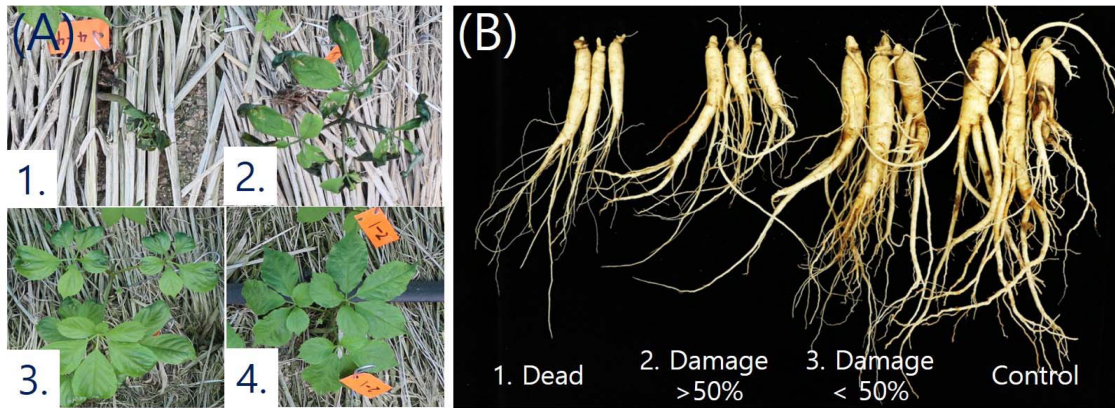


Fig. 2. Growth of 3 year-old ginseng after freezing treatment by ice-contact. (A) shoots after 1 weeks of freezing treatment, and (B) roots after 4 months of freezing treatment. Numbers in the pictures are the damage degree. 1; Dead, 2; damage > 50%, 3; damage < 50%, 4; control.

에 노출시키는 방법을 사용하였다.

접촉 방법은 드라이아이스 조각이나 지퍼백에 담은 20% 소금물을 냉동시켜 직접 식물체에 접촉시켰으며, 갓 출아한 싹 전체를 열리거나 전개된 인삼 잎을 접촉 면적을 달리하면서 2분에서 10분간 접촉시켜 피해 면적을 조절하였다. 냉기 처리는 구멍이 일정하게 뚫린 농산물 상자 (51 cm × 33 cm × 20 cm)를 인삼 위에 뒤집어 씌우고 7 kg - 8 kg의 드라이아이스를 위에 올려 드라이아이스로부터 나오는 냉기가 흘러내리도록 하였으며 냉기를 유지하기 위해 상자를 비닐로 덮고 보온 부직포를 다시 덮어주었다.

냉기를 이용한 방법은 최저온도가 -10.3°C에서 4.0°C의 범위로 처리마다 달라서 온도를 조절하기 어려웠고 (Fig. 1B), 동결 물질을 직접적으로 접촉시키는 방법은 피해 면적을 조절하기가 더 용이하였으나 잎 전개가 되지 않은 굵은 지상부는 동결처리에 더 많은 시간이 필요하였다. 주변 온도의 변화나 인삼 지상부의 크기 차이로 일관된 동결처리가 되지 않아서 처리 방법에 상관없이 피해도에 따라 결과를 판정하였다.

3. 피해도 (damage degree) 및 피해율 (damage rate) 조사

동결처리를 수행하고 30 일이 경과한 후에 지상부의 손상 정도를 육안으로 관찰하여 피해도를 결정하였는데, 피해가 심한 순으로 ‘고사’ (dead), ‘50% 이상 피해’ (damage > 50%), ‘50% 미만 피해’ (damage < 50%), ‘양호’ (healthy)로 판정하였다 (Fig. 2).

양호구는 저온에 노출되었으나 뚜렷한 피해가 없는 개체들이었고, 저온처리를 하지 않은 대조구를 따로 조사하였다. 피해율은 고사와 50% 이상 피해, 50% 미만 피해구를 합한 개체 수를 전체 동결처리 개체 수로 나누어 조사하였다.

4. 생육 조사

2년생 인삼은 4월에 지상부의 초장과 엽장, 엽록소 함량을 조사하였으며 6월 말에 수확하여 지하부 근장, 근경, 근중을 조사하였다. 지근 등 2 차근 (secondary root)의 수는 농업과 학기술 연구조사분석기준 (RDA, 2012)에 준하였다. 세근발달은 육안으로 판단하여 전혀 없으면 0, 많으면 3으로 정하여 0, 1, 2, 3의 4 등급으로 등급을 정하였다 (Fig. 3). 3년생 인삼은 6월에 지상부의 생육을 조사하였으며, 잦은 강우로 인해 점무늬병 피해가 심각하여 8월 말에 수확하여 지하부 생육을 조사하였다.

초장은 지표부터 잎의 가장 긴 길이를, 경장은 지표부터 엽병이 발생한 곳까지, 엽장은 가장 큰 소엽의 소엽병장부터 말단까지의 길이를 측정하였다. 근장은 너두 밑부터 뿌리의 가장 긴 길이를, 근경은 가장 두꺼운 부위를 측정하였다. 엽록소 함량은 엽색계 (SPAD-502Plus, Konica Minolta Inc., Tokyo, Japan)를 이용하여 조사하였다.

5. 진세노이드 함량분석

인삼 뿌리의 진세노사이드 분석은 Re, Rg1, Rf, Rb1, Rg2, Rh1, Rc, Rb2, Rb3, Rd을 조사하였으며, 표준품은 ChromaDex (Irvine, CA, USA)사의 제품을 사용하였다.

진세노사이드 분석을 위해 인삼 분말 시료 0.2 g에 70% MeOH 2 ml를 첨가하고 잘 혼합한 후 50°C에서 30분 동안 초음파로 추출한 뒤 4°C, 13,000 rpm에서 15분간 원심분리하여 얻은 상등액을 2 ml tube에 취한 다음 1 ml를 Sep-Pak C18 cartridge를 이용하여 정제한 후 추출액을 0.45 μm membrane filter로 여과하여 분석시료로 사용하였다 (Kim *et al.*, 2010).

진세노사이드 함량은 Nexera X2 UPLC system (Shimadzu, Kyoto, Japan)을 이용하여 측정하였는데 이동상의 유속은 0.5



Fig. 3. Degree of fine root development in ginseng root. 0; None, 1; little, 2; some, 3; plenty. The pictures of the 2-year-old ginseng are presented because it shows a clear difference in fine root development than 3-year-old ginseng.

ml/min - 0.8 ml/min, 칼럼 온도는 50°C, UV 검출기의 파장은 203 nm로 하였으며 분석을 위한 column은 Halo RP-amide column (4.6 mm × 150 mm, 2.7 μm, Thermo Fisher Scientific Inc., Wilmington DC, USA)을 사용하였다 (Yu *et al.*, 2018).

6. 상관분석 및 통계처리

동결 피해 별 생육 특성은 ANOVA 분석과 DMRT (Duncan's Multiple Range Test)을 이용하여 5% 수준에서 유의성을 검정하였으며 ($p < 0.05$), 생육 요소 간 상관관계는 Pearson's 다변량 상관관계분석을 이용하였다. 통계분석은 SAS Enterprise Guide v7.13 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)을 이용하였다. 생육 요소 간 회귀 분석은 Sigmaplot 프로그램 (SigmaPlot 12.5, Systat Software Inc., San Jose, CA, USA)을 이용하여 단순 선형 함수 (simple linear regression)와 지수 함수 (exponential growth regression)로 분석하였다. 상관관계에서 고사구는 지상부 정보가 없으므로 분석에서 제외하였다.

결과 및 고찰

1. 조기출아 2년생 인삼의 동결 피해

동결 1 차 처리구는 피해율이 73.1%로 고사구가 제일 많았고, 2 차 처리구는 피해율이 41.1%였으며 대부분 피해가 약하게 발생하였다. 2 차 처리 시 영하로 지속된 시간은 길었지만

1 차 처리 때 최저 기온이 더 낮았으므로 1 차 시험에서 피해가 더 크게 발생한 것으로 사료된다.

피해 면적이 큰 경우 엽장만이 아니라 초장과 경장도 감소하였는데, 엽록소 함량 (SPAD)은 반대로 증가하였다. 피해도가 증가할수록 지하부 생육도 감소하였는데 고사구, 50% 이상 피해구, 50% 미만 피해구의 근중은 대조구 대비 각각 35.2%, 41.1%, 61.9%로 확인되었다. 양호구와 대조구의 생육 차이는 지상부와 지하부 모두 미비하였는데, 양호구의 근중은 대조구 대비 94.5%를 나타내었다 (Table 1).

2. 직접 접촉에 따른 3년생 인삼의 동결 피해

동결 물질 직접 접촉 시험구는 고사구와 50% 이상 피해구는 초장과 경장이 대조구와 비교해 확연히 작았지만, 50% 미만 피해구는 대조구와 큰 차이가 없었다. 이는 동결 처리를 앞 뒤주로 하게 되어 초장에 영향을 덜 주었기 때문으로 생각된다 (Table 2).

SPAD는 피해도가 증가할수록 유의하게 증가하였다 ($p < 0.05$). 50% 미만 피해구의 근장도 대조구와 차이가 없었지만 근경과 근중은 피해도가 클수록 감소하였다 ($p < 0.05$). 근중은 피해도에 비례하여 고사구와 50% 이상 피해구, 50% 미만 피해구의 근중은 대조구와 비교하여 각각 21.3%, 37.6%, 그리고 82.2%를 나타내었다 (Fig. 2B).

3. 냉기에 의한 3년생 인삼의 동결 피해

냉기를 이용한 동결처리는 8 번의 반복처리 과정 중 온도를

Table 1. Growth properties of 2-year-old ginseng after freezing treatment.

Damage degree	Plant length (cm)	Stem length (cm)	Leaf length (cm)	SPAD	Root length (cm)	Root diameter (mm)	Root weight (g)
Dead	nd ¹⁾	nd	nd	nd	9.8±0.5 ^d	4.6±0.1 ^c	0.69±0.02 ^d
> 50%	8.4±0.6 ^c	2.9±0.2 ^c	3.4±0.3 ^c	24.4±1.9 ^{ab}	13.9±0.7 ^c	4.8±0.1 ^c	0.80±0.04 ^c
< 50%	12.0±0.8 ^b	4.5±0.5 ^b	4.5±0.2 ^b	24.7±1.0 ^a	16.1±1.4 ^b	5.2±0.2 ^b	1.21±0.08 ^b
Healthy	16.6±0.5 ^a	6.8±0.2 ^a	5.8±0.2 ^a	21.3±0.6 ^b	19.0±0.6 ^a	6.2±0.2 ^a	1.84±0.07 ^a
Control	17.6±0.3 ^a	7.2±0.2 ^a	5.8±0.1 ^a	22.6±0.5 ^{ab}	18.6±0.6 ^a	6.2±0.1 ^a	1.95±0.06 ^a

¹⁾nd; not determined for the death. Data are means of ± SE (n = 12 – 30). *Means within a column followed by the same letters are not significantly different based on Duncan's Multiple Range Test (DMRT, p < 0.05).

Table 2. Growth properties of 3-year-old ginseng after 4 months of freezing treatment by ice contact.

Damage degree	Plant length (cm)	Stem length (cm)	Leaf length (cm)	SPAD	Root length (cm)	Root diameter (mm)	Root weight (g)
Dead	nd ¹⁾	nd	nd	nd	16.1±0.7 ^c	8.7±0.2 ^d	3.1±0.2 ^d
> 50%	28.9±1.3 ^b	14.2±0.7 ^b	9.3±0.6 ^b	34.7±0.6 ^a	18.5±0.7 ^b	10.5±0.4 ^c	5.4±0.6 ^c
< 50%	39.3±0.9 ^a	19.5±0.7 ^a	12.7±0.3 ^a	32.2±0.5 ^b	24.0±0.6 ^a	14.2±0.3 ^b	11.8±0.5 ^b
Control	40.7±1.2 ^a	20.2±0.9 ^a	13.2±0.4 ^a	31.5±0.6 ^b	23.7±1.0 ^a	16.1±0.5 ^a	14.3±0.9 ^a

¹⁾nd; not determined for the death. Data are means of ± SE (n = 27 – 45). *Means within a column followed by the same letters are not significantly different based on Duncan's Multiple Range Test (DMRT, p < 0.05).

Table 3. Growth properties of 3-year-old ginseng after 4 months of freezing treatment by cold-airflow from dry ice.

Damage degree	Plant length (cm)	Stem length (cm)	Leaf length (cm)	SPAD	Root length (cm)	Root diameter (mm)	Root weight (g)
Dead	nd ¹⁾	nd	nd	nd	16.4±0.7 ^c	8.4±0.2 ^c	3.0±0.1 ^c
> 50%	25.2±1.7 ^c	14.1±1.4 ^c	6.4±0.6 ^c	35.5±1.9 ^a	20.5±1.3 ^{bc}	9.2±0.6 ^c	4.2±0.9 ^c
< 50%	34.2±1.4 ^b	17.1±1.0 ^b	11.0±0.6 ^b	33.4±1.3 ^{ab}	19.5±1.3 ^{ab}	12.3±0.6 ^b	8.0±1.0 ^b
Healthy	38.5±1.1 ^{ab}	19.1±0.7 ^{ab}	12.3±0.3 ^{ab}	32.0±0.6 ^b	23.0±0.8 ^a	13.9±0.4 ^a	11.9±0.8 ^a
Control	39.6±1.1 ^a	20.1±0.6 ^a	12.9±0.3 ^a	28.9±0.5 ^c	22.8±0.7 ^{ab}	14.4±0.3 ^a	12.6±0.6 ^a

¹⁾nd; not determined for the death. Data are means of ± SE (n = 6 – 40). *Means within a column followed by the same letters are not significantly different based on Duncan's Multiple Range Test (DMRT, p < 0.05).

일정하게 처리하기 어려웠으므로 처리 별로 전부 조사하거나 반대로 전부 양호한 경우가 많았고 50% 미만이나 50% 이상 피해구는 적게 발생하였다 (Table 3).

동결처리 후 피해도가 클수록 초장과 경장도 작아지고, SPAD는 증가하였는데, 양호구는 초장, 경장, 엽장이 대조구와 큰 차이가 없었지만 SPAD는 증가하였다. 지하부의 생육은 피해도에 비례하여 감소하였는데, 고사구와 50% 이상 피해구, 50% 미만 피해구, 양호구의 근중은 대조구와 비교하여 각각 24.3%, 33.8%, 63.3%, 그리고 94.8%였다. 2차근들의 발달 역시 지상부 상태에 영향을 받았는데, 측근 (side root)과 수근 (stolon)수는 50% 미만 피해구와 50% 이상 피해구 사이에 차이가 뚜렷하였다 (p < 0.05) (Table 4).

4. 동결 피해 인삼의 지하부 사포닌 함량

사포닌 함량을 냉기 처리 실험구의 인삼 뿌리에서 조사하였다. 총사포닌 함량은 양호구가 건물중 기준 2.31%로 가장 높았으며, 다음으로 대조구, 고사구, 50% 이상 피해구와 50%

Table 4. Effects of freezing stress on the development of root system of ginseng.

Damage degree	Number of secondary roots			Fine root (0 - 3) ¹⁾
	Lateral root	Side root	Stolon	
Dead	1.7±0.1 ^b	1.6±0.3 ^{bc}	0.1±0.1 ^b	1.9±0.2 ^b
> 50%	1.8±0.4 ^{ab}	1.3±0.5 ^c	0.2±0.2 ^b	2.3±0.2 ^{ab}
< 50%	2.1±0.1 ^a	3.1±0.3 ^{ab}	1.5±0.2 ^a	2.8±0.1 ^a
Healthy	2.1±0.1 ^a	3.5±0.4 ^a	0.9±0.1 ^a	2.7±0.1 ^a
Control	2.0±0.1 ^{ab}	4.1±0.4 ^a	1.3±0.1 ^a	2.6±0.1 ^a

¹⁾Fine root; development of fine roots was scored from 0 (none) to 3 (plenty). Freezing stress was applied using cold-airflow from the dry ice. *Means within a column followed by the same letters are not significantly different based on Duncan's Multiple Range Test (DMRT, p < 0.05).

미만 피해구 순으로 각각 2.05%, 1.81%, 1.40%, 1.38%였다 (Table 5).

성분 별로는 RB1, Rc, Rb2, Rb3, Rd, Rg1, Rh1가 양호

Table 5. Ginsenoside composition in the roots of freeze-damaged 3-year-old ginseng. Freezing stress was applied using cold-airflow from the dry ice.

Damage rate	Total ¹⁾	Panaxadiol (PD)					Panaxatriol (PT)					PD/PT ²⁾
		Rb1	Rc	Rb2	Rb3	Rd	Re	Rg1	Rf	Rg2	Rh1	
(mg/g dry weight)												
1. Dead	18.1±0.9 ^c	3.69±0.26 ^b	2.41±0.17 ^b	2.26±0.14 ^{bc}	0.34±0.02 ^b	0.61±0.03 ^d	5.13±0.20 ^a	2.48±0.13 ^{bc}	0.52±0.04 ^c	0.67±0.05 ^a	0.03±0.00 ^b	1.05±0.05 ^b
2. > 50%	13.8±1.0 ^d	2.58±0.22 ^c	1.78±0.17 ^c	1.83±0.15 ^d	0.28±0.02 ^c	0.72±0.07 ^d	3.60±0.28 ^b	2.09±0.20 ^c	0.43±0.04 ^c	0.47±0.04 ^b	0.02±0.00 ^c	1.09±0.04 ^b
3. < 50%	14.5±1.1 ^d	2.76±0.27 ^c	1.91±0.17 ^c	2.03±0.17 ^{cd}	0.29±0.03 ^c	1.00±0.08 ^c	2.59±0.15 ^c	2.60±0.20 ^b	0.92±0.06 ^b	0.34±0.03 ^c	0.02±0.00 ^c	1.23±0.03 ^a
4. Healthy	23.1±0.9 ^a	4.57±0.30 ^a	3.04±0.20 ^a	3.18±0.20 ^a	0.42±0.02 ^a	1.74±0.10 ^a	3.74±0.18 ^b	4.79±0.17 ^a	1.09±0.10 ^a	0.48±0.04 ^b	0.07±0.01 ^a	1.27±0.10 ^a
Control	20.5±0.3 ^b	3.78±0.11 ^b	2.50±0.06 ^b	2.33±0.04 ^b	0.30±0.01 ^c	1.21±0.04 ^b	3.95±0.19 ^b	4.85±0.37 ^a	1.13±0.04 ^a	0.43±0.00 ^b	0.03±0.00 ^b	0.98±0.07 ^b

¹⁾Total; the sum off 10 kinds of ginsenoside presented in table, ²⁾PD/PT; ratio of PD and PT. Data are means ± SD obtained from three analytical repetition. Means within a column followed by the same letters are not significantly different based on Duncan's Multiple Range Test (DMRT, $p < 0.05$).

Table 6. Correlation coefficients between growth characteristics of freeze-damaged 3-year-old ginseng. Means of dead samples were excluded because shoot data were missing.

Trait	PH ¹⁾	SL ²⁾	LL ³⁾	SPAD	RL ⁴⁾	RD ⁵⁾	RW ⁶⁾
PH	1	0.984 ^{***}	0.985 ^{***}	-0.866 [*]	0.804 [*]	0.979 ^{***}	0.979 ^{***}
SL		1	0.943 [*]	-0.891 [*]	0.867 [*]	0.969 ^{***}	0.983 ^{***}
LL			1	-0.849 [*]	0.703	0.958 ^{***}	0.942 ^{**}
SPAD				1	-0.684	-0.832 [*]	-0.860 [*]
RL					1	0.900 ^{***}	0.921 ^{***}
RD						1	0.994 ^{***}
FRW							1

¹⁾PH; plant height, ²⁾SL; shoot length, ³⁾LL; leaf length, ⁴⁾RL; root length, ⁵⁾RD; root diameter, ⁶⁾RW; root weight. Correlation was analyzed by SAS Enterprise Guide v7.13 and are significant at ^{*} $p < 0.05$, ^{**} $p < 0.01$ and ^{***} $p < 0.001$, respectively.

구에서 가장 높았으며, Re와 Rg2는 고사구에서 가장 높았다. Panaxadiol과 panaxatriol의 비율 (PD/PT)은 양호구와 50% 이상 피해구가 각각 1.27과 1.23으로 panaxadiol 계통이 더 높았으며, 고사구, 50% 이상 피해구, 대조구가 각각 1.05, 1.09, 0.98로 서로 비슷하였다.

인삼은 부위별, 연근별, 재배법, 수확시기, 재배환경 등에 따라 사포닌 함량에 차이가 있다. 몸통인 동체보다는 세근의 사포닌 함량이 높고, 주근과 지근의 PD/PT가 높다 (Lee *et al.*, 1978; Eo *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2019).

또한 저온 처리에 의해 사포닌 함량 및 사포닌 합성에 필요한 유전자 발현도 증가하는 것으로 알려져 있다 (Oh *et al.*, 2014; Jiang *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2021).

본 연구에서는 양호구가 사포닌 함량이 가장 높았는데 저온의 영향으로 사포닌 합성이 증가하였을 것으로 추측된다. 반면 50% 미만 피해구나 50% 이상 피해구는 엽면적 감소에 따른 광합성 산물의 감소가 사포닌 축적에 불리하였을 것이며, 지근 및 세근의 감소가 사포닌 축적에 부정적인 영향을 주었을 것으로 추측된다.

5. 지상부 생육과 지하부 생육의 상관관계

피해 면적이 클수록 지상부와 지하부 생육이 모두 감소하였

으므로 이들간의 상관관계를 조사하였는데 초장, 경장, 엽장은 근경에 대해 ≥ 0.96 의 상관관계를, 근중에 대해서는 ≥ 0.95 의 상관관계를 보였다 ($p < 0.01$).

근장은 초장과 경장에 대해 상관계수가 각각 0.804, 0.867를 나타내었는데 ($p < 0.05$) 엽장에 대해서는 상관도가 더 낮았다. 엽록소 함량 (SPAD)은 지상부 생육과 지하부 생육 모두에 대해 부의 상관관계가 인정되었다 ($p < 0.05$) (Table 6).

Table 6과 같이 인삼의 경우 생육 요소간에 상관관계가 높은 것은 매우 이례적인 결과라고 생각된다. 정상적으로 생육한 인삼의 초장과 근중간에는 일정 정도의 상관관계가 형성지만 아주 높지 않은데, 예를 들면 Kim 등 (2012)의 연구에서 초장, 경장, 엽장과 근중간에는 상관계수가 각각 0.45, 0.54, 0.48이었다. 그러나 토양 건조 환경에서 지상부와 지하부 생육이 저하된 상태에서는 경장 또는 엽장과 근중간에는 상관계수가 각각 0.708 또는 0.907로 상관관계가 좀 더 높게 형성되었다 (Mork *et al.*, 1981). 이는 스트레스 하에서 생육이 제한될 때 지상부 생육과 지하부 생육 간에 더 높은 상관관계가 형성되기 때문으로 보인다.

동결 피해에 따른 지상부 생육 요소로부터 근중을 예측하기 위한 회귀식을 산출하였을 때, 단순 선형 방식보다는 지수형 방식이, 그리고 생육 요소 중에는 초장이 근중 예측에 가장

Table 7. Regression equation of root weight extracted from aerial growth characteristics.

Trait	Linear			Power		
	Equation	R ²	p	Equation	R ²	p
PH ¹⁾	Y = 0.630X-12.403	0.9575	0.0001	Y = 0.521×e ^{0.081X}	0.9900	<0.0001
SL ²⁾	Y = 1.420X-15.467	0.9663	<0.0001	Y = 0.437×e ^{0.170X}	0.9755	<0.0001
LL ³⁾	Y = 1.478X-6.697	0.8881	0.0015	Y = 0.780×e ^{0.215X}	0.9688	<0.0001

¹⁾PH; plant height, ²⁾SL; shoot length, ³⁾LL; leaf length

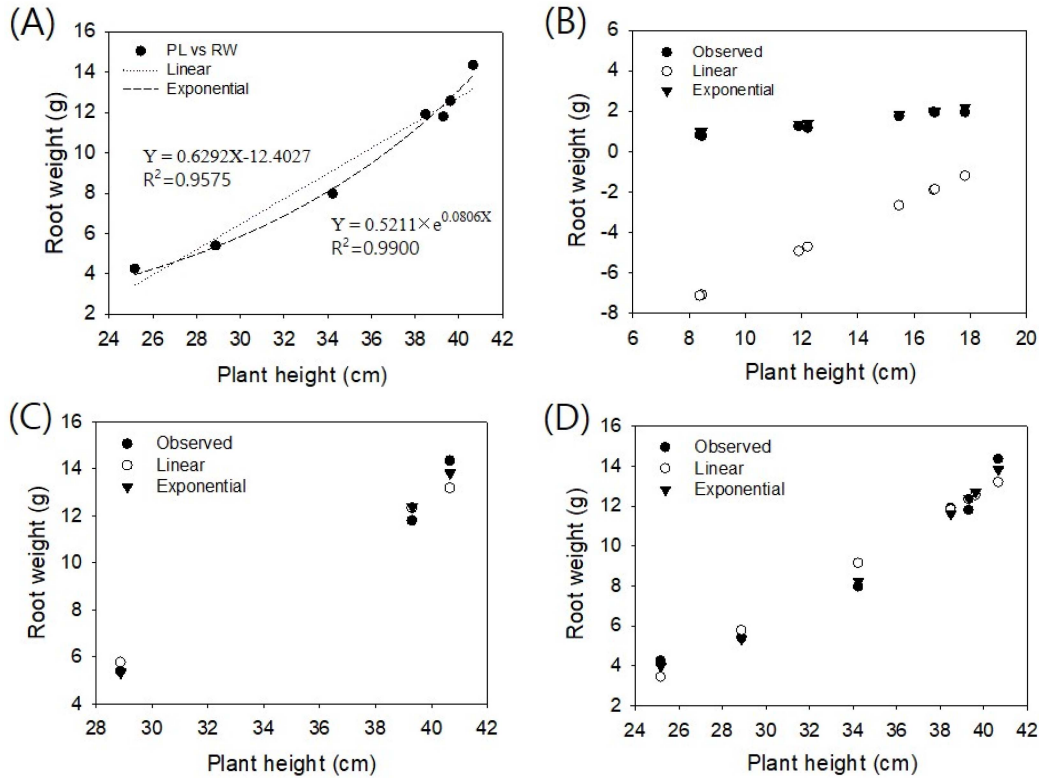


Fig. 4. Relation between plant height and root weight. (A) Regression model of 3 year-old ginseng that treated freezing stress by cold-airstream using simple linear regression or exponential regression. Observed vs estimated value of root weight ($= 0.5211 \times e^{0.0806X}$), where X is plant height. Observed data were used from the Table 2 (B), 3 (C), 4 (D).

적합하였다 (Table 7 and Fig. 4A). 즉 근중은 초장으로부터 $0.5211 \times e^{0.0806 \times \text{초장}}$ 의 함수로써 매우 높은 예측 가능성을 보였다 ($R^2 = 0.9900$, $p < 0.0001$).

회귀 모델식의 정확성을 평가하기 위해 Table 2, Table 3, Table 4의 초장을 위의 성장형 회귀모델에 대입하여 근중의 예측치와 실측치를 비교하여 보았다. Table 2의 2년생의 경우 단순 선형모델의 RMSE (Root Mean Square Error)는 5.656로 오차가 컸으나 성장형 모델에서는 0.177로 오차가 크지 않고 예측이 잘 이루어짐을 보여주었다 (Fig. 4B). 단순 선형모델과 성장형 회귀모델에의 정확성을 비교하면 동결 처리를 한 3년생 인삼의 경우는 RMSE는 각각 0.768와 0.459이었으며, 냉기 처리를 한 3년생의 RMSE는 각각 0.741과 0.359로 성

장형 모델이 오차범위가 더 작았다 (Fig. 4C and 4D).

2년생은 3년생과 재배 방식이나 환경에서 많은 차이가 있었지만, 지수형 회귀 모델을 통한 근중의 예측은 상당히 정확하였다. 반면 선형 회귀 모델은 절대값에서도 큰 차이가 있었지만 기울기에 있어서도 많은 차이가 있어 2년생에 대한 예측에는 적합하지 않았다. 즉 보완이 필요하겠지만 Table 7의 지수형 회귀 모델을 통해 서로 다른 재배지에서의 피해 예측이 가능할 것임을 제시한다.

인삼은 제한성장을 하므로 생육 초기에 발생한 지상부의 피해는 지하부 생육에도 큰 영향을 준다 (Proctor, 2008). 늦은 봄 발생한 동결 피해는 잎 등 지상부에 직접적인 피해를 주지만, 이후 지하부의 생육에 어느 정도의 손실을 주는지에 대한

연구사례는 없었다.

본 연구 결과는 생육초기 발생한 지상부의 손상은 지하부의 생육에 크게 영향을 주어 생산량에도 지대한 영향을 주고 있음을 보여주었다. 또한 측정된 지상부의 생육 요소와 지하부 생육의 상관성을 회귀모델로 제시하여, 지상부 피해로부터 지하부 손실을 예측할 수 있음을 보여주었다.

인삼은 가을에 근비대가 본격적으로 일어나고, 다년생 작물로서 최종 수확에 미치는 영향에 대한 정보 수집이 필요하지만, 본 연구결과가 지상부 피해도를 바탕으로 동결 피해에 대한 손실보장을 산정하는데 필요한 정보를 제공할 수 있기를 기대하는 바이다.

감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 연구사업(과제번호: PJ01482001)과 2022년도 농촌진흥청 국립원예특작과학원 전문연구원 과정 지원 사업에 의해 이루어진 결과로 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- 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.
- Blomme G, Swennen RL, Tenkouano A, Ortiz R and Vuylsteke DR. (2001). Estimation of root development from shoot traits in plantain and banana(*Musa* spp.). *Infomusa*. 10:15-17.
- Caldwell BT and O'Hara KL. (2017). Correlation of leaf area index to root biomass in *Populus tremuloides Michx* supports the pipe model theory. *Journal of Biodiversity Management and Forestry*. 6:4. https://www.scitechnol.com/peer-review/correlation-of-leaf-area-index-to-root-biomass-in-populus-tremuloides-michx-supports-the-pipe-model-theory-4p8x.php?article_id=7073 (cited by 2022 Jan 13).
- Carles S, Lamhamedi MS, Stowe DC, Bernier PY, Veilleux L and Margolis HA. (2011). Relationships between frost hardiness, root growth potential, and photosynthesis of nursery-grown white spruce seedlings. *Annals of Forest Science*. 68:1303-1313.
- Chen K, Liu J, Ji R, Chen T, Zhou X, Yang J, Tong Y, Jiang C, Zhou J, Zhao Y, Jin Y, Yuan Y and Huang L. (2019). Biogenic synthesis and spatial distribution of endogenous phytohormones and ginsenosides provide insights on their intrinsic relevance in *Panax ginseng*. *Front in Plant Science*. 9:1951. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2018.01951/full> (cited by 2022 Jan 13).
- Eo J, Mo HS and Park KC. (2018). Abiotic factors influencing growth and ginsenoside content of *Panax ginseng* roots. *Horticultural Science and Technology*. 36:681-690.
- Hopkins WG and Hüner NP. (2004). *Introduction to Plant Physiology*. John Wiley and Sons Inc. Hoboken, NJ, USA. p.467-476.
- Jiang M, Liu J, Quan X, Quan L and Wu S. (2016). Different chilling stresses stimulated the accumulation of different types of ginsenosides in *Panax ginseng* cells. *Acta Physiologiae Plantarum*. 38:210. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11738-016-2210-y> (cited by 2022 Jan 18).
- Kim DH, Kim YC, Bang KH, Kim JU, Lee JW, Cho IH, Kim YB, Son SW, Park JB and Kim KH. (2015). Effects of GA₃ and alternating temperature on breaking bud dormancy of *Panax ginseng* C. A. Meyer seedling. *Korean Journal of Medicinal Crop Science*. 23:379-384.
- Kim GS, Hyun DY, Kim YO, Lee SE, Kwon H, Cha SW, Park CB and Kim YB. (2010). Investigation of ginsenosides in different parts of *Panax ginseng* cultured by hydroponics. *Korean Journal of Horticultural Science and Technology*. 28: 216-226.
- Kim JH, Kim DJ, Kim SO, Yun EJ, Ju O, Park JS and Shin YS. (2019). Estimation of freeze damage risk according to developmental stage of fruit flower buds in spring. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*. 21:55-64.
- Kim YC. (2012). Classification of the morphological characteristics of ginseng(*Panax ginseng* C. A. Meyer) germplasm and selection of useful resources. Ph.D. Thesis. Chungnam National University. Daejeon, Korea. p.1-122.
- Lee CH, Nam KY and Choi KJ. (1978). Relationship between the age and chemical components of ginseng root's portion (*Panax ginseng* C.A.Meyer). *Korean Journal of Food Science and Technology*. 10:263-268.
- Lee JC and Proctor JTA. (1996). Low temperature tolerance of *Panax quinquefolium*. *Korean Journal of Ginseng Science*. 20:179-183.
- Lee SG, Choi CS, Choi JM, Lee HJ, Park SY, and Do KR. (2013). Effects of growth and cellular tissue under abnormal climate condition in chinese cabbage. *Protected Horticulture and Plant Factory*. 22:87-90.
- Mork SK, Son SY and Park H. (1981). Root and top growth of *Panax ginseng* at various soil moisture regime. *Korean Journal of Crop Science*. 26:115-120.
- Oh JY, Kim YJ, Jang MG, Joo SC, Kwon WS, Kim SY, Jung SK and Yang DC. (2014). Investigation of ginsenosides in different tissues after elicitor treatment in *Panax ginseng*. *Journal of Ginseng Research*. 38:270-277.
- 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.
- Proctor JTA. (2008). Source-sink relations in North American ginseng seedlings as influenced by leaflet removal. *Journal of Ginseng Research*. 32:337-340.
- Rural Development Administration(RDA). (2012). Research criteria for agricultural science and technology research criteria. Rural Development Administration, Suwon, Korea. p.759-770.
- 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.
- Schooley J and Proctor JTA. (2003). Freeze damage to North American ginseng. *HortTechnology*. 13:697-701.
- Suh SJ, Kim YC, Moon JW, Kwon RY, Jang IB and Jang IB.

- (2021). Effects of cold temperature and relative humidity on the freezing stress of two year-old ginseng seedlings. Korean Journal of Medicinal Crop Science. 29:174-200.
- Yu J, Suh SJ, Jang IB, Jang IB, Moon JW, Kwon KB and Lee SW.** (2018). Influence of sodium concentrations on growth, physiological disorder symptoms, and bed soil chemical properties of 2-year-old ginseng. Korean Journal of Medicinal Crop Science. 26:240-247.
- Zhang T, Chen C, Chne Y, Zhang Q, Li Q and Qi W.** (2021). Changes in the leaf physiological characteristics and tissue-specific distribution of ginsenosides in *Panax ginseng* during flowering stage under cold stress. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. 9:103. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbioe.2021.637324/full> (cited by 2022 Jan 18).