



침수 시간과 침수 수위가 인삼 생육 및 광합성 특성에 미치는 영향

서수정¹ · 문지원² · 장인복³ · 김영창⁴ · 김동휘⁵ · 유진^{6*}

Waterlogging Duration and Depth Affect Growth and Photosynthetic Properties of Ginseng

Su Jeoung Suh¹, Ji Won Moon², In Bok Jang³, Young Chang Kim⁴, Dong Hwi Kim⁵ and Jin Yu^{6*}

ABSTRACT

Received: 2021 September 16
1st Revised: 2021 October 6
2nd Revised: 2021 October 25
3rd Revised: 2021 December 1
Accepted: 2021 December 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: Abnormal climate change induces many environmental disasters, including flooding. *Panax ginseng* C. A. Meyer is highly sensitive to waterlogging, but the experimental approaches to understanding the mechanism are relatively scarce.

Methods and Results: Waterlogging was applied to 2-year-old ginseng plant in July under artificial conditions for 1, 2, 3, and 5 days at two different water levels: above the soil surface [WA(+)] and below the rhizome level [WA(-)]. Growth properties and photosynthetic characteristics were measured during waterlogging, and in the recovery period after waterlogging had stopped. Shoot death was evident in ginseng plants that were treated with WA(+) for 5 days. Growth inhibition in root diameter and root weight were severe when waterlogging lasted more than 3 days, and when the water level was above the soil surface. Chlorophyll fluorescences, F_v/F_m , was significantly decreased during the recovery period in WA(+) for 5 days. Photosynthetic rate and stomatal conductance were influenced after waterlogging, depending on waterlogging duration and water levels.

Conclusions: The degree of damage to ginseng upon waterlogging was dependent on the duration and water level. These results will be helpful to understand the waterlogging response of ginseng, and suggest that photosynthetic characteristics can be used as an indicator of damage from waterlogging.

Key Words: *Panax ginseng* C. A. Meyer, Chlorophyll Fluorescence, Environmental Stress, Fine Root, Photosynthetic Rate, Waterlogging

서 언

지구 온난화로 인한 이상기후는 고온, 저온, 가뭄, 침수 등을 빈번하게 일으켜 농업환경에 큰 위해를 가져오고 있다. 다양한 환경 스트레스 중 침수피해는 배수가 불량한 농경지에서 장기간 강우가 지속되거나, 급작스러운 집중호우, 주변 하천지류 등의 범람에 의해 주로 발생한다.

2006년부터 2016년까지 전 세계적으로 발생한 농업 손실 중

2/3는 침수에 의한 것으로, 매년 수십억 달러의 손실이 발생하였다 (FAO, 2017; Fukao *et al.*, 2019). 2020년도에 우리나라는 역대 가장 긴 장마와 집중호우로 33,492 ha가 물에 잠겼고, 연이은 태풍으로 16,780 ha가 침수되었으며 피해 면적은 123,930 ha에 달해 2019년도 74,195 ha보다 피해가 훨씬 크게 발생하였다 (KMA, 2020). 대부분의 작물은 침수에 쉽게 손상을 입으므로 이러한 농경지 침수는 농업 생산성 및 관련 산업에 막대한 피해를 주게 된다.

*Corresponding author: (Phone) +82-43-871-5624 (E-mail) yujin8603@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 주사보 / Researcher, Department of Herbal Crop Research, NIHHS, RDA, Eumseong 27709, Korea.

⁴국립원예특작과학원 인삼특작부 인삼과 연구관 / 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.

침수피해는 생육 단계, 작물 특성, 품종 등에 따라 그 피해도가 다르게 나타난다. 또한 영양생장기보다는 생식생장기에 피해가 더 많이 발생하며, 침수 기간, 수위, 온도, 배수 특성에 따라서도 달라진다 (Gu and Kuk, 1996; Horchani and Aschi-Smiti, 2010; Lee *et al.*, 2010; Putnam *et al.*, 2017; Ploschuk *et al.*, 2018; Kim, 2019).

침수피해의 원인이나 발생 기작에 관해서는 많은 연구가 진행되었는데 침수피해의 주요 원인은 토양 산소 결핍이 원인이 된다 (Kang *et al.*, 2010; Fukao *et al.*, 2019; Kim, 2019; Pan *et al.*, 2021). 산소 부족은 호흡에 지장을 주고, 그 결과 에너지 저장 물질, 즉 ATP 부족으로 생육이 부진하거나 고사하게 된다. 에너지 보급을 위해 해당 과정 (glycolysis), 알콜 발효 (alcohol fermentation), 젖산 발효 (lactic acid fermentation) 등이 응급으로 대응할 수 있지만, 장기적으로는 lactic acid, alcohol, aldehyde 등 유해 물질과 활성산소, 특히 H_2O_2 의 축적으로 노화가 진행되고 고사하게 된다 (Pan *et al.*, 2021). 그 외 토양 산화-환원전위 변화로 인해 발생하는 철과 망간의 환원, 양분 흡수 저하, 독성물질의 합성 등도 원인으로 작용한다고 알려져 있다 (Kang *et al.*, 2010).

인삼 (*Panax ginseng* C. A. Meyer)은 반음지성 식물로 해가림 시설 아래에서 재배되며, 수확하기까지 같은 장소에서 4년 - 6년간 재배된다. 전년도에 형성된 잠아로부터 새순이 형성되어 봄에 출아하는데 이후에 잎이나 화아의 형성은 추가로 이루어지지 않는다. 출아 후 6월 말까지 지상부와 지하부의 길이 생장이 지속되며, 이후 7월 - 8월에는 뿌리의 근 비대가 집중적으로 이루어진다.

토양수분이 인삼의 수량에 미치는 영향은 큰 편으로 인삼이 많이 재배되는 6개 지역에서 조사한 결과 장마 기간인 7월 - 8월 강수량이 평년에 비해 많거나 단기간에 1일 200 mm 이상의 폭우가 있는 해에는 단위당 수량이 많이 감소하나, 50% 내외일 때는 수량이 증가하였다고 한다 (RDA, 2018). 그러므로 7월 - 8월에 주로 발생하는 침수는 인삼의 생육, 수량, 품질에 상당한 영향을 주어 심한 경우 재배를 중단하게 된다.

인삼은 배수와 통기성을 좋게 하도록 두둑을 30 cm 높이가 되게 권장하지만, 실제 농가에서는 그보다 낮은 경우가 많다. 두둑 높이가 높을 경우 침수 가능성이 줄어들 수 있지만, 장마와 폭우로 인해 재배지역이 침수되면 침수피해는 다른 작물보다 더 심각하다. 인삼은 연작장해를 피하기 위해 신규 경작지에서 재배하는데, 최근 들어 신규지 확보가 어려워 논재배 농가가 늘고 있다. 따라서 배수가 불량한 환경에서 재배될 확률도 늘고 있어 침수피해 위험성이 늘고 있다.

침수피해를 최소화하고 이에 대한 대책을 마련하기 위해서는 침수피해 증상을 파악하는 것이 필요하다. 인삼을 단기간 침수 처리하였을 때 엽록소 형광 반응이 감소한다는 것과

(Kim *et al.*, 2015a), 습해 유발조건에서 인삼의 생육에 관한 연구가 진행된 바 있지만 (Kim *et al.*, 2015b), 침수피해에 대한 체계적인 정보는 부족하다. 본 연구는 인공적인 환경에서 2년생 인삼을 이용하여 침수 기간과 침수 수위에 따라 지상부와 지하부의 생육 특성을 조사하고, 잎의 엽록소 함량, 엽록소 형광 반응, 광합성 특성을 조사하여 침수 스트레스 지표로 사용할 수 있는지 검토하였다.

재료 및 방법

1. 실험 재료 및 재배 방법

본 실험은 국립원예특작과학원 인삼특작부에 설치된 비닐하우스에서 2021년에 수행하였다. 비닐하우스에 차광막을 설치하여 광투과율은 10% 내외로 하였다. 묘삼 식재는 4월에 하였으며 침수 처리는 7월에 하였는데, 7월의 평균온도는 $26.3 \pm 4.4^\circ\text{C}$ 였다.

인삼 (*Panax ginseng* C. A. Meyer) 재배를 위한 용토는 원야토 : 피트모스 : 펄라이트를 부피의 비로 7.0 : 2.5 : 0.5의 비율로 혼합하고 축분 퇴비 (Sammani, NongHyup, Seoul, Korea)를 혼합토 100 l 당 0.67 kg 처리하여 제조하였다. 인위적 혼합토는 토양 물리성을 규정하기 어렵지만 분석결과 모래 91.4%, 미사 6.6%, 점토 2.0%로 일반 토양의 사토에 가까웠다. 원형 화분 (상부 외경 33.0 cm, 높이 29.3 cm)에 혼합토를 18 cm 높이로 담은 후 너두가 보이도록 화분당 6개의 재래종 묘삼을 수직으로 식재하고 위로 토양을 2.5 cm 덮었다. 각 처리당 4 반복으로 조성하고 토양수분이 15% - 20% (v/v)이 되게 관리하였다.

토양수분과 전기전도도 (EC)를 정기적으로 조사하였는데 관수로 인해 양분 손실이 발생하였다고 판단하여 6월 이후에는 6.00 mM KNO_3 , 1.50 mM $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, 0.38 mM $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, 0.75 mM KH_2PO_4 , 0.38 mM $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ 로 구성된 양액 (1.2 l/pot)을 1회 처리하였다. 시험 종료 후 토양 이화학성을 분석한 결과는 Table 1과 같다.

2. 침수 처리

침수 시간에 따른 피해도를 비교하기 위해 침수 처리를 0, 1, 2, 3, 5 일간 처리하였다.

5일 처리구부터 먼저 침수시켜 침수 종료일이 같은 날이 되도록 하였다. 고수위 침수 [WA(+)]는 상부 외경 33.7 cm, 높이 33.3 cm 화분에 비닐을 깔고 시험구 화분을 넣어 지하수를 지표 위 2 cm 까지 채웠다. 저수위 침수 [WA(-)]는 내부 크기가 가로 48 cm, 세로 32 cm, 높이 15 cm인 상자에 비닐을 깔고 화분을 2개씩 넣은 후 너두 식재 높이와 화분의 다리 받침의 높이를 계산하여 침수 수위가 너두 2 cm 밑이 되게 하였다. 수위가 낮아지면 물을 보충해주었다. 대조구는 침

Table 1. Soil chemical properties in each treatment after 14 days of drainage.

Treatment	pH (1 : 5)	EC (dS/m)	OM (g/kg)	NO ₃ (mg/kg)	P ₂ O ₅ (mg/kg)	Ex. Cation (cmol ⁺ /kg)				
						K	Mg	Na	Ca	
Control	6.56	0.17	16.7	2.34	72.0	0.07	0.97	0.13	5.18	
WA(+) ¹⁾	1 D	6.34	0.14	16.1	0.07	73.4	0.07	0.97	0.14	5.13
	2 D	6.42	0.15	18.9	0.01	70.0	0.07	0.97	0.13	5.06
	3 D	6.51	0.16	17.3	0.05	73.2	0.07	0.94	0.13	5.01
	5 D	6.37	0.14	21.6	0.39	78.6	0.08	1.00	0.12	5.41
WA(-) ²⁾	1 D	6.37	0.21	17.5	4.72	81.1	0.06	0.9	0.15	4.91
	2 D	6.69	0.16	16.8	4.76	73.6	0.05	0.8	0.13	4.49
	3 D	6.66	0.18	15.6	4.87	89.3	0.06	0.86	0.13	4.72
	5 D	6.71	0.18	19.2	2.84	90.5	0.06	0.91	0.15	4.89

¹⁾WA(+); water level at 2 cm above the ground, ²⁾WA(-); water level at below the rhizome

수처리 하지 않고 배수일에 화분 밑으로 물이 흐를 만큼 관수를 하였다.

3. 생육 조사

침수 후 팽압을 잃고 잎이 시들거나 고사하는 것을 침수피해로 판정하였다. 피해율은 출아수 대비 피해 주수의 백분율로 구하였다. 침수 종료 후 2 주가 지난 후 수확하여 지하부의 근장과 근경, 근중, 잔뿌리의 발달상태, 건조중, 경도를 조사하였다.

근장은 너두부터 잔뿌리를 포함하여 가장 긴 위치를 조사하였고, 근경은 가장 두꺼운 지점의 두께를 조사하였다. 잔뿌리의 발달 상태는 육안으로 판단하여 점수를 부여하였다 (0: 없음 - 3: 많음). 생육 조사는 생존구의 생육에 초점을 두어 지상부가 고사하거나 지하부가 1/2 이상 부패하였으면 조사에서 제외하고, 4 반복 시험구에서 얻은 모든 생존구에 대한 평균을 구하였다 (n = 12 - 24). 건조중은 각 반복구의 시료를 합쳐서 건조중을 구하여 4 반복에 대한 평균을 구하였다. 엽록소 함량은 엽색계 (SPAD-502Plus, Konica Minolta Inc., Tokyo, Japan)를 이용하여 조사하였다. 인삼 뿌리의 조직 경도를 측정하기 위해 너두로부터 10 mm - 15 mm 아래 부분을 식품물성시험기 (TA1, Lloyd, Ametek Inc., Largo, FL, USA)를 이용하여 경도를 측정하였다.

4. 엽록소 형광 반응 및 광합성 특성 조사

엽록소 형광 반응 및 광합성 특성은 침수 처리 전과 배수 후 1 일부터 약 1 주일 간격으로 3 회 조사하였다. 엽록소 형광 반응은 리프클리프 (leaf clip)으로 20 분간 암처리를 한 후 Handy PEA+ (Hansatech Instruments Ltd., King's Lynn, England)을 이용하여 엽록소 형광을 측정하였고 기기에 제공되는 photosystem II의 양자수율 (maximum quantum yield, F_v/F_m)을 조사하였다.

광합성은 주로 오전 10시 - 12시에 가장 큰 소엽에서 조사하였으며 portable photosystem (Li-6800, LI-COR Biosciences, Lincoln, NE, USA)을 이용하여 survey 방식으로 잎을 물린 후 90 초 - 120 초 후에 측정하였다. 광합성 측정 챔버로부터 적 : 청 = 5 : 5 LED 광을 200 μmol·m⁻²·s⁻¹ 조사하였고, 챔버내 온도와 CO₂ 농도는 각각 25°C와 400 μmol·mol⁻¹이었다.

5. 통계처리

통계분석은 SAS v9.2 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)을 이용하여 ANOVA 분석을 수행 후 DMRT (Duncan's Multiple Range Test)을 이용하여 5% 수준에서 유의성을 검정하였다 (p < 0.05).

결과 및 고찰

1. 침수 시간 및 수위에 따른 인삼 피해

인삼 (*Panax ginseng* C. A. Meyer)의 침수 기간과 수위를 달리하여 침수 처리를 하였을 때 지상부 관찰 시 모든 처리구들은 침수 종료일까지 뚜렷한 증상을 보이지 않았다. 그러나 침수 종료 후 시간이 지남에 따라 WA(+) 5 일구에서 먼저 황화가 진행되고 팽압을 잃어 잎이 처지기 시작하였는데, 배수 7 일 후에는 회복할 수 없을 정도로 시들었다 (Fig. 1A and 1B). 이후 WA(+) 3 일구, WA(-) 5 일구, WA(-) 3 일구 순으로 침수에 의한 피해를 관찰할 수 있었다.

배수 14 일 후 WA(+) 5 일구의 피해율이 100.0%로 지상부가 모두 고사하였는데, 반면 WA(-) 5 일구는 피해율이 33.8%로 그쳤다. 또한 WA(+) 3 일구는 피해도가 53.5%였지만 WA(-) 3 일구는 피해가 없었다. 나머지 처리구들 중에도 일시적으로 잎이 처지는 현상이 있었지만 시간이 지나면서 회복이 되어 최종적으로는 침수의 영향이 관찰되지 않았다.

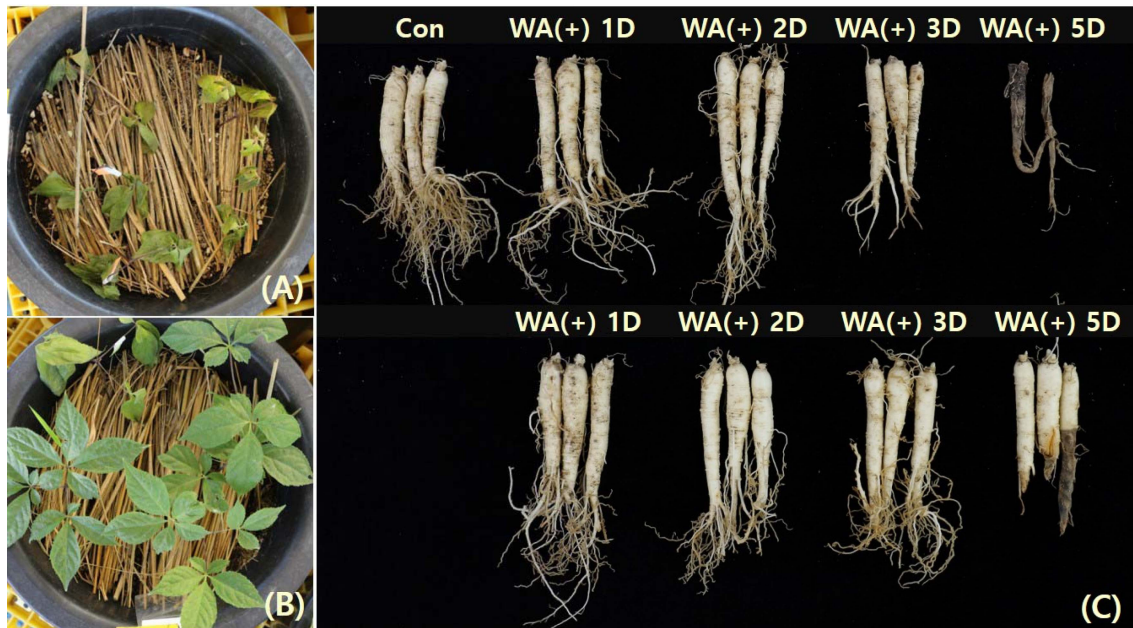


Fig. 1. Damage on the shoot and root after waterlogging for the different duration and water levels. Lost of green color and turgor of shoots at 7 days after drainage of waterlogging for 5 days (A) at 2 cm above the soil surface [WA(+ 5D)] and (B) at below the rhizome [WA(-) 5D]. (C) Roots of ginseng at 14 days after drainage. WA(+); water level at 2 cm above the soil surface, WA(-); water level at below the rhizome during waterlogging, Con; control.

배수 14 일 후 수확하여 생육을 조사하였을 때 WA(+) 5 일구는 지상부가 모두 고사하였고, 이를 제외한 지상부의 생중량은 WA(+) 1 일구가 1.37 ± 0.09 g으로 가장 높았고 WA(+) 2 일구와 WA(+) 3 일구가 각각 1.14 ± 0.10 g, 1.13 ± 0.07 g으로 처리간 통계적 차이가 없었다 (Table 2). 반면 건조중은 WA(+) 1 일구와 WA(-) 1 일구가 0.27 g으로 가장 높았

으며 WA(+) 3 일구는 0.17 g으로 가장 낮았는데 대조구 대비 73.9%이었다 ($p < 0.05$).

엽록소 함량 (SPAD)은 침수 종료 직후에는 WA(+) 5 일구를 제외하면 처리 전과 큰 차이가 없었지만, 시간이 지남에 따라 침수 수위가 높은 처리구들의 SPAD는 감소하였다가 다시 증가하는 경향을 보였다 (Table 3). 최종 조사 시 대조구와

Table 2. Damage rate and growth properties of ginsengs after waterlogging for different duration and water level. Damage rate and growth properties were measured 14 days after drainage.

Treatment	SDR ³⁾ (%)	SW ⁴⁾ (g/plant)	RL ⁵⁾ (cm)	RD ⁶⁾ (mm)	RW ⁷⁾ (g/plant)	FRD ⁸⁾ (0 - 3)	SDW ⁹⁾ (g/plant)	RDW ¹⁰⁾ (g/plant)	Hardness (N)	
Control	0.0 ± 0.0^d	1.20 ± 0.06^a	12.0 ± 0.5^a	7.6 ± 0.3^{ab}	2.60 ± 0.15^{ab}	2.5 ± 0.1^a	0.23 ± 0.01^{ab}	0.71 ± 0.04^{ab}	23.3 ± 0.8^a	
WA(+) ¹⁾	1 D	0.0 ± 0.0^d	1.37 ± 0.09^a	10.8 ± 0.5^{ab}	8.2 ± 0.3^{ab}	2.51 ± 0.17^{ab}	2.6 ± 0.2^a	0.27 ± 0.03^a	0.75 ± 0.06^a	21.5 ± 0.6^a
	2 D	5.0 ± 0.0^d	1.14 ± 0.10^a	10.6 ± 0.6^{abc}	7.6 ± 0.2^{ab}	2.18 ± 0.15^{bc}	2.0 ± 0.2^b	0.23 ± 0.04^{ab}	0.65 ± 0.06^{ab}	23.6 ± 0.7^a
	3 D	53.5 ± 14.8^b	1.13 ± 0.07^a	7.7 ± 0.3^d	7.3 ± 0.3^b	1.87 ± 0.12^c	0.9 ± 0.3^c	0.17 ± 0.03^b	0.45 ± 0.08^c	22.2 ± 0.9^a
	5 D	100.0 ± 0.0^a	nd ¹¹⁾	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
WA(-) ²⁾	1 D	0.0 ± 0.0^d	1.34 ± 0.05^a	11.8 ± 0.4^a	8.5 ± 0.2^a	2.79 ± 0.13^a	2.8 ± 0.1^a	0.27 ± 0.01^a	0.77 ± 0.01^{ab}	21.0 ± 1.0^a
	2 D	0.0 ± 0.0^d	1.32 ± 0.07^a	11.2 ± 0.5^{ab}	8.4 ± 0.3^a	2.58 ± 0.17^{ab}	2.7 ± 0.1^a	0.25 ± 0.02^a	0.71 ± 0.04^{ab}	21.5 ± 0.9^a
	3 D	0.0 ± 0.0^d	1.34 ± 0.07^a	10.0 ± 0.3^{bc}	8.2 ± 0.2^{ab}	2.42 ± 0.10^{ab}	2.8 ± 0.1^a	0.26 ± 0.01^a	0.63 ± 0.04^{ab}	21.7 ± 0.9^a
	5 D	33.8 ± 6.9^c	1.27 ± 0.09^a	9.2 ± 0.7^c	7.3 ± 0.3^b	1.98 ± 0.12^c	0.9 ± 0.1^c	0.23 ± 0.02^{ab}	0.59 ± 0.06^{bc}	21.7 ± 0.8^a

¹⁾WA(+); water level at 2 cm above the ground, ²⁾WA(-); water level at below the rhizome, ³⁾SDR; shoot damage rate, ⁴⁾SW; shoot weight, ⁵⁾RL; root length, ⁶⁾RD; root diameter, ⁷⁾RW; root weight, ⁸⁾FRD; fine root development (0; none - 3; abundant), ⁹⁾SDW; shoot dry weight, ¹⁰⁾RDW; root dry weight, ¹¹⁾nd: the damage was so severe that it could not be investigated. Values are means \pm standard errors (n = 12 - 24). Different letters within a column are significantly different by Duncan's Multiple Range Test (DMRT, $p < 0.05$).

Table 3. Change of SPAD after waterlogging for different durations and water level.

Treatment	Before WA	Dr. 1d	Dr. 8d	Dr. ³⁾ 12d	Final
Control	32.0±0.6	31.2±1.3 ^{ab}	33.5±1.2 ^a	30.5±0.0 ^{ab}	32.4±0.8 ^a
WA(+) ¹⁾	1 D ³⁾	30.8±1.8 ^{ab}	28.6±2.3 ^{ab}	28.9±0.0 ^{ab}	31.4±0.6 ^{ab}
	2 D	31.8±1.2 ^{ab}	29.4±1.0 ^{ab}	30.7±0.0 ^{ab}	31.5±0.9 ^{ab}
	3 D	31.7±1.5 ^{ab}	26.1±2.5 ^b	28.2±0.0 ^b	30.8±0.9 ^{ab}
	5 D	28.1±1.7 ^b	19.5±2.0 ^c	nd ⁴⁾	nd
WA(-) ²⁾	1 D	32.7±1.6 ^{ab}	31.3±1.4 ^a	33.6±0.0 ^a	32.6±0.8 ^a
	2 D	34.7±1.4 ^a	29.4±1.0 ^{ab}	30.3±0.0 ^{ab}	30.7±0.7 ^{ab}
	3 D	30.7±0.9 ^{ab}	31.3±1.0 ^a	31.1±0.0 ^{ab}	31.4±0.5 ^{ab}
	5 D	32.7±1.3 ^{ab}	30.2±0.7 ^{ab}	28.6±0.0 ^b	30.0±0.3 ^b

¹⁾WA(+); water level at 2 cm above the ground, ²⁾WA(-); water level at below the rhizome during waterlogging, ³⁾Dr.; day after drainage, ⁴⁾nd: the damage was so severe that it could not be investigated. Values are means ± standard errors (n = 5). Different letters within a column are significantly different by Duncan's Multiple Range Test (DMRT, p < 0.05).

WA(-) 1 일구가 32.4와 32.6으로 높았고, WA(+) 3 일구와 WA(-) 1 일구가 가장 낮았으나 30.8과 30.0으로 대조구와 큰 차이를 보이지 않았다 (Table 3).

침수의 영향으로 엽록소 함량의 감소는 흔히 쉽게 관찰되는 특징이다 (Flórez-Velasco *et al.*, 2015; Fiorentini *et al.*, 2019). WA(+) 5 일구와 같이 고사로 이어지는 경우 엽록소 감소가 뚜렷하였지만, 최종 조사에서 엽록소 함량은 이를 제외하면 큰 변화가 없었다. 이는 방법상 고사 된 인삼은 조사에서 제외되었던 점도 영향을 미쳤을 것이지만, 피해 증상이 뚜렷하지 않으면 침수에 따른 엽록소 함량 변화가 크지 않거나 일부 감소하여도 회복이 되기 때문으로 판단된다.

뿌리의 생육을 조사하였을 때 WA(+) 5 일구는 뿌리 부패가 많이 진행되어 흔적을 찾을 수 없거나 외과피만 남아있었다 (Fig. 1C). 근장은 대조구가 12.0 cm로 가장 길었는데 침수 일수와 수위가 높을수록 직경 2 mm 이하의 세근 (fine root)이 많이 소실되어 근장의 길이가 줄어들었으며, 심한 경우 동체의 말단부터 소실되었다 (Table 2 and Fig. 1C). 결과 WA(+) 3 일구의 근장은 7.7 cm로 가장 낮았고 다음으로 WA(-) 5 일구가 낮았다.

근경의 경우 WA(-) 1 일구와 WA(-) 2 일구에서 8.2 mm로 대조구보다 컸으며, WA(+) 3 일구와 WA(-) 5 일구의 경우, 7.3 mm로 가장 낮았는데 대조구와 비교하여서는 큰 차이는 없었다 (Table 2).

근중은 근경과 마찬가지로 WA(-) 1 일구가 가장 높아 2.79 ± 0.13 g이었으며, 대조구보다 높았다 (Table 2). WA(+) 3 일구와 WA(-) 5 일구는 각각 1.87 ± 0.12 g과 1.98 ± 0.12 g으로 대조구 대비 73.1%와 76.9%였다. 건조중도 생중량과 유사하여 WA(-) 1 일구가 가장 높았으며, WA(+) 3 일구와 WA(-) 5 일구가 가장 낮았는데 대조구 대비 각각 63.4%,

83.0%였다.

7월 - 8월은 뿌리의 부패 증가가 일어나는 시기로, 이 시기의 수분 공급은 부패 생장에 중요하다. 대조구는 시험 기간 동안 관수를 1 회 실시하였던 반면, WA(-) 1 일구와 WA(+) 1 일구는 침수 스트레스를 받았지만 토양이 충분히 물을 흡수하여 대조구보다 뿌리 비대에 유리하였던 것으로 생각된다. 이는 뿌리 비대기에 적정량의 강우량은 생육에 도움이 된다는 보고와 일치한다 (RDA, 2018).

세근은 토양 속에서 수분과 양분 흡수를 담당하며, 침수 시 빠르게 소실된다고 한다 (Reid and Petrie, 1991; Fujita *et al.*, 2021). 본 시험에서도 WA(+) 3 일구와 WA(-) 5 일구는 세근의 탈락이 분명하였다 (Table 2 and Fig. 1C). 통계적으로는 대조구와 차이가 없었지만 WA(+) 1 일구와 WA(-) 2 일구에서도 좀 더 가는 미세근들은 대조구와 비교해 일부 탈락한 경향을 보였다.

지하부의 경도는 침수피해와 관계없이 처리구간에 차이가 없었다 (Table 2). 하단부가 부패한 인삼을 조사하였을 때도 상단부의 경도가 평균치와 크게 다르지 않았는데, 장기간 건조 또는 과습 상태에서 생육한 인삼은 뿌리의 단단함이 감소하였다는 결과와는 다른 결과이다 (Kim *et al.*, 2015b). 이는 침수 기간이 상대적으로 짧아 경도에 영향을 주지 못했을 것으로 판단된다.

생육 조사 결과를 종합적으로 고찰해보면 침수 일수가 3 일 이상 지속되었을 때 피해가 더욱 뚜렷하였으며, 침수 수위가 높은 경우가 낮은 경우보다 생육 저하가 많았다. 반면 1 일 - 2 일간, 특히 저수위로 침수되어 있었던 처리구들은 대조구보다 생육이 좋은 편이었다. 이는 단기간 침수가 관수 역할을 하여 생육에 도움이 되었을 것으로 추측되나 원인에 대해서는 추후 연구가 필요하다.

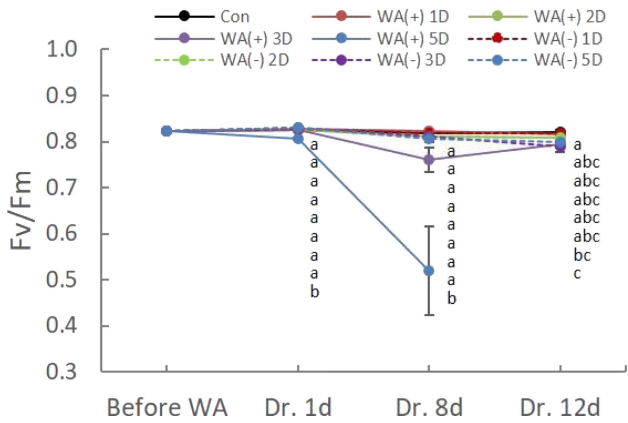


Fig. 2. Effects of waterlogging for the different durations and water levels on the maximum quantum yield (F_v/F_m). WA(+); water level at 2 cm above the ground, WA(-); water level at below the rhizome during waterlogging, Dr.; days after drainage, Con; control. Each point represent means \pm standard errors ($n = 5$). *Different letters at a certain time point are significantly different by Duncan's Multiple Range Test (DMRT, $p < 0.05$).

2. 침수 시간 및 수위에 따른 엽록소 형광 반응

배수 1 일 후 WA(+)
5 일구의 F_v/F_m 은 대조구에 비해 다소 하락하였으나 0.800 이상으로 양호하였으며, 다른 처리구들도 대조구와 차이가 없었다 (Fig. 2). 배수 7 일 후 WA(+)
5 일구의 F_v/F_m 은 0.520로 크게 떨어졌고 WA(+)
3 일구도 0.760으로 감소하였다. 배수 14 일 후에는 대조구가 0.820으로 가장 높았으며 WA(+)
3 일구와 WA(-)
3 일구는 0.800 이하로 대조구와 유의한 차이를 보였다 ($p < 0.05$). F_v/F_m 은 전반적으로 배수 1 일 후에 측정하였을 때보다는 감소한 경향이었고 대조구보다 낮았다 (Fig. 2).

엽록소 형광 반응은 여러 환경 스트레스에 대한 지표로 사용되며 침수에 의해 감소한다는 것이 보고되었다 (Smethurst *et al.*, 2005; Flórez-Velasco *et al.*, 2015; Betancourt-Osorio *et al.*, 2016; Fiorentini *et al.*, 2019). Kim 등 (2015a)이 조사한 인삼의 침수 반응에서도 엽록소 형광 반응의 감소를 관찰하였는데 침수 처리 기간이나 종료 후 반응을 조사한 시간이 훨씬 빨랐다.

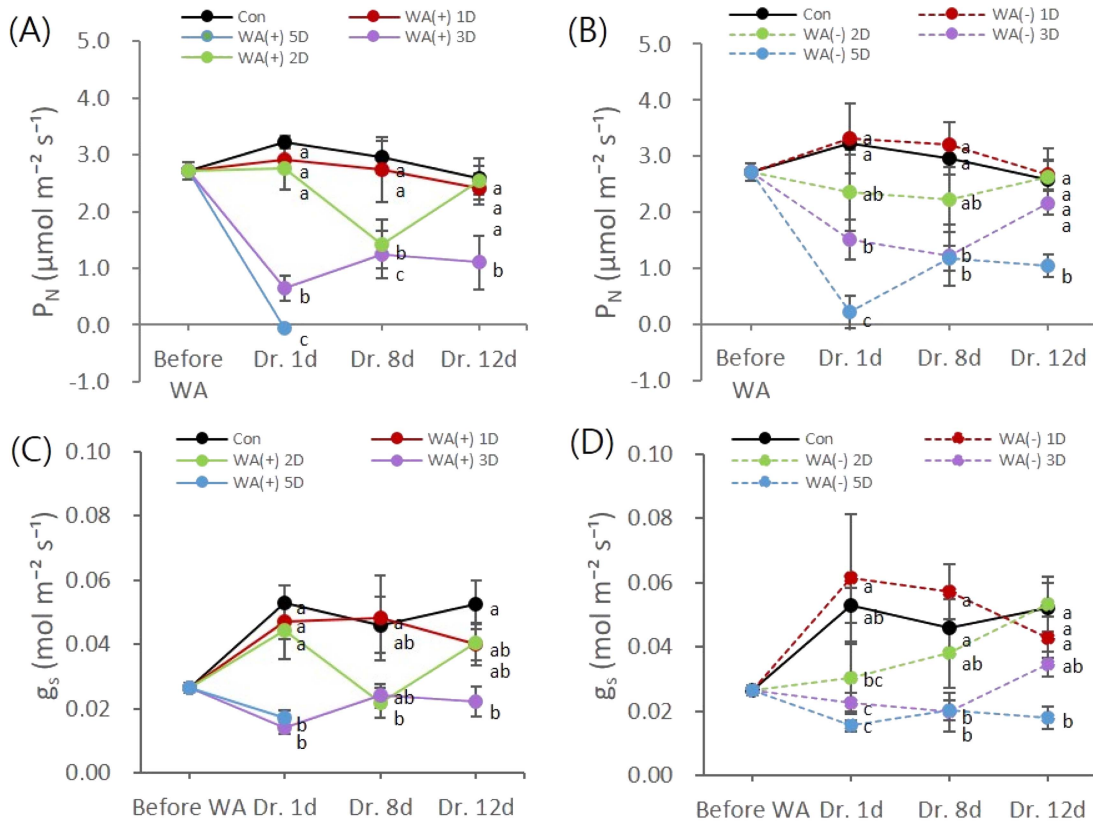


Fig. 3. Effect of waterlogging for the different durations and water levels on the photosynthetic rate (P_N ; A, B) and stomatal conductance (g_s ; C, D). WA(+); water level at 2 cm above the ground, WA(-); water level at below the rhizome during waterlogging, Dr.; days after drainage, Con; control, D; day or days of waterlogging. Each point represent means \pm standard errors ($n = 4$). *Different letters at a certain time point are significantly different by Duncan's Multiple Range Test (DMRT, $p < 0.05$).

위 결과로 판단할 때 WA(+) 5 일구와 같이 피해가 뚜렷한 경우가 아니라면 F_v/F_m 을 인삼의 침수피해 지표로 사용하기에는 어렵다고 판단된다. 왜냐하면 스트레스 지표는 외형이 양호하더라도 스트레스 정도를 즉각적으로 반영할 수 있어야 하는데, 배수 1일 후에도 WA(+) 5 일구의 F_v/F_m 변화 폭이 크지 않았으며, WA(-) 5 일구나 WA(+) 3 일구의 경우 근중 등 생육 차이가 분명하였지만 F_v/F_m 은 대조구와 크게 다르지 않았다. 그러므로 침수의 영향을 좀 더 예민하게 반영할 지표가 필요하다고 판단된다.

3. 침수 시간 및 수위에 따른 광합성 특성 조사

엽록소 형광 반응과 달리 광합성 특성은 침수 일수와 수위에 따라 민감한 반응을 보였다. 전반적으로 배수 1 일 후에 가장 큰 차이를 보였고 시간이 지남에 따라 점차 회복하는 경향을 보였다 (Fig. 3A and 3B). 배수 1 일 후 대조구의 광합성 속도 (P_N)는 $3.227 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 인 반면, WA(+) 5 일구의 광합성 속도는 $0.058 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 광합성이 거의 정지된 상태였으며, WA(-) 5 일구도 $0.230 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 매우 낮았다. 다음으로는 WA(+) 3 일구, WA(-) 3 일구, 그리고 WA(-) 2 일구 순으로 광합성이 감소하여 침수 일수가 길수록 광합성 속도가 감소하고, 침수 수위가 높을수록 감소하였다.

WA(-) 5 일구와 WA(+) 3 일구는 배수 8 일 후에는 회복이 되어 일정 정도 회복되었지만 한계가 있어 최종 조사 시 대조구 대비 각각 40.4%와 42.7%였다 (Fig. 3A, 3B and 4A). WA(-) 3 일구와 WA(-) 2 일구는 회복 속도가 더 늦었지만 배수 12 일 후에는 대조구와 비슷하였다. WA(+) 2 일구의 경우 배수 1일 후에는 대조구와 큰 차이가 없었지만 배수 8 일 후에는 급격히 떨어졌다가 다시 회복되는 양상을 보였다.

광합성 속도와 증산작용에 큰 영향을 주는 기공 전도도 (g_s)도 광합성 속도와 유사한 패턴을 보였다 (Fig. 3C and 3D). 배수 1 일 후 대조구는 관수로 인해 기공 전도도가 처리 전보다 크게 증가하였는데 이는 관수의 영향으로 보인다. WA(-) 1 일구와 WA(+) 1 일구, WA(+) 2 일구도 대조구와 비슷한 정도로 증가하였지만, WA(-) 2 일구는 처리 전과 비슷하여 대조구 대비 57.6%에 머물렀다. WA(-) 3 일구와 WA(+) 3 일구, WA(-) 5 일구, WA(+) 5 일구 모두 처리 전보다도 감소하여 최저값을 보였다. 최종 조사 시 기공 전도도는 WA(-) 1 일구, WA(+) 2 일구, WA(+) 1 일구가 대조구 대비 각각 82.2%, 77.5%, 76.7%로 다소 감소하였으며, WA(+) 3 일구와 WA(-) 5 일구는 각각 42.5%, 34.3%로 확연한 차이를 보였다 (Fig. 3C, 3D and 4B).

침수는 수리 전도도 (hydraulic conductance)를 감소시켜 뿌리의 수분흡수와 기공 전도도를 감소시킨다 (Aroca *et al.*, 2012; Rasheed-Depardieu *et al.*, 2015; Fujita *et al.*, 2021).

기공 전도도가 감소하면 gas와 수분의 출입이 원활히 이루어지지 못하게 되어 광합성 속도 및 증산량, 수분이용효율도 감소한다 (Boyer, 1970; Ryu *et al.*, 1996).

본 연구에서도 WA(-) 3 일구와 WA(+) 3 일구, WA(-) 5 일구, WA(+) 5 일구 등에서는 기공전도도가 침수 처리 후 확연히 감소하여 CO₂의 공급이 원활하지 않아 광합성 속도를 떨어뜨렸을 것으로 판단된다. 특히 배수 1 일 후에는 엽록소 함량과 엽록소 형광 반응도 대조구와 침수 처리간에 큰 차이가 없었으므로, 기공전도도와 이에 따른 광합성 속도는 직접적이고 빠르게 침수 피해에 대한 예측지표로서 활용가능성이 높아 보인다.

그러나 최종 조사에서 세포간극 (apoplast)내 CO₂ 농도 (C_i)가 대조구와 비교하여 큰 차이가 없었던 것과 엽록소 함량 감소, 엽록소 형광 반응감소 등으로 판단할 때 (Fig. 4C and 4D), 다른 원인, 즉 광합성 기구의 직접적인 손상을 의심해볼 필요가 있다 (Bansal and Srivastava, 2015; Ploschuk *et al.*, 2018).

인삼도 저년근보다 고년근이 침수에 대한 피해를 받는 시간

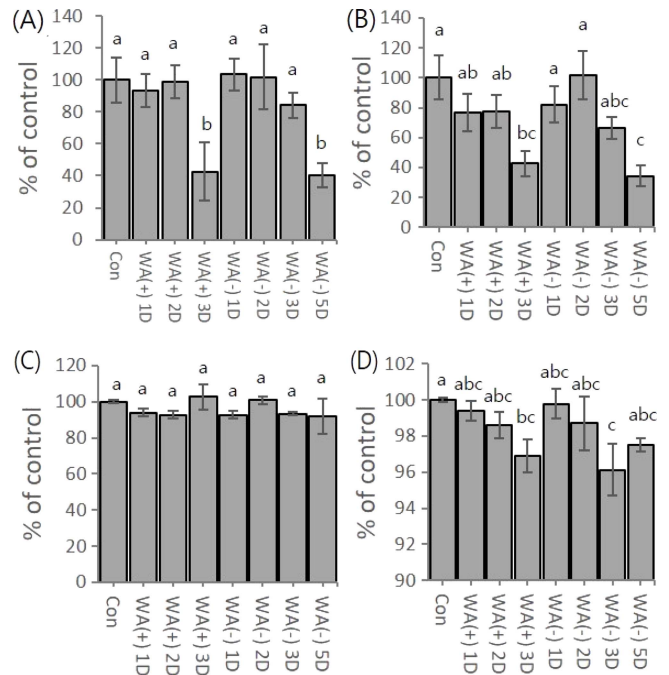


Fig. 4. Percentage of final (A) photosynthetic rate, (B) stomatal conductance, (C) intercellular CO₂, and (D) F_v/F_m at drainage after 12 d (A, B, C) and 13 d (D) of drainage of waterlogging for different durations and water depth. WA(+); water level at 2 cm above the ground, WA(-); water level at below the rhizome during waterlogging, Dr.; days after drainage, Con; control, D; day or days of waterlogging, Values are means \pm standard errors (n = 4 – 5). Data with different letters on the columns represent significant difference according to the Duncan's Multiple Range Test (DMRT, $p < 0.05$).

이 짧아진다고 하며, Kim 등 (2015a)에서도 12 시간 처리 후에도 F_v/F_m 의 감소가 나타났다고 한다. 이들 문헌에 재배조건이 자세하지 않아 비교하기 어렵지만, 인삼의 침수 반응에 대해서는 좀 더 다양한 조건에서 검토돼야 할 것으로 판단된다.

지금까지의 결과를 정리하면 인삼은 침수 기간, 특히 3 일 이상 지속될 경우 생육 저하 및 광합성 속도, 기공전도도 등이 감소하고, 침수 수위도 영향을 주어 수위가 낮은 경우 침수피해를 상대적으로 덜 받았다. 지상부를 외형적으로 조사하였을 때 이상이 없더라도 광합성의 감소 및 지하부 생육의 감소를 동반하는 것을 관찰할 수 있었다. 광합성 속도나 기공전도도는 엽록소 형광 반응보다 민감하게 침수피해 정도에 따라 반응하였는데, 이들 광합성 특성은 인삼의 침수피해 정도를 예측하는 지표로 사용될 수 있을 것으로 판단된다 (Lee *et al.*, 2010). 우리는 이 연구에서 얻은 결과들이 다양한 환경에서의 인삼 침수피해 양상을 이해하는 데 도움이 되는 기초자료로 활용되고, 계속 증가추세에 있는 이상기후에 대한 대책 수립에 도움이 되길 기대하는 바이다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 연구사업(과제번호: PJ01431601)과 2021년도 농촌진흥청 국립원예특작과학원 전문연구원 과정 지원 사업에 의해 이루어진 결과로 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Aroca R, Porcel R and Ruiz-Lozano JM. (2012). Regulation of root water uptake under abiotic stress conditions. *Journal of Experimental Botany*. 63:43-57.
- Bansal R and Srivastava JP. (2015). Effect of waterlogging on photosynthetic and biochemical parameters in pigeonpea. *Russian Journal of Plant Physiology*. 62:322-327.
- Betancourt-Osorio J, Sánchez-Canro D and Restrepo-Díaz H. (2016). Effect of nitrogen nutritional statuses and waterlogging conditions on growth parameters, nitrogen use efficiency and chlorophyll fluorescence in tamarillo seedlings. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 44:375-381.
- Boyer JS and Bowen BL. (1970). Inhibition of oxygen evolution in chloroplasts isolated from leaves with low water potentials. *Plant Physiology*. 45:612-615.
- Fiorentini M, Zenobi S, Giorgini E, Basili D, Conti C, Pro C, Monaci E, and Orsini R. (2019). Nitrogen and chlorophyll status determination in durum wheat as influenced by fertilization and soil management: Preliminary results. *PLoS ONE*. 14:e0225126. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0225126> (cited by 2021 July 8).
- Flórez-Velasco N, Balaguera-López HE, and Restrepo-Díaz H. (2015). Effects of foliar urea application on lulo(*Solanum quitoense* cv. *septentrionale*) plants grown under different waterlogging and nitrogen conditions. *Scientia Horticulturae*. 186:154-162.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2017). The impact of disasters and crises on agriculture and food security. Rome. <http://www.fao.org/documents/card/en/c/cb3673en> (cited by 2021 Aug 2).
- Fujita S, Noguchi K and Tange T. (2021). Different waterlogging depths affect spatial distribution of fine root growth for *Pinus thunbergii* seedlings. *Frontiers in Plant Science*. 12:614764. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2021.614764/full> (cited by 2021 Aug 2).
- Fukao T, Barrera-Figueroa BE, Juntawong P and Peña-Castro JM. (2019). Submergence and waterlogging stress in plants: A review highlighting research opportunities and understudied aspects. *Frontiers in Plant Science*. 10:340. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00340/full> (cited by 2021 Aug 8).
- Gu JO and Kuk YI. (1996). Effects of depth and duration of flooding on growth and yield at different growth stage in pepper(*Capsicum annum* L.). *Korean Journal of Environmental Agriculture*. 15:325-334.
- Horchani F and Aschi-Smiti S. (2010). Prolonged root hypoxia effects on enzymes involved in nitrogen assimilation pathway in tomato plants. *Plant Signaling and Behavior*. 5:1583-1589.
- Kang SB, Lee IB, Park JM, and Lim TJ. (2010). Effect of waterlogging conditions on the growth, root activities and nutrient content of Campbell early grapevine. *Korean Journal of Horticultural Science and Technology*. 28:172-179.
- Kim JU, Kim YC, Lee JU, Jo IH, Kim YB, Lim JY, Kim DH and Kim KH. (2015a). Chlorophyll fluorescence responses of 2-year-old cultivars in Korean ginseng(*Panax ginseng* C. A. Meyer) conditioned artificial wet injury. *Proceedings of Journal of Medicinal Crop Science*. 23:39-40.
- Kim JU, Lee JU, Jo IH, Kim DH, Kim KH and Kim YC. (2015b). Growth characteristics of 2-year-old cultivars in Korean ginseng(*Panax ginseng* C. A. Meyer) conditioned artificial wet injury. *CNU Journal of Agricultural Science*. 42:299-304.
- Kim Y. (2019). Flooding Tolerance Mechanism in Plants. *Journal of Agrilculture and Life Science*. 53:1-13.
- Korea Meteorological Administration(KMA). (2020). Abnormal climate report. 2021. 1. 28. <http://www.climate.go.kr/home/bbs/list.php?code=93&bname=abnormal> (cited by 2021 Aug 27).
- Lee JE, Kim HS, Kwon YU, Jung GH, Lee CK, Yun HT and Kim CK. (2010). Responses of photosynthetic characters to waterlogging in soybean[*Glycine max*(L.) Merrill]. *Korean Journal of Crop Science*. 55:111-118.
- Pan J, Sharif R, Xu X and Chen X. (2021). Mechanisms of waterlogging tolerance in plants: research progress and prospects. *Frontiers in Plant Science*. 11:627311. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7902513/> (cited by 2021 Aug 15).
- Ploschuk RA, Miralles DJ, Colmer TD, Ploschuk EL and Striker GG. (2018). Waterlogging of winter crops at early and late stages: Impacts on leaf physiology, growth and yield. *Frontiers in Plant Science*. 9:1863. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2018.01863/full> (cited by 2021 Aug 15).
- Putnam DH, Gull U, Perez B, Leinfelder-Miles M, and Long RF. (2017). Flooding and water-logging damage in alfalfa-What to do? 2017. 1. 17. *Alfalfa and Forage News*. <https://ucanr.edu/>

- blogs/blogcore/postdetail.cfm?postnum=22996 (cited by 2021 Sep 9).
- Rasheed-Depardieu C, Parelle J, Tatin-Froux F, Parent C, and Capelli N.** (2015). Short-term response to waterlogging in *Quercus petraea* and *Quercus robur*: A study of the root hydraulic responses and the transcriptional pattern of aquaporins. *Plant Physiology and Biochemistry*. 97:323-330.
- Reid JB and Petrie RA.** (1991). Effects of soil aeration on root demography in kiwifruit. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*. 19:423-432.
- Rural Development Administration(RDA).** (2018). White paper for the damage of ginseng by the abnormal climate: Low temperature, high temperature, wind, flooding, and snow. Rural Development Administration, Jeonju, Korea. p.66-77.
- Ryu YH, Lee SH, Kim SD and Kokubun M.** (1996). Effects of soil moisture content on leaf water potential and photosynthesis in soybean plants. *Korean Journal of Crop Science*. 41:168-172.
- Smethurst CF, Garnett T and Shabala S.** (2005). Nutritional and chlorophyll fluorescence responses of lucerne(*Medicago sativa*) to waterlogging and subsequent recovery. *Plant and Soil*. 270: 31-45.