

산화철과 환원철이 인삼의 갈반형 황증 발생에 미치는 영향

이성우*† · 박기춘* · 이승호* · 장인복* · 박경훈* · 김미란* · 박진면** · 김기홍*

*농촌진흥청 국립원예특작과학원 인삼특작부, **농촌진흥청 국립원예특작과학원 원예특작환경과

Effect of Ferric and Ferrous Iron Irrigation on Brown-Colored Symptom of Leaf in *Panax ginseng* C. A. Meyer

Sung Woo Lee*†, Kee Choon Park*, Seung Ho Lee*, In Bok Jang*, Kyung Hoon Park*, Mi Lan Kim*, Jin Myeon Park** and Ki Hong Kim*

*Ginseng Research Division, Department of Herbal Crop Research, NIHHS, RDA, Eumseong 369-873, Korea.

**Horticultural and Herbal Crop Environment Division, NIHHS, RDA, Suwon 440-706, Korea.

ABSTRACT : To study the cause of physiological disorder in leaf of ginseng cultivated at paddy soil, the degree of brown-colored symptom (BCS) and the contents of inorganic matter in leaf were investigated by irrigating the solution of ferric and ferrous iron of 0.1 ~ 2.0%, and citric acid of 1.0 ~ 4.0% on bed soil, respectively. Ratio of BCS by variety was as high as 85.0% in Yoenpoong, while it was as low as 5.4%, 7.5% in Chunpoong and Hwangsook, respectively. The contents of inorganic matter of leaf in Yoenpoong were lower in P₂O₅, Ca, and Mg, while it were higher in K, Fe, and Mn than other variety. Iron solution caused BCS more distinctly when each ferric and ferrous iron were dissolved with 1.0% citric acid than when each iron was dissolved without citric acid. Ferric iron caused BCS more effectively than ferrous iron. BCS occurred in 4.0% citric acid was as same as 2.0% ferric iron mixed with 1.0% citric acid. Low P₂O₅ and high Fe content in leaf appeared in both of artificial and natural symptoms. We concluded that excessive Fe uptake caused BCS to leaf because the solubility of iron was increased in condition of low soil pH.

Key Words : *Panax ginseng*, Variety, Brown-Colored Symptom, Iron, Citric Acid

서 언

논에서 인삼을 수확한 다음 4~5년간 벼를 재배하면 뿌리 썩음 병원균의 밀도를 크게 낮출 수 있어 재작이 가능하기 때문에 논토양을 이용한 인삼 재배가 늘고 있으며, 전국적으로 논재배 면적은 2010년 5,220 ha로 전체의 27.5%를 차지하고 있다.

그러나 논토양에서 인삼을 재배하면 지대가 낮은 곳에서는 배수불량으로 습해가 발생하기 쉽고 벼 재배시 담수와 배수의 반복으로 인해 용출된 철이 과잉 흡수되어 갈반형 황증이 생기기 쉽다 (Lee *et al.*, 2012, 2013b).

인삼 잎에 나타나는 생리장해의 일종인 황증은 주로 황색 반점형, 갈색 반점형, 엽연형으로 구분되는데 (Hyun *et al.*,

2009), 논재배에서는 주로 갈색 반점형 황증이 많이 발생한다 (Lee *et al.*, 2013b). 갈색 반점형 황증은 기온이 상승하고 토양이 건조해지는 5월 하순 ~ 6월 상순부터 생기기 시작하는데, 처음에는 작은 갈색 반점이 생기기 시작하다가 점차 확대되어 잎 표면이 갈색으로 변하고 심해지면 7~8월에 일찍 잎이 떨어져 수량이 크게 감소되므로 논토양을 이용한 인삼 재배시 문제가 되고 있다 (Lee *et al.*, 2009a, b, 2013a).

고등식물은 그 종류에 따라 산화철 (Fe³⁺)과 환원철 (Fe²⁺) 형태의 철 이온을 흡수하는데, 완두콩, 오이, 토마토 등과 같은 쌍떡잎식물은 뿌리로부터 양성자 (H⁺) 방출 (proton-ATPases), 3가철 킬레이트 환원효소 [Fe(III) chelate reductase]의 활성화, 2가철 수송 유전자 [Fe(II) transport gene]를 통해 토양으로부터 철을 흡수하며, 옥수수, 밀, 벼와

†Corresponding author: (Phone) +82-43-871-5541 (E-mail) leesw@korea.kr

Received 2014 January 10 / 1st Revised 2014 January 16 / 2nd Revised 2014 January 22 / 3rd Revised 2014 January 22 / Accepted 2014 January 23

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.

같은 화분과 작물은 뿌리에서 토양으로 식물철운반체 (phytosiderophores)를 분비하여 3가철 + 식물철운반체의 복합체 [Fe(III)-phytosiderophores complexes]를 만든 후 철을 흡수한다 (Kim and Guerinot, 2007).

논토양에서는 담수와 배수의 반복으로 산화와 환원반응이 일어나 산화철이온 (Fe^{3+})과 환원철이온 (Fe^{2+})이 다량 혼재되어 철 과잉 독성을 일으킬 수 있는데 (Ryu, 2000), 벼의 경우 환원철은 용해도가 높아 식물체에 쉽게 흡수되고 (Ishimaru *et al.*, 2006), 산화철은 용해도가 낮아 식물체의 흡수가 용이하지 않으나 토양 pH가 낮으면 산화철의 용해도 증가로 식물체로의 흡수가 용이하게 되어 철분의 과잉 장애가 나타난다고 하였다 (Olsen *et al.*, 1981). 또한 벼는 OsIRT 유전자를 이용하여 환원철도 직접 흡수할 수 있기 때문에 철 흡수에 대한 생리작용이 인삼과 다르며 (Ishimaru *et al.*, 2006), 인삼에서는 산화철과 환원철이 황증 발생에 미치는 영향에 대한 연구 결과는 없는 실정이다.

한편, 쌍떡잎식물은 뿌리에서 수소이온(H^+)과 카페인산 (caffeic acid) 등과 같은 유기산을 분비하여 토양입자에 결합되어 있는 철을 용해하고 킬레이트 화합물을 형성하여 세포내로 흡수하는데 (Hong, 2012; Kim and Guerinot, 2007), 구연산 (citric acid)과 같은 유기산은 킬레이트제로 작용하여 철 등의 양이온과 수용성 복합체를 형성함으로써 철의 흡수를 도와주는 역할을 하나 (Taiz and Zeiger, 2002), 인삼에서 황증 발생에 미치는 구체적인 연구결과는 거의 없다.

따라서 본 실험은 논토양에서 품종별 갈반형 황증 발생 차이를 조사하고 논재배시 황증이 쉽게 발생하는 연풍 품종을 대상으로 산화철, 환원철 및 구연산을 단독 또는 복합으로 처리함으로써 갈반형 황증 발생에 미치는 영향을 구명하여 생리장애 경감기술 개발의 기초자료로 활용하기 위해 실시하였다.

재료 및 방법

1. 인삼 품종에 따른 갈반형 황증의 발생 특성 구명

본 실험은 충북 음성군 소재 국립원예특작과학원 인삼특작부 인삼 논재배 시험포장에서 2011년도에 수행되었다. 공시 품종은 천풍, 황숙종, 연풍 등 3품종이며, 생육조사 당시의 연생은 5년생이었다. 논토양의 토성은 사촌통이고 배수등급은 배수약간불량지로 지하수위는 전보 (Lee *et al.*, 2012)와 같이 장마철에는 28 cm, 봄·가을 갈수기에는 71 cm의 변동을 보여 인삼재배가 가능한 배수조건이었다. 시험포장의 토양이화학성은 Table 1과 같은데, pH가 4.9로 적정범위보다 약간 낮고 염류농도가 0.76 dS/m으로 약간 높아 생리장애가 발생할 수 있는 포장이었다.

묘삼 이식전인 2007년도 5월 상순경에 수단그라스를 파종하고 8월 상순경 토양에 혼입하여 예정지를 관리하였다. 묘삼

Table 1. Soil chemical properties in the experiment field of paddy soil.

pH (1 : 5)	EC (dS/m)	NO ₃ (mg/kg)	OM (g/kg)	P ₂ O ₅ (mg/kg)	Ex. Cation (cmol ⁺ /kg)		
					K	Ca	Mg
4.9	0.76	48	14.7	98	0.48	2.7	0.97

Table 2. Soil chemical properties in the experiment field of upland soil.

pH (1 : 5)	EC (dS/m)	OM (g/kg)	P ₂ O ₅ (mg/kg)	Ex. Cation (cmol ⁺ /kg)		
				K	Ca	Mg
5.6	0.31	8.5	118	0.16	2.87	1.27

은 2008년 3월 하순경 7행 10열 (70주/3.3 m²)로 이식하여 2011년까지 재배하였다. 해가림 유형은 A형이었고 해가림 피복물은 은박코팅차광지 (차광판)이었다. 고온장애를 예방하기 위해 6월 상순부터 9월 중순까지 흑색 2중직 차광망을 해가림 위에 추가로 피복하여 차광률을 조절하였다.

7월 중순경 5년생 인삼 잎의 황증 발생률 및 생육 특성을 조사한 다음 바로 식물체 (잎)를 채취하고 80°C에서 48시간 건조하여 무기성분 함량을 분석하였다. 황증 발생률은 황증이 발생한 주의 비율로 나타났다.

식물체 잎의 무기성분 분석을 위해 건조된 시료 0.3 g을 평량하여 100 ml volumetric flask에 넣고 H₂SO₄-Salicylic acid 3.3 ml로 습식 분해하여 여과 (Whatman No. 6)한 다음 증류수로 10배 희석하였다. 질소는 CFA (Auto analyzer 3, Germany)을 이용하여 665 nm에서 흡광도를 측정하였고, 인산은 UV-Spectrometer (Hitachi, Japan)를 이용하여 880 nm에서 흡광도를 측정하였다. K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn 및 Zn의 함량은 ICP-OES (Intergra XMP, GBC, Australia)를 이용하여 측정하였다.

2. 철분 관주에 따른 인삼 갈반형 황증의 발생 특성 구명

2011년 갈반형 황증 발생이 매우 심했던 연풍 품종을 대상으로 2012년 인삼특작부 시험포장에서 수행하였다. 철분 관주 처리 당시 연풍은 6년생이었다. 시험포장은 개간지의 석비레 (마사토)를 2 m 높이로 성토한 밭토양이었는데, 토양화학성은 Table 2와 같이 유기물 함량이 다소 적었으나 기타 성분은 적절하여 인삼을 재배하기에 적합한 토양이었다. 묘삼 이식전인 2007년도 5월 상순경에 수단그라스를 파종하고 8월 상순경 토양에 혼입하여 예정지를 관리하였다. 묘삼은 2008년 3월 하순경 7행 10열 (70주/3.3 m²)로 이식하여 2012년까지 인삼표준재배법에 준하여 재배하였다. 해가림 유형 및 재배방법은 실험 1에서 기술한 방법과 동일하였다.

산화철과 환원철이 갈반형 황증 발생에 미치는 영향을 구명하고자 산화철 (FeCl₃ 6H₂O)과 환원철 (FeCl₂ 4H₂O)을 각각

Table 3. Varietal difference of growth characteristics and physiological disorder in 5-year-old ginseng cultured at paddy soil.

Variety	Stem Length (cm)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Chlorophyll content (mg/g, FW)	Ratio of discolored leaf (%)	Rusty root index [†] (0-3)	Root weight (g/plant)
Chunpoong	33.5 ^a	10.6 ^a	4.9 ^a	2.36 ^b	7.5 ^b	1.49 ^c	36.1 ^{a*}
Hwangsook	24.6 ^b	10.4 ^a	4.6 ^a	2.50 ^a	5.4 ^b	2.50 ^a	33.7 ^a
Yeonpoong	22.7 ^b	10.6 ^a	4.9 ^a	2.42 ^b	85.0 ^a	2.19 ^b	14.3 ^b

[†]Index of rusty coloured root; (X0 × 0) + (X1 × 1) + (X2 × 2) + (X3 × 3)/(X0 + X1 + X2 + X3), X0; no visible lesions, X1; slight lesions, X2; medium lesions, X3; serious lesions.

[‡]Harvest date; July 14, Shade material; aluminium-coated PE sheet.

*Means within a column followed by the same letter are not significantly different based on the DMRT ($p < 0.05$).

Table 4. Varietal difference of inorganic matter content in leaf of 5-year-old ginseng cultured at paddy soil.

Variety	T-N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu
	----- (%) -----					----- (mg/kg)-----			
Chunpoong	2.39 ^b	0.162 ^b	1.223 ^b	0.791 ^b	0.221 ^a	338 ^b	229 ^c	24.1 ^a	7.3 ^{b*}
Hwangsook	2.60 ^a	0.177 ^a	1.009 ^c	0.986 ^a	0.219 ^a	335 ^b	288 ^b	27.6 ^a	8.0 ^a
Yeonpoong	2.38 ^b	0.154 ^c	1.862 ^a	0.589 ^c	0.127 ^b	633 ^a	502 ^a	27.2 ^a	7.3 ^b

*Means within a column followed by the same letter are not significantly different based on the DMRT ($p < 0.05$).

0.1, 0.5, 1.0, 2.0% 수용액으로 만들어 관주처리했는데, 철과 킬레이트 결합으로 철 흡수를 촉진하기 위해 구연산 (citric acid) 1.0% 수용액과 각각 혼합하여 관주처리 하였다. 관주처리 시기는 7월 10일이었으며, 각 농도별로 주당 0.5 l 씩 토양에 관주하였다. 그리고 citric acid 1.0~4.0% 수용액을 단독으로 각각 관주하여 황증 발생정도를 조사하였다. 황증 발생률은 토양관주 후 7월 16일, 7월 30일에 조사하였는데, 잎에서 황갈색 반점의 크기와 양을 관찰하여 0 (무발생), 1 (약함), 2 (중간), 3 (심함)으로 표시하였다. 그리고 황증이 발생한 잎의 무기성분 함량을 조사하기 위해 산화철 2.0%, 환원철 2.0%, 구연산 4.0% 수용액을 관주처리한 후 인삼 잎을 7월 30일에 수거하여 무기성분 함량을 분석하였는데, 무기성분은 실험 1과 동일한 방법으로 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 인삼 품종별 황증 발생률 및 무기성분 함량 차이

Table 3과 같이 인삼 품종별 생육특성 및 황증 발생률을 조사한 결과 천풍, 황숙중, 연풍 중에서 연풍의 황증 발생률이 85.0%로 가장 높았으며, 천풍과 황숙중은 5.47.5% 내외로 매우 낮아 황증이 거의 발생되지 않았다. 연풍은 경장이 매우 작았으며, 황증 발생이 매우 심하여 일찍 낙엽이 들었기 때문에 뿌리비대가 불량하여 주당근중은 천풍이나 황숙중에 비해 각각 60%, 57% 감소하였다. 뿌리의 적변은 황숙중 > 연풍 > 천풍 순이었으며, 황증 발생률과 관계가 없었다. Kang 등 (2010)도 논재배에 가장 적합한 품종은 천풍이며, 연풍의 황증

발생이 가장 심하였다고 하였다.

Table 4에서와 같이 품종별 잎의 무기성분 함량을 조사한 결과 황증 발생이 심했던 연풍은 인산, 칼슘, 마그네슘 함량이 낮고 칼륨, 철, 망간 함량이 높은 특징을 보였다. 따라서 황증이 발생하면 인산, 칼슘, 마그네슘의 흡수가 억제되고 칼륨, 철, 망간의 흡수가 촉진된다고 생각되는데, Lee 등 (2013b)도 황증이 발생한 인삼 잎은 인산, 칼슘, 마그네슘의 함량이 낮고 칼륨, 철의 함량이 높았는데, 특히 철분의 함량이 매우 높은 특징을 보였다고 하였다.

2. 철분의 토양관주가 인삼의 황증 발생에 미치는 영향

철분의 과잉흡수가 인삼 잎에 황증 발생을 일으키는지 알아보기 위해 산화철과 환원철 수용액을 0.1~2.0% 수준까지 농도별로 토양에 관주한 결과는 Table 5와 같다. 구연산 (citric acid)이 혼합되어있지 않은 산화철과 환원철 수용액을 각각 관주하면 약 2주후부터 증상이 나타나기 시작하였는데, 잎에 작은 갈색의 반점이 생기고 잎 표면이 황색으로 변화되었다. 그러나 초기에 낙엽이 지거나 잎이 고사되는 증상은 보이지 않았다.

산화철의 농도가 증가됨에 따라 황증 발생도 조금씩 증가되었는데, 2.0% 관주시 약한 정도의 황증이 발생하였다. 그러나 환원철은 1.0% 수준까지도 황증이 발생하지 않았고 2.0% 수준에서 산화철 2.0% 처리와 비슷한 정도의 황증이 발생하였다.

일반적으로 구연산과 같은 유기산은 킬레이트제 (chelator)로 작용하여 철 등의 양이온과 수용성 복합체를 형성, 식물뿌

철분이 인삼 황증 발생에 미치는 영향

Table 5. Effect of the irrigation of ferric and ferrous iron solution on brown-colored symptom (leaf discoloration) of 6-year-old ginseng.

Treatment	Score of LD [†] (0-3) [‡]		pH (1 : 5)	EC (dS/m)	Symptoms in leaf
	July 16	July 30			
Control	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.00	5.69	0.28	Non occurrence
FeCl ₃ 0.1%	0.0 ± 0.0	0.1 ± 0.22	4.96	0.52	Brown spot and yellow color
FeCl ₃ 0.5%	0.0 ± 0.0	0.3 ± 0.43	3.83	1.68	"
FeCl ₃ 1.0%	0.0 ± 0.0	0.6 ± 0.41	3.17	3.57	"
FeCl ₃ 2.0%	0.0 ± 0.0	0.9 ± 0.35	2.77	7.09	"
Average	0.00	0.48	3.68	3.22	-
FeCl ₂ 0.1%	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.00	5.08	0.45	Non occurrence
FeCl ₂ 0.5%	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.00	4.10	1.51	"
FeCl ₂ 1.0%	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.00	3.48	2.45	"
FeCl ₂ 2.0%	0.0 ± 0.0	0.8 ± 0.25	3.02	4.80	Brown spot and yellow color
Average	0.00	0.20	3.92	2.30	-

[†]LD; Leaf Discoloration.

[‡]Score of leaf discoloration; 0 (non occurrence), 1 (poor), 2 (middle), 3 (severe). Treated date; July 10, Amount of irrigation; 500 ml/plant.

Table 6. Effect of the irrigation of ferric and ferrous iron solution mixed with citric acid on brown-colored symptom (leaf discoloration) of 6-year-old ginseng, Yeonpoong.

Treatment	Score of LD [†] (0-3) [‡]		pH (1 : 5)	EC (dS/m)	Symptoms in leaf
	July 16	July 30			
Control	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	5.46	0.22	Non occurrence
FeCl ₃ 0.1% + CA [§] 1.0%	0.0 ± 0.00	0.5 ± 0.29	4.75	1.83	Brown spot and yellow color
FeCl ₃ 0.5% + CA 1.0%	1.5 ± 0.36	1.5 ± 0.34	4.35	2.41	"
FeCl ₃ 1.0% + CA 1.0%	2.8 ± 0.23	2.8 ± 0.27	3.80	4.45	Brown spot and yellow color. Foliage
FeCl ₃ 2.0% + CA 1.0%	3.0 ± 0.10	3.0 ± 0.15	3.39	6.71	Dark brown spot. Leaf died
Average	1.83	1.95	4.07	3.85	-
FeCl ₂ 0.1% + CA 1.0%	0.0 ± 0.00	0.5 ± 0.35	4.87	1.49	Brown spot and yellow color
FeCl ₂ 0.5% + CA 1.0%	0.0 ± 0.00	0.5 ± 0.32	4.51	2.77	"
FeCl ₂ 1.0% + CA 1.0%	0.0 ± 0.00	0.5 ± 0.30	4.04	4.60	"
FeCl ₂ 2.0% + CA 1.0%	2.5 ± 0.30	2.5 ± 0.34	3.46	6.41	Dark brown spot
Average	0.62	1.00	4.22	3.82	-

[†]LD; Leaf Discoloration.

[‡]Score of leaf discoloration; 0 (non occurrence), 1 (poor), 2 (middle), 3 (severe). [§]CA; citric acid. Treated date; July 10.

리에 흡수되기 쉬운 형태로 되게 하는데 (Taiz and Zeiger, 2002), 산화철이나 환원철을 카페인산이나 구연산과 같은 유기산에 녹여 킬레이트 (chelate) 시키지 않고 바로 처리했기 때문에 식물체로의 철 흡수가 억제되어 황증이 약하게 발생된 것으로 보인다 (Hong, 2012).

철분의 관주에 따라 토양의 pH는 낮아졌고 염류농도는 증가되었다. 즉, 토양 pH는 무처리일 때 5.7에서 산화철 2.0%, 환원철 2.0% 수준일 때 각각 2.8, 3.0으로 크게 감소하였다. 토양염류농도는 무처리일 때 0.28 dS/m에서 산화철 2.0%, 환원철 2.0% 수준일 때 각각 7.1, 4.8 dS/m로 크게 증가하였다. 산화철을 관주했을 때 pH는 환원철보다 약간 더 하락했고 염류농도는 환원철보다 약간 더 상승하는 경향을 보였다.

Table 6에서와 같이 철의 용해도를 높이기 위해 철과 구연

산을 혼합하여 킬레이트로 만든 다음 토양에 관주처리하면 철의 농도 증가에 따라 황증 발생이 크게 증가되었다. 철 단독 처리 (Table 5)보다 구연산과 혼합처리 했을 때 황증이 더 빨리 나타났다. 즉, 산화철 2.0% 수용액 단독처리는 Table 5에 서와 같이 황증 발생정도가 0.9 (미약한 황증)로 미약했으나 구연산 1.0%를 첨가한 산화철 2.0% 수용액 처리는 Table 6 과 같이 황증 발생 정도가 3.0 (매우 심한 황증)으로 매우 심했다. 산화철 0.5% 처리에서는 잎이 황색으로 변하고 갈색 반점이 나타났으며, 1.0% 처리에서는 낙엽이 발생했고 2.0% 처리에서는 흑갈색 반점이 크게 확대되어 잎이 고사되었다. 그러나 환원철은 1.0% 수준에서도 낙엽이 지지 않았으며, 2.0% 수준에서 흑갈색 반점이 생겼으나 잎이 고사되지는 않아 산화철을 처리했을 때보다 황증 발생이 약했다.

Table 7. Effect of the irrigation of citric acid on brown-colored symptom (leaf discoloration) of 6-year-old ginseng, Yeonpoong.

Treatment	Score of LD [†] (0-3) [‡]		pH (1 : 5)	EC (dS/m)	Symptoms in leaf
	July 16	July 30			
Control	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	4.57	0.72	Non occurrence
CA [§] 1.0%	0.3 ± 0.33	0.5 ± 0.34	3.93	1.16	Brown spot and yellow color
CA 2.0%	0.5 ± 0.35	0.8 ± 0.38	3.59	1.68	"
CA 3.0%	2.0 ± 0.15	2.5 ± 0.27	3.33	2.48	Dark brown spot
CA 4.0%	2.8 ± 0.21	3.0 ± 0.10	3.21	2.85	Dark brown spot. Leaf died

[†]LD; Leaf Discoloration.

[‡]Score of leaf discoloration; 0 (non occurrence), 1 (poor), 2 (middle), 3 (severe). [§]CA; citric acid. Treated date; July 10.

Table 8. Inorganic matter contents of leaf in 6-year-old ginseng, Yeonpoon by irrigating iron and citric acid solution.

Treatment	T-N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu
	----- (%) -----					----- (mg/kg) -----			
Control	2.02 ^a	0.291 ^a	1.064 ^{ab}	1.731 ^c	0.498 ^c	213 ^b	116 ^d	13.3 ^c	219 ^{d*}
FeCl ₃ 2.0%	1.26 ^c	0.188 ^c	1.029 ^b	1.844 ^b	0.535 ^b	484 ^a	157 ^c	16.7 ^{bc}	261 ^c
FeCl ₂ 2.0%	1.35 ^b	0.179 ^c	1.093 ^{ab}	1.739 ^c	0.487 ^c	507 ^a	206 ^b	22.9 ^b	518 ^b
CA [‡] 4%	1.38 ^b	0.214 ^b	1.146 ^a	1.990 ^a	0.636 ^a	529 ^a	229 ^a	19.7 ^{ab}	564 ^a

[†]FeCl₃ 2.0% and FeCl₂ 2.0% solution were mixed with citric acid 1.0%, respectively. [‡]CA; citric acid. Treated date; July 10.

*Means within a column followed by the same letter are not significantly different based on the DMRT ($p < 0.05$).

쌍떡잎식물은 식물뿌리에서 수소이온 (H⁺)과 카페인산 (caffeic acid) 등을 분비하여 토양 내에 불용성 수산화물 형태 (Fe₂O₃ · H₂O)로 존재하는 3가철을 용해하여 킬레이트 화합물을 만들고 뿌리세포의 원형질막에 존재하는 3가철 환원효소 [Fe(III) chelate reductase] 에 의해 3가철을 2가철로 환원시켜 세포내로 흡수하기 때문에 (Hong, 2012; Kim and Guerinot, 2007) 환원철보다 산화철의 흡수가 더 빨라 산화철 처리에서 황증이 더 심했던 것으로 생각된다. 또한, 토양에 관주된 환원철은 식물체에 직접 흡수되지 않고 서서히 산화되어 3가철로 변화된 다음 식물체 내로 흡수되었기 때문으로 생각된다 (Lee *at al.*, 2011).

Table 7에서와 같이 구연산만을 토양에 단독 처리하여 황증 발생정도를 조사한 결과 1.0% 처리에서는 매우 약한 정도의 황증이 발생했으나 구연산 농도가 증가함에 따라 차차 증가하여 4.0% 처리에서는 산화철 2.0% + 구연산 1.0% 수준에서와 같은 정도의 황증이 유발되었으며, 적갈색 반점이 크게 확대되어 바로 잎이 고사되는 현상을 보였다.

일반적으로 토양 내에서 철 함량은 2% 내외로 다른 원소에 비해 많이 존재하는 편인데 (Ryu, 2000), 토양에 관주된 구연산 수용액은 토양의 pH를 낮추어 주는 역할을 하며, 낮은 pH 조건에서 토양입자로부터 용출되어 나온 3가철은 구연산과 킬레이트 결합을 하여 뿌리세포 내로 쉽게 흡수되었기 때문에 철분의 관주없이 구연산만 단독으로 처리해도 황증이 유발된 것으로 판단된다. Olsen 등 (1981)에 의하면 산화철은 용해도가 낮아 식물체의 흡수가 용이하지 않으나 토양 pH가 낮을

경우 산화철의 용해도가 증가하여 식물체로의 흡수가 용이하게 되어 철분의 과잉 장애가 나타난다고 하였으며, Ishimaru 등 (2006)과 Takahashi 등 (2001)도 산성토양에서 철분의 용해도가 증가하여 철 과잉장애가 나타난다고 하였다.

3. 철분의 토양관주에 따른 인삼 잎의 무기성분 함량 변화

산화철 2.0%, 환원철 2.0% 및 구연산 4.0% 수용액을 토양에 관주하여 갈반형 황증을 뚜렷이 유발시킨 다음 잎을 채취하여 무기성분 함량을 분석한 결과는 Table 8과 같다. 철이나 구연산을 처리하면 잎의 전질소와 인산함량은 무처리보다 유의적으로 감소하였으며, 철, 망간, 구리의 함량은 유의적으로 증가되었다. Table 4에서 갈반형 황증이 심한 연풍은 천풍이나 황숙중에 비해 인산, 칼슘, 마그네슘 함량이 낮고 칼륨과 철의 함량이 매우 높았는데, 인위적으로 황증을 유발한 결과 (Table 8)와 비교해보면 인산 함량이 낮고 철 함량이 높은 공통점을 발견할 수 있었다. Lee 등 (2013b)도 갈반형 황증이 유발된 인삼 잎은 정상적인 잎보다 인산 함량이 낮고 철 함량이 높다고 하였으며, Ward 등 (2008)은 애기장대를 이용한 실험에서 인산과 철이 결합하여 철의 독성을 막아주기 때문에 인산의 결핍은 철 독성을 일으키는 원인이 된다고 하였다.

또한 본 실험에서 구연산의 처리에 따라 토양의 pH가 매우 낮아져 철 과잉 장애를 유발하였는데, Lee 등 (2010b)과 Farhoodi와 Coventry (2008)도 토양 pH와 철, 망간은 고도의 유의한 부의상관을 보여 pH가 낮으면 철의 함량이 증가한다고 하였다. 결론적으로 논재배에서 발생이 많은 갈반형 황증

은 토양의 pH가 낮은 조건에서 철의 용해도가 증가하여 철의 과잉 흡수로 인한 독성 때문에 발생하는 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청에서 주관하는 친환경 인삼생산을 위한 하우스 시설재배기술 개발 과제(과제번호: PJ907010)의 연구비 지원에 의해 이루어진 결과로 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Farhoodi A and Coventry DR.** (2008). Field crop responses to lime in the mid-north region of south Australia. *Field Crops Research*. 108:45-53.
- Hong YN.** (2012). Introduction to plant physiology(4th Ed.). Worldscience. Seoul, Korea. p.71-73.
- Hyun DY, Yeon BY, Lee SW, Kang SW, Hyun GS, Kim YC, Lee KW and Kim SM.** (2009). Analysis of occurrence type of physiological disorder to soil chemical components in ginseng cultivated field. *Korean Journal of Crop Science*. 17:439-444.
- Ishimaru Y, Suzuki M, Tsukamoto T, Suzuki K, Nakazono M, Kobayashi T, Wada Y, Watanabe S, Matsuhashi S, Takahashi M, Nakanishi H, Mori S and Nishizawa NK.** (2006). Rice plants take up iron as an Fe³⁺-phytosiderophore and as Fe²⁺. *Plant Journal*. 45:335-346.
- Kang SW, Lee SW, Hyun DY, Yeon BY, Kim YC and Kim YC.** (2010). Studies on selection of adaptable varieties in paddy field of ginseng culture. *Korean Journal of Medicinal Crop Science*. 18:416-420.
- Kim SA and Guerinot ML.** (2007). Mining iron: Iron uptake and transport in plants. *Federation of European Biochemical Societies Letters*. 581: 2273-2280.
- Lee SW, Kim GS, Hyun DY, Kim YB, Yeon BY, Kang SW and Kim YC.** (2009a). Comparison of growth characteristics and ginsenoside contents of 3-year-old ginseng(*Panax ginseng* C. A. Meyer) by drainage class and shade material in paddy soil. *Korean Journal of Crop Science*. 54:390-396.
- Lee SW, Kim GS, Yeon BY, Hyun DY, Kim YB, Kang SW and Kim YC.** (2009b). Comparison of growth characteristics and ginsenoside contents by drainage classes and varieties in 3-year-old ginseng(*Panax ginseng* C. A. Meyer). *Korean Journal of Medicinal Crop Science*. 17:346-351.
- Lee CY, Kim KY, Lee JE, Kim SH, Ryu DK, Choi JE and An GH.** (2011). Enzymes hydrolyzing structural components and ferrous ion cause rusty-root symptom on ginseng(*Panax ginseng*). *Journal of Microbiology and Biotechnology*. 21:192-196.
- Lee SW, Park JM, Kim GS, Park KC, Jang IB, Lee SH, Kang SW and Cha SW.** (2012). Comparison of growth characteristics and ginsenosides content of 6-year-old ginseng(*Panax ginseng* C. A. Meyer) by drainage class in paddy field. *Korean Journal of Medicinal Crop Science*. 20:177-183.
- Lee SW, Park KC, Lee SH, Kim GS, Jang IB, Kim YB and Cha SW.** (2013a). Growth characteristics and ginsenoside contents of 6-year-old ginseng(*Panax ginseng*) by shade materials in paddy field. *Korean Journal of Medicinal Crop Science*. 21:118-123.
- Lee SW, Park KC, Lee SH, Park JM, Jang IB and Kim KH.** (2013b). Soil chemical property and leaf mineral nutrient of ginseng cultivated in paddy field occurring leaf discoloration. *Korean Journal of Medicinal Crop Science*. 21:289-295.
- Lee YH, Choi St, Lee ST, Hong KP, Song WD, Lee JH and Cho JS.** (2010b). Changes in Fe, and Mn content and lime requirement based on soil pH testing in sweet persimmon fields. *Korean Journal of Soil Science Fertilizer*. 43:584-589.
- Olsen RA, Clark RB and Bennet JH.** (1981). The enhancement of soil fertility by plant roots. *American Scientist*. 69:378-384.
- Ryu SH.** (2000). Terminology dictionary for soil. Seoul National University. Seoul, Korea. p.336-337.
- Taiz L and Zeiger E.** (2002). Plant physiology(3th Ed.). Sinauer Associates. Sunderland. MA, USA. p.70-72.
- Takahashi M, Nakanish H, Kawasaki S, Nishizawa NK and Mori S.** (2001) Enhanced tolerance of rice to low iron availability in alkaline soils using barley nicotianamine aminotransferase genes. *Nature Biotechnology*. 19:466-469.
- Ward JT, Lahne RB, Yakubova E, Salt DE and Raghothama KG.** (2008). The effect of iron on the primary root elongation of *Arabidopsis* during phosphate deficiency. *Plant Physiology*. 147:1181-1191.