

인삼 수경재배 시 붕소와 철 과잉 농도가 인삼의 생리장해 증상, 생육 및 무기원소 흡수에 미치는 영향

유 진[†] · 강수현* · 장인배* · 장인복* · 박기춘* · 이응호* · 박홍우** · 서수정* · 서태철*** · 김기홍*

*농촌진흥청 국립원예특작과학원 인삼특작부, **국립산림과학원 산림약용자원연구소,
***농촌진흥청 국립원예특작과학원 원예작물부

Influence of Boron and Iron Toxicity on the Physiological Status, Growth, and Mineral Uptake of Ginseng in Hydroponic Culture

Jin Yu[†], Soo Hyun Kang*, In Bae Jang*, In Bok Jang*, Ki Choon Park*, Ueong Ho Lee*,
Hong Woo Park**, Su Jeoung Suh*, Tae Cheol Seo*** and Kee Hong Kim*

*Department of Herbal Crop Research, NIHHS, RDA, Eumseong 27709, Korea.

**Forest Medicinal Resources Research Center, National Institute of Forest Science, Punggi 36040, Korea.

***Department of Horticultural Crop Research, NIHHS, RDA, Wanju 55365, Korea.

ABSTRACT

Background: Ginseng is a perennial crop grown for more than four years in the same place. Therefore, it is highly affected by the soil environment, especially nutrients in the soil. The present study was carried out to investigate the influence of boron and iron concentrations on the physiological status, growth, and mineral uptake of ginseng to obtain the basic information for diagnosing a physiological disorder in ginseng plants.

Methods and Results: The boron and iron concentrations were controlled at 3, 30, 150, 300 and 2, 20, 100, 200 mg/L, respectively. When treated with 150 mg/L of boron, the ginseng plants showed yellowing or necrosis symptoms at the edge or end of their leaves. Compared with the 3 mg/L treatment, the root weight decreased by 13 and 24% in the 150 and 300 mg/L treatments, respectively. When treated with 20 mg/L of iron, the ginseng plants showed yellowing between the veins of the leaves followed by the formation of brown spots. The root weight gradually decreased with increasing iron concentration. Approximately 55% decrease in root weight was observed upon treatment with 200 mg/L of iron.

Conclusions: The boron toxicity occurs in the leaves of ginseng at the boron concentration of approximately 1,900 mg/kg or more. The iron toxicity occurs at the iron concentration of approximately 120 mg/kg for leaves and 270 mg/kg for roots.

Key Words: *Panax Ginseng* C. A. Meyer, Boron, Iron, Physiological Disorder, Toxicity

서 언

인삼 (*Panax ginseng* C. A. Meyer)은 긴 생육기간 동안 동일한 위치에서 자라기 때문에 토양 특성에 영향을 많이 받는데 (Kang *et al.*, 2007) 특히 토양 양분에 영향을 많이 받는다. 토양 양분은 인삼의 생육뿐만 아니라 생리장해에도 영향을 끼치는데 1980년대 토양 화학성과 인삼 생리장해에 관

한 연구를 시작으로 (Lee *et al.*, 1980a, b, 1984, 1989a; Park *et al.*, 1982) 단편적 유형의 생리장해 (Park, 1982; Chung *et al.*, 1985; Lee *et al.*, 1989b, 1995; Kang *et al.*, 2007), 복합적 유형의 생리장해 (Hyun *et al.*, 2009), 식물성 유기물 퇴비나 가축분뇨 시용이 생리장해에 미치는 영향 (Jang *et al.*, 2013, 2014)과 토양 염류가 생리장해 발생에 미치는 영향 (Kim *et al.*, 2015)등의 연구가 진행되어 왔다. 이렇듯

[†]Corresponding author: (Phone) +08-43-871-5611 (E-mail) yujin8603@korea.kr

Received 2017 June 9 / 1st Revised 2017 June 19 / 2nd Revised 2017 June 26 / 3rd Revised 2017 June 27 / Accepted 2017 June 27

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.

토양의 이화학적 성질이 인삼 생리장해 발생에 미치는 영향은 다수 보고되었으나 필수원소의 과잉 및 부족이 인삼의 생리장해와 생육에 미치는 영향은 명확하게 연구된 바가 없다. 작물에 외관상 생리장해가 발생하였을 때 원인을 정확하게 알지 못하여 조치를 취하지 못하면 수량을 감소시킬 뿐 아니라 품질을 저하시킨다 (Kim *et al.*, 2010).

붕소는 RNA 중 uracil 형태의 염기 형성에 중요한 성분으로 세포발육과 신장, 탄수화물 대사, 아미노산 형성, 단백질 합성에 크게 관여한다 (Havlin *et al.*, 2013). 이와 같이 붕소는 식물생장에 필수적인 미량원소로서 결핍증상이 유발되는 최저 한계점부터 과잉증상이 유발되는 최고 한계점까지의 적정영역 범위가 다른 미량원소보다 좁아 조금만 과다하게 시비하여도 과잉증상이 발현되는 특징이 있다 (Choi *et al.*, 2012). 인삼은 여타의 작물과 마찬가지로 생육과 발달에 붕소를 필요로 하지만 그 양은 매우 제한적인 것으로 알려져 있다. 그러나 건조하고 척박하며 붕소 함량이 적은 포장에서 인삼 뿌리 중심부가 갈색 또는 흑갈색으로 변하면서 구멍이 생기는 생리장해 증상은 은피가 발생한다는 보고가 있다 (RDA, 2014). 우리나라 토양은 일반적으로 붕소 함량이 낮은 편이나 최근 과수 및 채소 등을 재배하며 붕소 시용이 증가함에 따라 붕소가 점차 토양에 누적되고 있어 붕소 과잉 증상이 나타날 수 있는 토양 조건이 형성되고 있다.

철은 미량원소 중 식물에게 가장 많은 양을 필요한 원소로서 호흡, 광합성, 단백질 합성 및 각종 효소의 활성화에 관여한다. 철은 지구의 표면에 4번째로 풍부한 원소이지만, 토양에서 낮은 용해도 때문에 식물이 정상적인 생육을 위해 필요로 하는 10^{-9} - 10^{-4} M의 농도보다 훨씬 적은 양을 함유하고 있는 경우가 많다 (Martin *et al.*, 1994). pH 조건에 따라 철의 용해도는 달라지는데 보통 pH 6.5 이하의 약산성 조건에서부터 철의 용해도가 증가한다. 유럽의 석회질 토양과 같이 pH가 높은 토양에서는 철 결핍이 일어나기 쉽지만 우리나라와 같은 산성 토양에서는 철 결핍이 큰 문제가 되지 않는다 (Kim and Guerinot, 2007). 오히려 산성토양에서 작물을 재배할 때 철 과잉에 의한 문제가 야기되곤 한다. 논토양에서 인삼을 재배하면 벼 재배 시 담수와 불량한 배수 조건은 토양 환원을 촉진시켜 환원철 (Fe^{2+}) 함량이 높아져 철이 과잉 흡수되어 갈반형 황증이 발생하기 쉽다 (Lee *et al.*, 2013). 인삼 뿌리의 생리장해인 적변은 뿌리 표피에 철 등의 특정 무기성분이 고농도로 축적된 후 페놀 산화과정이 진행되어 나타난다고 알려져 있다 (Zhou *et al.*, 2016).

이와 같이 필수 미량원소 중 인삼에 영향을 많이 미칠 것으로 예상되는 붕소와 철의 영향을 양분 외에 다른 요인들의 영향을 최소화 한 환경에서 보고자 하였고, 배양액 내 미량원소인 붕소와 철의 농도를 변화시켜 인위적으로 과잉 증상을 발

현시킨 후 과잉증상의 특징과 식물체 내 무기원소 함량을 분석하여 생리장해 진단을 위한 기초 자료를 확보하고자 본 연구를 수행하였다.

재료 및 방법

1. 실험재료 및 처리

본 실험은 2015년 3월부터 2015년 11월까지 국립원예특작과학원 인삼특작부 자동화 유리온실 내의 식물공장형 LED실에서 실시하였다. 시설 내부 온도 관리는 냉난방기 (Samsung, Suwon, Korea)를 이용하여 20 - 24°C 범위로 관리하였다. 식물의 광합성 및 생육에 필요한 파장의 광을 정확히 조사하고 에너지 절감을 위해 광원으로는 LED를 사용하였다. 620 - 650 nm의 적색 파장과 450 - 470 nm의 청색 파장이 3 : 1의 비율로 혼합된 형광등 타입의 LED (UPC Korea Co., Ltd., Seoul, Korea)를 이용하였는데 전엽 후 잎의 높이에서 측정하였을 때 광량은 약 45 - 50 μmol 이었다. 본 실험에 사용한 인삼 (*Panax ginseng* C. A. Meyer)은 2015년 3월에 채굴한 금품 묘삽으로서 0.8 - 1.0 g의 무게로 선별한 후 플라스틱 포트 (용적 2,000 mL)와 에어펌프 등을 이용하여 만든 담배기에 2015년 7월 하순에 이식 한 후 처리당 3 반복으로 수행하였고, 실험은 2 회 반복하였다.

붕소와 철 농도에 대한 인삼의 생육 및 생리적인 영향을 보기 위해 본 실험에서는 담액 재배 및 양액 처리 시 3 차 증류수를 이용하였고, 다량원소는 N 6.5, P 1.5, K 4.0, Ca 2.0, Mg 1.0 mg/L, 미량원소는 FeNa-EDTA 3, B 3, Mn 2, Zn 0.2, Cu 0.05, Mo 0.01 mg/L 의 농도로 조제한 양액을 기본으로 사용하였다. 붕소와 철 농도가 인삼에 미치는 영향을 보기위해 붕소는 H_3BO_3 을 이용하여 3, 30, 150, 300 mg/L, 철은 FeNa-EDTA를 이용하여 2, 20, 100, 200 mg/L 으로 조절하여 처리하였다. 양액은 인삼이 정상적으로 출아한 것을 확인한 후 이식 20 일 후인 2015년 8월 중순에 처리하였다. 양액의 pH는 pH meter (Mettler-Toledo International Inc., Columbus, OH, USA)를 사용하여 조사한 후 2.5 N KOH와 HCl 용액을 이용하여 5.5 ± 0.5 로 조절하였는데 실험 중 양액의 평균 pH는 5.43 ± 0.2 였다. EC는 EC meter (Mettler-Toledo International Inc., Columbus, OH, USA)를 사용하여 일주일에 한번 씩 확인하였으며 액온은 따로 조절하지 않았지만 18 - 20°C로 유지되었다.

2. 인삼 생육특성 조사

인삼의 생육특성은 인삼 이식 약 60 일 후 2015년 9월 하순에 지상부와 지하부로 나누어 처리별 20 개체씩 3 반복으로 조사하였다. 지상부 특성 중 경장은 너두 바로 위부터 잎

자루 착생부까지의 길이를 측정하였고 엽장과 엽폭은 각 개체당 가장 큰 잎의 길이와 폭을 측정하였다. SPAD 값은 엽색계 (Konica Minolta Inc., Tokyo, Japan)를 이용하여 측정하였고 지상부 생체중은 잎과 줄기의 무게를 측정하였다. 지하부 특성 중 근장은 뇌두 바로 아래부터 가장 긴 뿌리 끝까지의 길이를 측정하였고 근직경은 개체당 가장 굵은 부분을 버니어캘리퍼스 (Mitutoyo, Kawasaki, Japan)로 측정하였으며, 근중은 주근과 지근을 모두 포함한 생체 무게를 측정하였다.

3. 식물체 분석

식물체 분석은 2015년 9월 하순에 수확한 인삼의 지상부와 지하부를 분석하였다. 시료 전처리를 위해 Microwave Digestion System (CEM Co., Matthews, NC, USA)을 사용하였다. Microwave vessel에 분말시료 0.25 g을 칭량한 다음 60% 질산 (Junsei Chemical Co., Ltd., Tokyo, Japan) 10 ml를 가한 후 용기를 밀폐하고 15 분간 180°C까지 상승시킨 후 5 분간 온도 유지, 10 분간 240°C까지 상승시킨 후 분해하였다. 분해가 완료되면 vessel을 실온까지 내놓아 식힌 다음, 50 ml 메스플라스크에 깔때기와 No. 6 여과지로 여과한 후 ICP OES (GBC Scientific Equipment, Braeside, Australia)를 이용하여 무기성분 함량을 측정하였다.

4. 통계처리

모든 분석은 SAS 프로그램 (SAS v9.2, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)을 이용하여 분산분석 (ANOVA)을 실시한 후 처리 간에 차이가 있을 경우 5% 유의수준에서 Duncan's Multiple Range Test (DMRT)로 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 붕소 및 철 과잉에 의한 인삼 생리장해 증상

보통 식물체에서 미량원소에 대한 내성은 미량원소 독성 (toxicity)을 나타내는 농도의 범위를 조사하여 판단하곤 한다. 그러나 붕소 과잉에 대한 내성은 잎의 붕소 농도로만 판단하기에는 명확하지 않은 부분들이 있어 시각적으로 나타나는 과잉 증상의 정도를 판단하는 것이 더 나은 지표가 될 수 있다 (Marschner, 2012).

인삼의 붕소 과잉 증상은 식물의 전형적인 붕소 과잉 증상이라고 알려져 있는 성숙한 잎의 가장자리나 끝 부분에 나타나는 황백화 또는 괴사 증상과 일치했다. 시기별로 붕소 과잉 증상을 나누어 보면, 붕소 300 mg/l 처리 후 약 15 일 정도 지나자 인삼 잎들이 아래쪽으로 만곡 되며 가장자리가 말리기 시작했다. 그 후 잎의 가장자리부터 황화 되기 시작하여 잎의 주맥을 따라 부근 조직 또한 황화 되어갔다. 잎 가장자리가 고사한 후에는 잎의 끝 부위부터 엽병 쪽으로 점차 황화 되고 괴사하였으며 결국에는 낙엽이 졌다 (Fig. 1). 이러한 과잉 증상은 붕소 150 mg/l 이상의 처리부터 나타나기 시작했으며 증상 발현의 속도는 300 mg/l 처리 보다 2-3 주 정도 늦었다. 약 60 일 동안 30 mg/l 처리에서 잎에 나타나는 과잉 증상은 찾을 수 없었는데 이는 인삼에서 과잉 증상이 즉각적으로 나타나기에는 처리 농도가 낮고 처리 후 재배 시기가 짧았다고 판단된다. 위의 결과는 포트에 붕소 5, 10 mg/l 을 양액으로 이용하여 미국삼에 처리한 결과 잎의 가장자리가 황화하고 괴사하는 증상이 나타난 것은 일치하였지만 과잉 증상이 발현하는 붕소 농도에 있어서는 차이를 보였다 (Proctor and Shelp, 2014). 이는 미국삼은 종자를 이용하여 실험을 수



Fig. 1. Symptoms of boron toxicity of leaves in 2-year-old ginseng. A; 10 days, B; 15 days, C; 30 days, D; 35 days, E; 45 days (after H_3BO_3 300 mg/l).

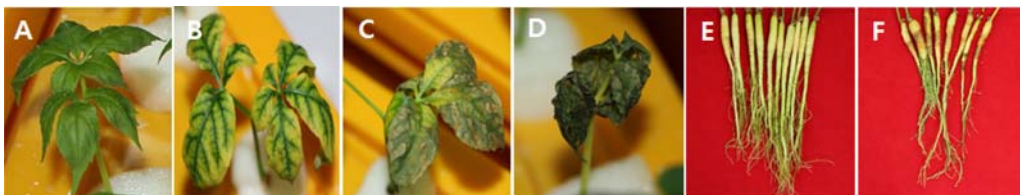


Fig. 2. Symptoms of iron toxicity of leaves in 2-year-old ginseng. A; 3 days, B; 7 days, C; 10 days, D; 15 days (after FeNa-EDTA 200 mg/l). E; root under control and F; root treated FeNa-EDTA 200 mg/l at 30 days.

행하였기에 상대적으로 낮은 붕소 농도에서도 증상이 발현되었다고 판단된다. 인삼과 같이 영년생 작물인 포도에서도 붕소 과잉 시 잎 끝의 황화 후 잎 가장자리로 황화된 다음 괴사하였고, 딸기 잎 가장자리에 나타난 갈변 현상 및 괴사 현상과도 매우 유사하게 나타났다 (Yermiyahu and Ben-Gal, 2006; Choi *et al.*, 2012). 하지만 Proctor와 Shelp (2014)의 결과와 마찬가지로 인삼 잎을 제외한 뿌리와 줄기에서는 붕소 과잉에 의한 특이적인 증상은 찾을 수 없었다.

본 실험에 의하면 인삼의 붕소 과잉 증상은 줄기와 뿌리보다 잎에 잘 나타나는 것을 알 수 있었고, 묘삼을 이용한 담액 수경재배시 약 60 일 동안은 30 mg/l 이하의 붕소 농도에서는 과잉 증상이 발현되지 않지만 그 이상의 농도에서는 증상이 나타날 것으로 판단된다.

철 과잉에 의한 독성 피해는 보통 활성 산소종 (reactive oxygen species, ROS)의 형성과 관련이 있다 (Fourcroy *et al.*, 2004). 식물체에 철이 과잉으로 흡수되면 세포 내에서 산소 분자가 환원되는 동안 생성되는 과산화물 (super oxide)과 과산화수소 (hydrogen peroxide)가 Fe^{2+} 와 Fe^{3+} 의 촉매작용을 통해 활성 산소종의 한 종류인 히드록실라디칼 (hydroxyl radical)을 형성하는데 이것은 DNA, 단백질, 지방, 당과 같은 세포 구성물에 손상을 입히게 된다 (Halliwell and Gutteridge, 1992).

인삼에 나타난 철 과잉 증상을 보면, 철 200 mg/l 처리 후 약 3 일 정도 지나자 인삼 잎이 아래쪽으로 처지기 시작했고 잎맥 사이가 점차 황화되었다. 철은 식물체 내에서 이동성이 좋지 않은 미량원소로 대부분 엽맥에 집중되어 있기 때문에 철이 결핍되었을 때 엽록소 생산이 저해되고 이로 인해 엽맥 사이의 황화현상이 나타나는데 엽맥 사이의 반점이 생기기 전의 철 과잉 증상 초기와 유사하였다. 그 후 갈색 반점이 생기고 결국에는 잎 전체가 마르면서 고사하였다 (Fig. 2). 잎 가장자리가 갈변하는 증상이 수반되기도 했다. 이러한 증상은 철 20 mg/l 이상의 처리부터 나타나기 시작했으며 증상 발현의 속도는 200 mg/l 처리 보다 약 1-2 주 정도 늦었다. 인삼에서 철 과잉 증상은 붕소와 비교했을 때 조금 더 낮은 농도에서도 빠르게 발현하는 것으로 나타났다. 이러한 과잉 증상은 벼에 250, 500 mg/l의 철을 처리하였을 때 잎에 갈색 반점이

생기고 결국에는 완전히 갈변되었다는 De Dorlodot 등(2005)의 결과와 일치하였다. 산화철과 환원철 수용액을 0.1%에서 2.0% 수준까지 농도별로 토양에 관주한 후 약 2 주 후부터 잎에 작은 갈색 반점이 생기고 잎 표면이 황색으로 변하였지만 초기에 낙엽이 지거나 잎이 고사되는 증상은 보이지 않았다고 보고하였다 (Lee *et al.*, 2014). 그러나 잎에 갈색 반점의 크기 및 발생하는 패턴이 약간 달랐는데 이는 토양재배, 수경재배와 같이 재배방법 차이에 의해 생긴 차이라고 생각된다. 철 과잉 증상은 뿌리에서도 나타났는데 과잉 처리구인 200 mg/l 은 뿌리가 무르고 썩었는데 이는 100 mg/l 처리구에서도 유사한 증상이 나왔다. 철 과잉 처리 시 잎과 뿌리에 증상이 나타나기 시작한 농도는 달랐는데 20 mg/l 처리구의 뿌리 상태는 대조구인 2 mg/l 과 유사하게 증상이 거의 나오지 않았다. Zhang 등 (2016)의 실험에서도 4 년생 인삼을 수경재배 방식으로 재배한 다음 200 μ M 이상의 Fe (II) EDTA를 처리하고 14 일이 지나자 뿌리의 표면이 적갈색으로 변하였다. 줄기에서는 붕소와 같이 특별한 철 과잉 증상을 찾을 수 없었다.

본 실험에 의하면 인삼의 철 과잉 증상은 잎과 뿌리에 모두 나타나고, 철 20 mg/l의 처리에서도 잎에 약한 과잉 장애 증상이 나타났으며 그 이상의 농도에서는 2-3 주 안에 잎과 뿌리에 장애 증상이 나타난다. 또한 뿌리가 썩고 갈색으로 변하는 등 다른 미량원소에 비해 철 과잉 농도는 더 치명적인 영향을 줄 것으로 판단된다.

2. 붕소 및 철 농도에 따른 인삼 지상부 및 지하부 생육 특징

과잉의 붕소 농도는 식물의 생육 중에 특히 지상부의 생육을 감소시킨다 (Nable *et al.*, 1997). Table 1에서와 같이 붕소 농도에 따른 인삼의 지상부 및 지하부 생육 특성을 조사한 결과, 지상부 생체중에 큰 영향을 미쳤는데 150, 300 mg/l 처리구는 대조구인 3 mg/l에 비해 생체중이 약 13%, 24%씩 감소하였다. 붕소 농도가 증가할수록 경장은 감소하는 경향은 뚜렷하게 나타났는데 대조구에서 6.7 cm로 가장 큰 값을, 300 mg/l에서는 4.8 cm로 가장 작은 값을 나타내었다. 엽장과 엽폭은 30 mg/l까지는 증가하였지만 그 이상의 농도에서

Table 1. Growth characteristics of 2-year-old ginseng grown for 60 days at different B levels.

B (mg/ l)	SL ¹⁾ (cm)	LL ²⁾ (cm)	LW ³⁾ (cm)	SPAD Value	SD ⁴⁾ (mm)	RL ⁵⁾ (cm)	RD ⁶⁾ (mm)	RW ⁷⁾ (g)	AW ⁸⁾ (g)
3	6.7 ^{a*}	6.7 ^b	2.9 ^b	41.7 ^a	1.8 ^a	13.6 ^{ab}	6.7 ^a	2.2 ^a	1.1 ^b
30	5.9 ^b	7.3 ^a	3.1 ^a	40.1 ^a	1.9 ^a	14.5 ^a	6.9 ^a	2.1 ^a	1.3 ^a
150	5.3 ^c	5.5 ^c	2.2 ^c	30.4 ^b	1.8 ^a	12.1 ^c	5.8 ^b	1.1 ^b	0.7 ^c
300	4.8 ^c	4.9 ^d	1.9 ^d	29.0 ^b	1.7 ^b	13.1 ^{bc}	5.1 ^c	0.8 ^c	0.5 ^d

*Mean within a column followed by the same letters are not significantly different based on the DMRT ($p < 0.05$). ¹⁾SL; Stem length, ²⁾LL; Leaf length, ³⁾LW; Leaf width, ⁴⁾SD; Stalk diameter, ⁵⁾RL; Root length, ⁶⁾RD; Root diameter, ⁷⁾RW; Root weight, ⁸⁾AW; Aerial weight.

Table 2. Growth characteristics of 2-year-old ginseng grown for 60 days at different Fe levels.

Fe (mg/ℓ)	SL ¹⁾ (cm)	LL ²⁾ (cm)	LW ³⁾ (cm)	SPAD value	SD ⁴⁾ (mm)	RL ⁵⁾ (cm)	RD ⁶⁾ (mm)	RW ⁷⁾ (g)	AW ⁸⁾ (g)
2	6.7 ^{a*}	6.7 ^b	2.9 ^b	41.7 ^a	1.8 ^a	13.6 ^b	6.7 ^a	2.2 ^a	1.1 ^a
20	6.3 ^a	7.3 ^a	3.2 ^a	44.1 ^a	1.9 ^a	15.6 ^a	6.9 ^a	2.4 ^a	1.3 ^a
100	5.1 ^b	6.4 ^b	2.8 ^{bc}	36.9 ^b	1.9 ^a	14.9 ^{ab}	5.7 ^b	1.4 ^b	0.9 ^b
200	5.3 ^b	6.3 ^b	2.6 ^c	31.2 ^c	1.9 ^a	13.4 ^b	5.4 ^b	1.0 ^c	0.8 ^b

*Mean within a column followed by the same letters are not significantly different based on the DMRT ($p < 0.05$). ¹⁾SL; Stem length, ²⁾LL; Leaf length, ³⁾LW; Leaf width, ⁴⁾SD; Stalk diameter, ⁵⁾RL; Root length, ⁶⁾RD; Root diameter, ⁷⁾RW; Root weight, ⁸⁾AW; Aerial weight.

Table 3. Concentration of mineral nutrients in the aerial and root of 2-year-old ginseng grown for 60 days at different B levels.

Part	B (mg/ℓ)	T-N	P ₂ O ₅	K	Ca	Mg	Fe	B	Mn	Zn	Cu
		%					mg/kg				
Leaf	3	2.6 ^{b*}	0.5 ^c	3.5 ^b	0.9 ^c	0.2 ^d	86.7 ^c	34.9 ^d	81.8 ^c	17.9 ^c	6.1 ^d
	30	2.9 ^a	0.8 ^b	4.0 ^a	1.0 ^b	0.2 ^c	89.0 ^b	330.8 ^c	95.0 ^b	17.4 ^d	6.2 ^c
	150	2.6 ^b	0.8 ^a	3.4 ^c	1.4 ^a	0.3 ^a	88.9 ^b	1,922.6 ^b	111.0 ^a	20.2 ^b	7.4 ^b
	300	2.9 ^a	0.5 ^d	3.1 ^d	0.8 ^d	0.2 ^b	117.2 ^a	2,880.6 ^a	47.1 ^d	29.4 ^a	9.7 ^a
Root	3	2.2 ^c	0.5 ^d	1.8 ^c	0.3 ^b	0.2 ^d	139.9 ^c	15.7 ^d	218.7 ^c	16.9 ^c	5.4 ^d
	30	2.6 ^b	0.6 ^b	2.1 ^b	0.2 ^c	0.2 ^c	156.4 ^b	57.8 ^c	295.4 ^a	25.2 ^b	6.3 ^c
	150	2.8 ^a	0.7 ^a	2.4 ^a	0.4 ^a	0.3 ^a	186.4 ^a	244.8 ^b	255.0 ^b	28.1 ^a	9.0 ^a
	300	2.7 ^b	0.6 ^c	1.8 ^c	0.4 ^a	0.2 ^b	157.9 ^b	427.1 ^a	70.1 ^d	24.9 ^b	8.6 ^b

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

는 감소하였다. 엽록소 함량 역시 붕소 농도가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다. 붕소가 결제되었을 때 엽록소 함량은 42.7로 가장 큰 값을 나타낸 후 150 mg/ℓ 이상의 처리부터 급격히 감소되었는데 150, 300 mg/ℓ 처리 시 대조구에 비해 각각 27%, 30%씩 감소하였다. 이는 잎의 엽록소 황화로 인한 결과로 생각된다. 붕소 과잉 처리에 의한 엽록소 황화는 광합성 능력에 영향을 끼쳐 인삼 지상부 및 지하부의 생육에 영향을 미친 것으로 판단된다. 은피 방제를 위한 붕소시용 시험에서도 10 a 당 붕소 비료 5 kg 시용한 처리구에서 과다증상이 나타났으며 과다증상이 없는 것도 엽장, 엽록소 함량과 경직성이 모두 작았다고 하였는데 본 실험 결과와 어느 정도 일치하였다 (KGTRI, 1982).

근장은 300 mg/ℓ 에서 1.7 cm 로 가장 작은 값을 나타내었지만 그 외의 처리에서는 유의한 차이는 없었다. 근직경은 30 mg/ℓ 처리에서 14.5 mm로 가장 큰 값을 나타내었지만 붕소 농도에 따른 특별한 경향을 찾을 수는 없었다. 반면 근중은 대조구에서 30 mg/ℓ 까지는 다소 증가하였지만 150, 300 mg/ℓ 처리구에서 각각 13%, 24%씩 감소하였다. Proctor와 Shelp (2014)는 1 ha당 8 kg의 붕소 비료를 시용했을 때 1.5 kg 처리보다 3 년근과 4 년근 미국삼의 수량이 각각 20%, 26%씩 감소하였고 보고하였다. 이와 같이 과잉의 붕소는 인삼의 근중 감소를 유발할 것이고 결국에는 수량 감소에도 큰 영향을

미칠 것으로 판단된다.

철 농도에 따른 인삼의 지상부 및 지하부 생육 특성을 조사한 결과는 Table 2와 같다. 경장은 철 농도가 증가할수록 감소하는 경향을 나타냈는데 특히 100, 200 mg/ℓ 농도의 철이 처리되었을 때 대조구인 2 mg/ℓ 에 비해 24, 21% 감소하였다. 엽장과 엽폭은 철 20 mg/ℓ 처리 시 7.3, 3.2 cm로 가장 큰 값을 나타냈다. 엽록소 함량은 철 처리량이 증가할수록 증가하다가 철 100 mg/ℓ 이상의 처리부터 감소하는 경향을 나타냈는데 200 mg/ℓ 처리 시 대조구 2 mg/ℓ 비해 30% 감소하였다. 지상부 생체중은 역시 고농도의 철 처리 시 감소하는 경향이 뚜렷했는데 200 mg/ℓ 처리 시 대조구 대비 약 27% 감소하였다.

근중은 다른 생육 특성에 비해 철 농도 증가에 따른 감소 경향이 특히 눈에 띄었는데, 철 200 mg/ℓ 처리 시 대조구에 비해 약 55%나 감소하였다. 고농도의 철 함량이 근중을 감소시키는 것으로 보아 수량 감소에도 깊은 관련이 있을 것으로 판단된다. 본 실험에서 인삼의 생육 특성은 전반적으로 철 20 mg/ℓ 처리 시 대조구와 비슷하거나 더 우수하였다. 그러나 20 mg/ℓ 처리에서도 잎에 생리장해 증상이 나타나기 시작한 점으로 미루어 보아, 철은 2-20 mg/ℓ 범위로 처리해야 과잉 증상 없이 안정적인 생육을 도모할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 4. Concentration of mineral nutrients in the aerial and root of 2-year-old ginseng grown for 60 days at different Fe levels.

Part	Fe (mg/ℓ)	T-N	P ₂ O ₅	K	Ca	Mg	Fe	B	Mn	Zn	Cu
		%					mg/kg				
Leaf	2	2.6 ^{d*}	0.5 ^b	3.5 ^a	0.9 ^b	0.2 ^c	86.7 ^c	34.9 ^a	81.8 ^a	17.9 ^c	6.1 ^c
	20	2.8 ^c	0.6 ^a	3.4 ^b	1.0 ^a	0.2 ^d	120.7 ^c	32.1 ^b	47.7 ^c	16.7 ^d	5.5 ^d
	100	2.9 ^b	0.6 ^a	3.3 ^b	0.8 ^c	0.2 ^b	898.9 ^b	28.5 ^c	42.4 ^d	25.7 ^b	7.0 ^b
	200	3.2 ^a	0.6 ^a	3.3 ^b	0.7 ^d	0.2 ^a	2,948.8 ^a	20.1 ^d	57.5 ^b	36.0 ^a	10.9 ^a
Root	2	2.2 ^d	0.5 ^d	1.8 ^d	0.3 ^d	0.2 ^c	139.9 ^c	15.7 ^b	218.7 ^a	16.9 ^b	5.4 ^c
	20	2.5 ^c	0.6 ^c	2.1 ^c	0.3 ^c	0.2 ^c	280.2 ^b	12.9 ^c	69.8 ^b	15.0 ^c	5.5 ^c
	100	3.1 ^b	0.7 ^b	2.4 ^b	0.3 ^b	0.2 ^b	275.2 ^b	22.9 ^a	44.8 ^c	16.9 ^b	6.0 ^b
	200	3.7 ^a	0.8 ^a	2.6 ^a	0.4 ^a	0.3 ^a	1,017.5 ^a	15.1 ^b	44.9 ^c	17.9 ^a	7.4 ^a

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

3. 붕소 및 철 농도에 따른 인삼 지상부 및 지하부 무기원소 함량

과잉 피해를 유발하는 식물체 내 붕소 함량은 작물에 따라 큰 차이를 보인다. 식물체의 잎에는 보통 40 - 100 mg/kg 범위의 붕소가 함유되어 있고 잎의 붕소 함량이 250 mg/kg 의 범위일 때 대부분 작물에서 과잉 피해가 유발되며, 심각한 붕소 과잉의 조건이 주어졌을 때 잎의 붕소 농도는 700 - 1,000 mg/kg 범위까지도 될 수 있다 (Nable *et al.*, 1997). Proctor와 Shelp (2014)는 포트에 붕소 5 mg/ℓ 을 양액을 약 3개월 동안 미국삼의 종자에 처리했을 때 잎에 붕소함량이 270 mg/kg 이었을 때 과잉 증상이 나타났다고 보고하였다. 그러나 본 실험에서 30 mg/ℓ 처리 시에 인삼 잎의 붕소 함량이 330.8 mg/kg 로 분석되었지만 과잉 증상은 나타나지 않았다. 높은 붕소함량에도 잎에 과잉 증상이 직접적으로는 나타나지 않은 것으로 보아 인삼은 붕소에 극히 민감한 작물은 아니며 증상 발현의 속도가 다른 작물에 비해 오래 걸리는 것으로 판단된다. 붕소 처리 농도가 증가할수록 잎의 붕소 함량이 뚜렷하게 증가하여 150, 300 mg/ℓ 처리구에서는 1,922.6, 2,880.6 mg/kg 으로 높게 분석되었다.

뿌리에서도 또한 붕소 처리 농도가 증가할수록 뿌리의 붕소 함량이 증가하였다 (Table 3). 처리에 따라 잎의 붕소함량이 더 높게 분석되었는데 잎과 뿌리의 붕소 함량은 적게는 2 배에서 많게는 8 배 정도까지도 차이가 났다. Choi 등 (2012)은 딸기 재배 시 붕소 처리 농도가 증가할수록 잎의 인산 함량이 감소한다고 하였는데 인삼의 잎과 뿌리에서는 그 경향이 일치하지 않았다. 잎에서는 붕소 처리 농도가 증가할수록 철 함량과 아연, 구리 등의 함량이 증가하는 경향을 보였다. 망간 함량은 붕소 150 mg/ℓ 처리 시 110.0 mg/kg 까지 증가하였으나 300 mg/ℓ 처리 시에는 47.1 mg/kg로 급격히 감소하였다. 이러한 경향은 뿌리에서도 비슷하게 나타났다. 음이온인 붕소의 처리 농도가 증가하여 흡수량이 증가할 때 양이온의 흡수

량 또한 증가하는 상호작용에 기인한 것인지는 추후 보완 연구가 필요한 부분이라고 생각된다 (Marschner, 2012). 이상의 결과, 2 년생 인삼 잎에 붕소함량이 약 1,900 mg/kg 이상일 때 잎에 뚜렷한 과잉증상이 나타난다고 판단된다.

작물 지상부의 철 함량이 평균 100 mg/kg 일 때 생육에 충분하다고 하였고, 잎의 철 함량이 500 mg/kg 이상일 때 과잉 증상이 나올 수 있다고 하였다 (Marschner, 2012; Yamauchi, 1989). Lee (2014) 등이 6 년생 연풍 품종을 이용하여 산화철 2%, 환원철 2% 및 구연산 4% 수용액을 토양에 관주하여 갈반형 황증을 뚜렷하게 유발시킨 후 잎을 채취하여 철 함량을 조사한 결과 각 484, 507 및 529 mg/kg 이었다. Table 4 와 같이 본 실험에서는 잎에 철의 과잉 증상이 나타나지 않았던 2 년생 인삼 잎의 철 함량은 86.7 mg/kg, 철 과잉 증상이 나타나기 시작한 20 mg/ℓ 잎의 철 함량은 120.7 mg/kg 으로 황증이 발생하지 않은 2, 3 년생 인삼 잎의 철 함량은 166.9 mg/kg, 황증이 발생했던 2, 3 년생 인삼 잎의 철 함량은 833.9 mg/kg 이었던 결과와 다소 다른 경향이 나타났다 (RDA, 2012). 처리에 의해 잎의 철 함량이 증가할수록 붕소 함량은 감소하였고 총 질소 함량은 증가하였는데 철 처리 시 잎의 총 질소 함량과 인산 함량이 유의적으로 감소했다는 Lee 등 (2014)의 결과와는 일치하지 않았다.

뿌리가 무르고 썩는 증상이 나타나기 시작한 철 100 mg/ℓ 처리 시 철 함량은 275.2 mg/kg 으로 증상이 나타나지 않았던 철 20 mg/ℓ 처리 시 철 함량 280.2 mg/kg 와 유의한 차이가 없었는데 이에 관해서는 흡수된 원소 함량 외에 다른 원인이 있을 것으로 추정되며 추후 연구가 필요할 것으로 보인다. 철 함량이 증가할수록 망간 함량은 감소한 반면 총 질소, 인산, 칼륨, 칼슘, 구리의 함량은 증가하였다. 잎과 뿌리의 식물체 분석을 종합해보면, 인삼에 철 과잉 증상이 발생하는 철 농도는 잎은 약 120 mg/kg, 뿌리는 약 270 mg/kg 전후로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청에서 주관하는 인삼 필수원소 간 길항 작용 구명에 관한 연구(과제번호: PJ01097802)의 연구비 지원으로 수행된 결과로 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Choi JM, Nam MH and Kim DY.** (2012). Characterization of toxicity symptom and determination of tissue threshold levels of boron for diagnostic criteria in domestically bred strawberries. *Korean Journal of Horticultural Science and Technology*. 30:144-151.
- Chung YR, Ohh SH, Lee IH and Park CS.** (1985). Studies on the biological and chemical properties of rusty ginseng root and its causal mechanism. *Journal of Ginseng Research*. 9:24-35.
- De Dorlodot S, Lutts S and Bertin P.** (2005). Effects of ferrous iron toxicity on the growth and mineral composition of an interspecific rice. *Journal of Plant Nutrition*. 28:1-20.
- Fourcroy P, Vansuyt G, Kushnir S, Inzé, D and Briat JF.** (2004). Iron-regulated expression of a cytosolic ascorbate peroxidase encoded by the *APX1* gene in arabidopsis seedlings. *Plant Physiology*. 134:605-613.
- Halliwell B and Gutteridge JMC.** (1992). Biologically relevant metal ion-dependent hydroxyl radical generation. *FEBS Letter*. 307:108-112.
- Havlin JL, Tisdale SL, Nelson WL and Beaton JD.** (2013). Soil fertility and fertilizers 8th(ed). Pearson. NJ, USA. p.286-291.
- 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 Medicinal Crop Science*. 17:439-444.
- Jang IB, Hyun DY, Lee EH, Park KC, Yu J, Park HW, Lee SW and Kim GH.** (2014). Analysis of growth characteristics and physiological disorder of Korean ginseng affected by application of decomposing plant residues in paddy-converted field. *Korean Journal of Medicinal Crop Science*. 22:140-146.
- Jang IB, Hyun DY, Lee SW, Kim YC, Kim JU, Park GC, Bang KH and Kim KH.** (2013). Analysis of growth characteristics and physiological disorder of Korean ginseng affected by application of manure in paddy-converted field. *Korean Journal of Medicinal Crop Science*. 21:380-387.
- Kang SW, Yeon BY, Hyeon GS, Bae YS, Lee SW and Seong NS.** (2007). Changes of soil chemical properties and root injury ratio by progress years of post-harvest in continuous cropping soils of ginseng. *Korean Journal of Medicinal Crop Science*. 15:157-161.
- Kim JM, Kim J, Chon HG, Park ES, Jeong JS and Choi JM.** (2010). Influence of potassium concentrations in fertilizer solution on the growth, appearance of physiological disorder and tissue nutrient contents of eggplant(*Solanum melongena* L.). *Korean Journal of Horticultural Science and Technology*. 28:743-749.
- Kim JU, Hyun DY, Kim YC, Lee JW, Jo IH, Kim DH, Kim KH and Shon JK.** (2015). Effects of salt in soil condition on chlorophyll fluorescence and physiological disorder in *Panax ginseng* C. A. Meyer. *Korean Journal of Medicinal Crop Science*. 23:446-453.
- Kim SA and Guerinot ML.** (2007). Mining iron: Iron uptake and transport in plants. *FEBS Letters*. 581:2273-2280.
- Korea Ginseng and Tobacco Research Institute(KGTRI).** (1982). Studies on physiological disorders of ginseng. Daejeon, Korea. p.159-186.
- Lee IH, Yuk CS and Park H.** (1989a). Yield and missing plant rate of *Panax ginseng* affected by the annual change in physico-chemical properties of ginseng cultivated soil. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*. 22:18-24.
- Lee IH, Yuk CS, Han KW, Nam KY and Bae HW.** (1980b). Influence of soil chemical properties in ginseng field on the growth and the yield of ginseng. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*. 13:99-105.
- Lee IH, Yuk CS, Han KW, Park CS, Park HS and Nam KY.** (1980a). Influence of various soil characteristics in ginseng field on the growth and the yield of ginseng(*Panax ginseng* C. A. Meyer). *Journal of Ginseng Research*. 4:175-185.
- Lee JC, Lee IH and Hahn WS.** (1984). Statistic model by soil physico-chemical properties for prediction of ginseng root yield. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*. 17:371-374.
- Lee SW, Park KC, Lee SH, Jang IB, Park KH, Kim ML, Park JM and Kim KH.** (2014). Effect of ferric and ferrous iron irrigation on brown-colored symptom of leaf in *Panax ginseng* C. A. Meyer. *Korean Journal of Medicinal Crop Science*. 22:32-37.
- Lee SW, Park KC, Lee SH, Park JM, Jang IB and Kim KH.** (2013). 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 TS, Kim MS and Hong SK.** (1989b). Studies on the marginal leaf chlorosis of ginseng plant: 1. The effect of excess manganese uptake on the occurrence of marginal leaf chlorosis. *Journal of Ginseng Research*. 13:105-113.
- Lee TS, Mok SK, Cheon SK, Choi KJ and Choe JY.** (1995). Chemical components of rusty root of ginseng. *Journal of Ginseng Research*. 19:77-83.
- Marschner P.** (2012). Marschner's mineral nutrition of higher plants 3th(ed). Academic Press. CA, USA. p.191-243.
- Martin JH, Coale KH, Johnson KS, Fitzwater SE, Gordon RM, Tanner SJ, Hunter CN, Elrod VA, Nowicki JL, Coley TL, Barber RT, Lindley S, Watson AJ, Van Scoy K, Law CS, Liddicoat MI, Ling R, Stanton T, Stockel J, Collins C, Anderson A, Bidigare R, Ondrusek M, Latasa M, Millero FJ, Lee K, Yao W, Zhang JZ, Friederich G, Sakamoto C, Chavez F, Buck K, Kolber Z, Greene R, Falkowski P, Chisholm SW, Hoge F, Swift R, Yungel J, Turner S, Nightingale P, Hatton A, Liss P and Tindale NW.** (1994). Testing the iron hypothesis in ecosystems of the equatorial pacific ocean. *Nature*. 371:123-129.
- Nable RO, Bañuelos GS and Paull JG.** (1997). Boron toxicity. *Plant and Soil*. 193:181-198.
- Park H, Mok SK and Kim KS.** (1982). Relationship between soil moisture, organic matter and plant growth in ginseng plantations.

- Korean Journal of Soil Science and Fertilizer. 15:156-162.
- Park H.** (1982). Water physiology of *Panax ginseng* III: Soil moisture, physiological disorder, diseases, insects and quality. Journal of Ginseng Research. 6:168-203.
- Proctor JTA and Shelp BJ.** (2014). Effect of boron nutrition on American ginseng in field and in nutrient cultures. Journal of Ginseng Research. 38:73-77.
- Rural Development Administration(RDA).** (2012). Theory and practice of ginseng cultivation in paddy field. Rural Development Administration. Eumseong, Korea. p.95-107.
- Rural Development Administration(RDA).** (2014). Ginseng. Rural Development Administration. Suwon, Korea. p.237-246.
- Yamauchi M.** (1989). Rice bronzing in nigeria caused by nutrient imbalances and its control by potassium sulfate application. Plant and Soil. 117:275-286.
- Yermiyahu U and Ben-Gal A.** (2006). Boron toxicity in grapevine. Hort Science. 41:1698-1703.
- Zhang Y, Wang Q, Xu C, Sun H, Wang J and Li L.** (2016). Iron(Fe^{2+})-induced toxicity produces morphological and physiological changes in roots in *Panax ginseng* grown in hydroponics. Toxicological and Environmental Chemistry. 98:630-637.
- Zhou Y, Yang Z, Gao L, Liu W, Liu R, Zhao J and You J.** (2016). Changes in element accumulation, phenolic metabolism, and antioxidative enzyme activities in the red-skin roots of *Panax ginseng*. Journal of Ginseng Research. Seoul, Korea. 25:1-9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jgr.2016.06.001>(cited by 2017 May 15)