

ORIGINAL ARTICLE

고농도 아연 조건에서 수수-수단그라스 교잡종의 생장, 광합성 및 아연 제거능

오순자 · 고석찬^{1)*}

농촌진흥청 국립원예특작과학원 온난화대응농업연구소, ¹⁾제주대학교 생물학과 · 기초과학연구소

Growth, Photosynthesis and Zinc Elimination Capacity of a Sorghum-Sudangrass Hybrid under Zinc Stress

Soonja Oh, Seok Chan Koh^{1)*}

Agricultural Research Institute for Climate Change, RDA, Jeju 63240, Korea

¹⁾Department of Biology & Research Institute for Basic Sciences, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

Abstract

Plant biomass, photosystem II (PSII) photochemical activity, photosynthetic function, and zinc (Zn) accumulation were investigated in a sorghum-sudangrass hybrid (*Sorghum bicolor* × *S. sudanense*) exposed to various Zn concentrations to determine the elimination capacity of Zn from soils. Plant growth and biomass of the sorghum-sudangrass hybrid decreased with increasing Zn concentration. Symptoms of Zn toxicity, i.e., withering and discoloration of old leaves, were found at Zn concentrations over 800 ppm. PSII photochemical activity, as indicated by the values of F_v/F_m and F_v/F_o , decreased significantly three days after exposure to Zn concentrations of 800 ppm or more. Photosynthetic CO₂ fixation rate (A) was high between Zn concentrations of 100-200 ppm ($22.5 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), but it declined as Zn concentration increased. At Zn concentrations of 800 and 1600 ppm, A was 14.1 and $1.8 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively. The patterns of stomatal conductance (g_s), transpiration rate (E), and water use efficiency (WUE) were all similar to that of photosynthetic CO₂ fixation rate, except for dark respiration (R_d), which showed an opposite pattern. Zn was accumulated in both above- and below-ground parts of plants, but was more in the below-ground parts. Magnesium (Mg) and iron (Fe) concentrations were significantly low in the leaves of plants, and symptoms of Mg or Fe deficiency, such as a decrease in the SPAD value, were found when plants were treated with Zn concentrations above 800 ppm. These results suggest that the sorghum-sudangrass hybrid is able to accumulate Zn to high level in plant body and eliminate it with its rapid growth and high biomass yield.

Key words : Biomass, PSII photochemical activity, Photosynthetic CO₂ fixation rate, Zinc accumulation, Zn toxicity

1. 서론

아연은 호흡, 광합성, 식물호르몬 합성 등에 관여하

는 여러 효소들의 보조인자로 작용할 뿐만 아니라 (Chaoui et al., 1997; Broadley et al., 2007), 핵산과 단백질의 합성에 있어서도 중요한 역할을 한다

Received 10 June, 2016; Revised 4 August, 2016;

Accepted 12 August, 2016

*Corresponding author : Seok Chan Koh, Department of Biology & Research Institute for Basic Sciences, Jeju National University, Jeju 63241, Korea

Phone: +82-64-754-3528

E-mail: sckoh@jejunu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© 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.

(Hänsch and Mendel, 2009). 아연의 결핍시 식물은 빈약한 성장과 낮은 건조 중량을 보인다(Shrotri et al., 1981). 그러나 아연이 고농도로 존재할 때에는 세포막에 영향을 주며 투과성 증가, 전해질 용출 등을 초래할 수 있다(Foy et al., 1978; Kaya and Higgs, 2001). 또한 수분과 대다수의 미량원소들의 흡수를 감소시킨다(Sagardoy et al., 2009). 농업토양의 대부분은 농약이나 퇴비, 비료 등의 반복적인 사용, 부적절한 관리 등의 농업적 관행으로 인해 아연이 상당량 축적되어 있을 것으로 생각되고 있다(L'Herroux et al., 1997; Legros et al., 2013). 특히, 축분 퇴비나 액비를 활용한 영농이 이루어지고 있는 농경지에서는 구리와 함께 아연이 토양에 필요 이상으로 축적되고(L'Herroux et al., 1997; Penha et al., 2015), 작물로 흡수되어 농산물의 안전성에 있어서도 문제가 될 수 있다(Shute and Macfie, 2006). 이에 식품 및 환경안전지침을 보장하기 위한 시도로 농업토양에서 잠재적으로 유해한 금속의 허용 농도에 대한 기준이 제시되었으며(Shute and Macfie, 2006), 농산물의 안전성을 보장하고 농경지를 효과적으로 활용하기 위하여 토양에 과도하게 축적된 아연을 제거해야 할 필요가 있다. 더욱이, 제주도에서는 다년간 경작한 감귤원 토양에서 축분 퇴비와 농약의 살포 등으로 인해 아연의 함량이 높은 것으로 보고되고 있다(Oh, 1998).

중금속 오염 토양을 정화하는 방법으로는 크게 토양세척법, 토양세정법, 화학적 산화 환원법 등의 물리·화학적 처리기술과 식물이나 미생물 등을 이용한 생물학적 처리기술로 나눌 수 있다(Sikdar et al., 1998). 특히, 식물을 이용한 정화는 물리·화학적 정화보다 경제적이고 환경친화적으로 토양 내의 중금속을 제거하거나 감소시킬 수 있으며, 토양 안정화, 경관 조성 등의 부수적인 효과도 얻을 수 있다(Kumar et al., 1995; Mousavi et al., 2013). 식물 정화를 위해서는 오염된 토양에 중금속 과축적종을 식재하여 토양 내의 중금속을 제거하는데, 아연 과축적종으로는 제비꽃속의 *Viola calaminaria*와 말냉이속의 *Thlaspi calaminare*, *T. caerulescens* 등이 있다(Baker and Brooks, 1989). 그러나 이들 식물들은 생육속도가 느리고 바이오매스가 적기 때문에 식물정화용으로는 적합하지 않다. 본 연구진들이 전보에서 4종의 작물을 대상으로 종자 발

아와 초기생장에 미치는 고농도의 아연의 영향을 살펴본 바, 수수-수단그라스 교잡종(*Sorghum bicolor* × *S. sudanense*)이 아연에 내성을 가지고 있는 것으로 나타났다(Oh and Koh, 2015). 뿐만 아니라 고온이나 건조 등의 스트레스에도 강하고 여러 가지 중금속에 대해서 내성을 가지고 있다(Mousavi et al., 2013). 또한 생장이 빠르고, 건물 생산성이 크기 때문에 축적되는 아연의 함량도 바이오매스에 비례하여 많아질 수 있어 오염된 토양 내에서 아연을 효율적으로 제거할 수 있을 것으로 보인다.

따라서, 본 연구에서는 다양한 농도의 아연을 처리하였을 때 수수-수단그라스 교잡종의 바이오매스와 광합성의 변화, 무기물 흡수 등을 조사하여 고농도 아연 조건 하에서 아연 제거능을 알아보고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 식물재료 및 재배조건

본 실험에 사용한 식물재료는 수수-수단그라스 교잡종(*Sorghum bicolor* Moench × *S. sudanense* (L.) Moench cv. TE-Haygrazer)이며, 균일한 크기의 종자들을 선별하여 표면을 살균한 후 배양용 상토가 들어 있는 50구 육묘용 플러그 트레이에 종자를 1립씩 파종하여 자연광 하에서 $20 \pm 1^\circ\text{C}(\text{day})/15 \pm 1^\circ\text{C}(\text{night})$ 의 조건으로 육묘하였다. 파종 30일 후에 균일하게 자란 유식물체를 선발하여 화분에 정식하고, $20 \pm 1^\circ\text{C}$, 60-70% 상대습도, $800 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (16 h light/8 h dark) 조건으로 설정된 배양실에서 5일간 순화시켰다. 이후 건전한 상태의 식물체들을 무작위적으로 선발하여 다양한 농도(0, 100, 200, 400, 800, 1600 ppm)의 아연을 처리하여 재배하면서, 식물의 생육 및 광합성 특성, 그리고 무기염류 축적능 등을 조사하였다. 재배 기간 동안 매일 증류수를 사용하여 토양이 마르지 않게 관리하였으며, 7일 간격으로 20% Hoagland's 용액(Hoagland and Arnon, 1950)을 공급하였다.

2.2. 생육특성 조사

식물의 생육특성은 아연 처리 후 5일째 각 처리구 별로 무작위로 10개체 씩 선발하여 식물체의 길이와 바이오매스, 그리고 잎의 특성을 조사하였다. 식물의

바이오매스는 지상부와 지하부로 구분하여 각각 길이와 생체량을 측정 후, 70 °C 건조실에서 5일간 건조시켜 건중량을 조사하였다. 잎의 특성은 아연 처리 후 1일 간격으로 5-6번째 성숙한 잎을 대상으로 엽록소계(SPAD-502, Minolta Co., Osaka, Japan)를 사용하여 SPAD 값을 측정하였으며, 색도는 5일째의 잎을 대상으로 색차계(CE-310, Macbeth, Minolta, Japan)를 이용하여 Hunter 방식에 의한 L (lightness), a (redness), b (yellowness) 값을 측정하였다.

2.3. 광계II 활성 및 광합성 특성의 분석

광계II 활성은 아연 처리 후 1일 간격으로 각 처리구별로 10개체를 무작위로 선발하여 성숙한 잎을 대상으로 엽록소형광분석기(Plant Efficiency Analyzer, Hansatech Instrument Ltd., King's Lynn, UK)를 이용하여 분석하였다. 즉, 15분간 광을 차단하여 암적응시킨 후, 1500 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 광량을 5초간 조사하여 F_0 , F_m , F_v/F_0 , F_v/F_m 등의 형광변수들을 측정하고 분석하였다. 광합성 특성은 휴대용 CO_2 분석장치(LCpro⁺ Portable Photosynthesis System, ADC Bio Scientific Ltd., Hoddesdon, UK)를 사용하여 측정하였다. 광합성률(photosynthetic rate, A), 기공전도도(stomatal conductance, g_s), 증산률(transpiration rate, E), 증기압차(leaf-to-air vapour pressure deficit, VPD) 등은 아연 처리 후 5일째에 5-6번째 성숙한 잎을 챔버에 물리고 5분간 안정화시키고, 1200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 포화광을 비추어 측정하였다. 호흡률(dark respiration, R_d)은 광합성률과 같은 방법으로 측정하였으며, 포화광을 비추는 대신에 암조건을 유지하였다. 그리고, 수분이용효율(water use efficiency, WUE)은 증산률에 대한 광합성률로 산출하였다.

2.4. 토양 및 식물체내 무기성분 함량의 분석

무기성분 함량은 아연을 농도별로 처리하여 5일간 배양한 후 식물체와 토양을 채취하여 농촌진흥청 농업과학기술원 표준분석법에 준하여 분석하였다(NIAST, 2000). 식물체는 지상부와 지하부로 구분하여 건조시키고 blender로 균일하게 마쇄하여 시료로 사용하였으며, 토양은 이물질을 제거하여 건조시키고 1 mm 표준체를 통과시켜 얻은 균일한 분말상태의 것

을 시료로 사용하였다. 전 질소함량은 Kjeldahl 법, 유효인산은 Lancaster 법에 의해 분석하였으며, 치환성 양이온(K, Ca, Mg, Na)과 중금속(Fe, Mn, Zn, Cu)은 분해용액($\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{SO}_4:\text{HClO}_4=10:1:4$)을 첨가하여 전 처리 및 여과과정을 거친 후 유도결합플라즈마 발광광도계(Inductively Coupled Plasma Spectrophotometry-Mass, ICP-Integra XL, GBC Scientific Equipment Pty Ltd., Victoria, Australia)를 이용하여 분석하였으며, 건물중 1 g당 함량으로 제시하였다.

2.5. 통계분석

모든 통계분석은 SPSS 통계 패키지 18.0(SPSS, Chicago, IL, USA)를 이용하여 수행하였으며, ANOVA에 이어서 Duncan의 다중검정($p < 0.05$)을 수행하여 평균치 간의 차이에 대한 유의성을 검정하였다.

3. 결과

3.1. 식물의 생육 특성

아연은 수수-수단그라스 교잡종 유식물체의 지상부 및 뿌리 생장, 바이오매스에 모두 영향을 주었으며, 농도가 높아짐에 따라 억제 정도가 더 크게 나타났다(Fig. 1). 뿌리는 대조구보다 100-200 ppm의 아연 처리구에서 더 크게 자랐으며, 400 ppm 이상의 농도에서는 뿌리 길이가 다소 짧았다(Fig. 1A). 뿌리의 건중량은 100-200 ppm에서는 대조구와 비슷하였고, 400 ppm 이상의 농도에서는 농도가 높아짐에 따라 크게 감소하였다(Fig. 1B). 지상부의 건중량은 200 ppm의 농도에서 대조구에 비해 더 무거웠으나 아연의 농도가 증가함에 따라 대체로 낮아졌다(Fig. 1C). 식물체 전체의 바이오매스는 200 ppm 이하의 농도에서는 대조구와 유사하거나 오히려 더 높았으며, 400 ppm 이상의 농도에서는 농도가 증가함에 따라 비례적으로 감소하였다(Fig. 1D). 대체로 200 ppm의 아연 처리시 대조구보다 뿌리 생장이나 식물체의 건중량에 있어 우호적으로 작용하였다. 그러나 400 ppm 이상의 농도에서 5일 이상 재배하였을 때 잎이 점차 시들면서 황화 현상이 나타났으며, 800 ppm 이상의 농도에서는 잎의 군데군데에 갈색 소반점들이 생겨났다. SPAD 값은 200 ppm 이하의 아연 처리구에서는 대조구와

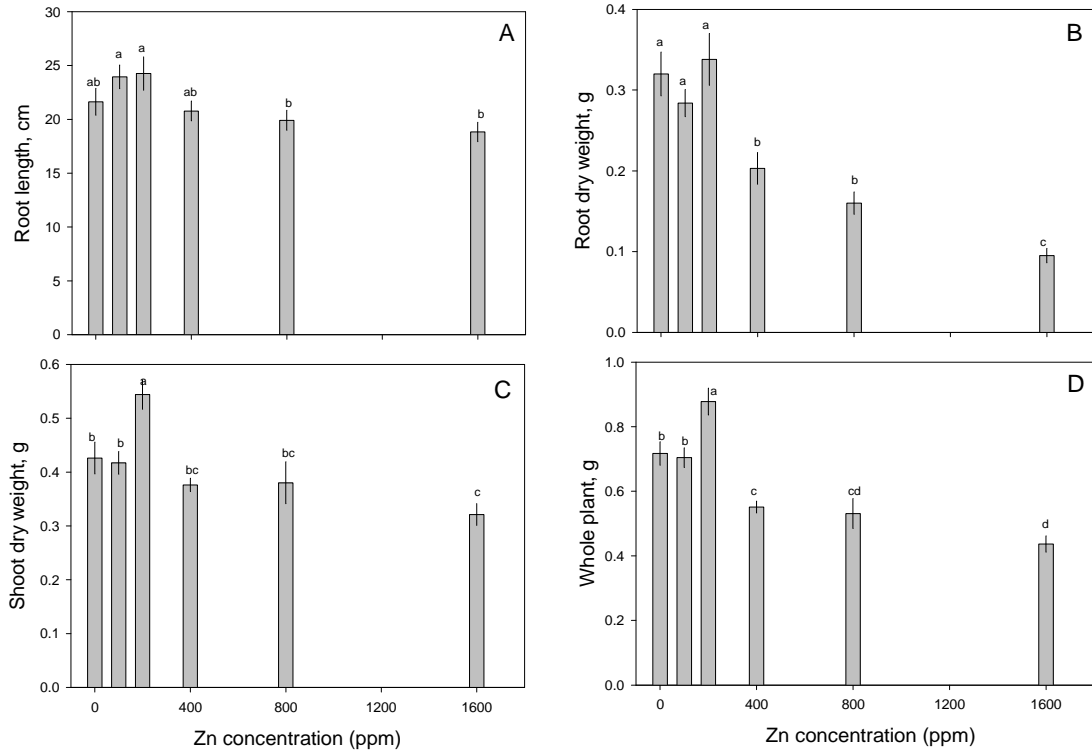


Fig. 1. Effects of zinc on root length (A), root biomass (B), shoot biomass (C), and whole-plant biomass (D) of sorghum-sudangrass hybrid (*Sorghum bicolor* × *S. sudanense*) plants grown for 5 days under various Zn concentrations. The values were represented as means ± SE of 10 independent measurements. The different letters above bars indicate statistically significant difference among different Zn concentrations ($p < 0.05$).

유사하게 재배기간 동안 큰 변화없이 높게 유지되었으나 800 ppm 이상의 농도에서는 처리 5일 후부터 SPAD 값이 30 이하로 낮아졌다(Fig. 2A). 그리고, 색도를 나타내는 변수들 중에 a 값이 800 ppm 이상의 농도에서 크게 증가하였다(Fig. 2B).

3.2. 엽록소형광 특성

광계II의 광화학적 효율, 즉 F_v/F_m 은 200 ppm 이하의 아연 처리구에서는 대조구와 유사하게 재배기간 동안 변화가 거의 없었으며, 대략 0.8를 상회하였다. 그러나 800 ppm 이상의 처리구에서는 3일 이후 0.7 이하로 크게 낮아졌다(Fig. 3A). 광계II의 잠재적 광합성능(F_v/F_o) 또한 F_v/F_m 값의 변화 패턴과 유사하였다(Fig. 3B). 최소형광 F_o 값은 아연의 농도와 배양 시간에 따라 대체로 증가하였으며, 특히, 800 ppm 이상의

아연 처리구에서 3일 이후에 크게 증가하였다(Fig. 3C). 반면에 F_m 은 400 ppm 이하로 낮은 아연 농도에서는 처리시간에 따라 서서히 증가하였으나 800 ppm 이상의 고농도에서는 처리시간이 길어짐에 따라 감소하는 양상을 보였다(Fig. 3D).

3.3. 광합성 특성

광합성률(A)은 100-200 ppm 아연 처리구에서 $22.5 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 높았으나 아연이 없는 조건과 아연의 농도가 증가함에 따라 점차 감소하였으며, 800 ppm과 1600 ppm 처리구에서 각각 $14.1 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 과 $1.8 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 낮았다. 반면에 호흡률(R_d)은 200 ppm 이하의 농도에서는 낮았으나 400 ppm 이상에서는 높았다. 기공전도도(g_s)와 증산률(E)도 광합성률의 변화와 유사하게 100-200 ppm에서

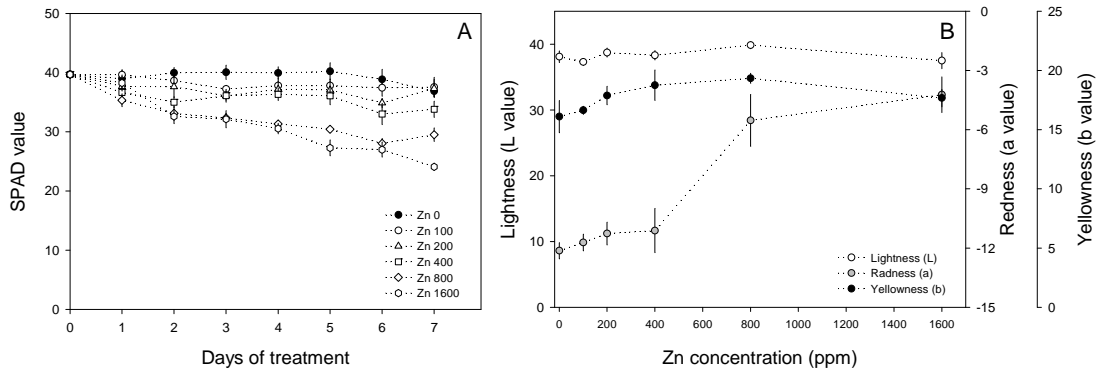


Fig. 2. Effects of zinc on the SPAD value (A) and surface color indexes (B) in leaves of sorghum-sudangrass hybrid (*Sorghum bicolor* × *S. sudanense*) plants grown for 5 days under various Zn concentrations. The values were represented as means ± SE of 10 independent measurements.

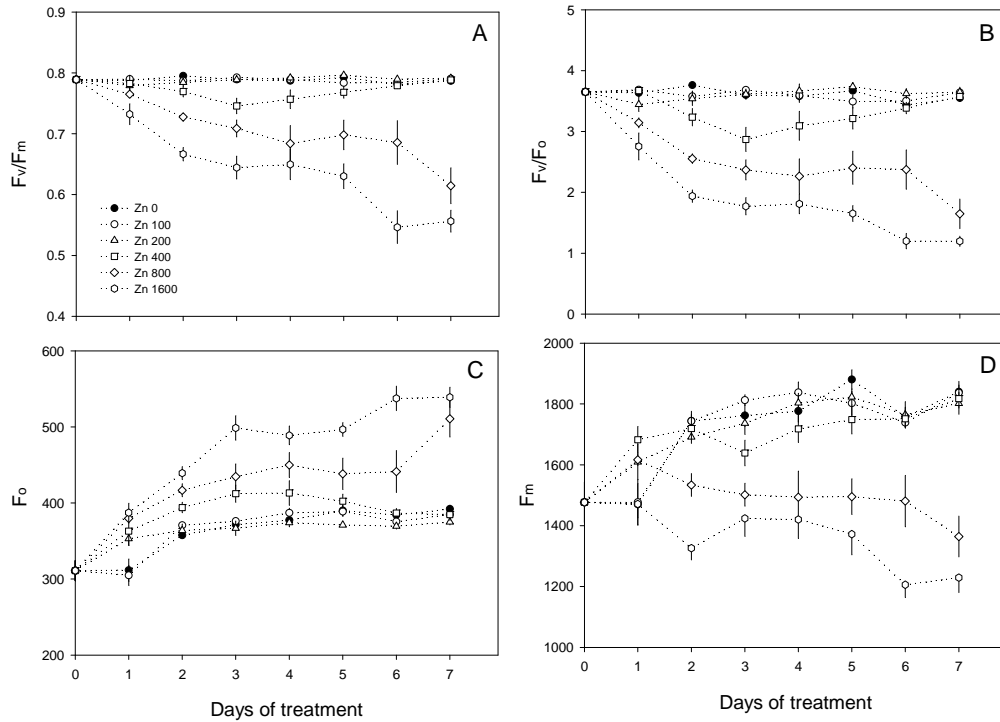


Fig. 3. Effects of zinc on chlorophyll a fluorescence (F_v/F_m , F_v/F_o , F_o , and F_m) of sorghum-sudangrass hybrid (*Sorghum bicolor* × *S. sudanense*) plants grown under various Zn concentrations. The values were represented as means ± SE of 10 independent measurements.

높고 아연이 없는 조건과 아연의 농도가 증가함에 따라 점차 감소하였다. 수분이용효율(WUE)도 아연의 농도가 증가함에 따라 점차 감소하여 800 ppm 이상의

농도에서 크게 감소하였다. 반면에 증기압차(VPD)는 증가하였다(Table 1).

Table 1. The photosynthetic characters obtained from leaves of sorghum-sudangrass hybrid (*Sorghum bicolor* × *S. sudanense*) plants grown for 5 days under various Zn concentrations

Photosynthetic parameters	Zn concentrations (ppm)					
	0	100	200	400	800	1600
Photosynthetic rate (A , $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	19.3 b	22.6 a	22.5 a	19.0 b	14.1 c	1.8 d
Dark respiration (R_d , $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	2.15 ab	1.85 a	2.34 ab	2.39 b	2.91 c	3.01 c
Stomatal conductance (g_s , $\text{mol H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	0.11 b	0.12 ab	0.13 a	0.11 b	0.06 c	0.02 d
Transpiration rate (E , $\text{mmol H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	1.29 b	1.42 a	1.49 a	1.23 b	0.79 c	0.29 d
Leaf-to-air vapour pressure deficit (VPD)	12.4 c	12.0 d	11.4 e	11.9 d	13.1 b	14.1 a
Intrinsic water use efficiency (WUE_i , $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{mmol H}_2\text{O}$)	15.0 ab	16.0 a	15.2 ab	16.0 a	13.0 b	4.0 c

The values of photosynthetic parameters were represented as means of 10 independent measurements.

The different letters in the same row indicate statistically significant difference among different Zn concentrations ($p < 0.05$).

3.4. 토양 및 식물체내 무기물 함량

수수-수단그라스 교잡종의 체내 아연의 함량은 지상부보다 뿌리 쪽에 더 많았으며, 양액 내 아연의 농도가 높을수록 체내에 축적되는 양 또한 크게 증가하고, 토양 중에도 아연이 고농도로 잔존하였다(Fig. 4). 다양한 농도의 아연을 처리하였을 때, 대량원소 중에 질소, 인산, 칼륨의 체내 함량은 뿌리에서보다 지상부에서 1.5배 가량 더 높았다. 그러나 토양 중에는 이들 성분들이 미량 존재하는 것으로 나타났다. 질소는 지상부, 지하부, 토양에서 모두 아연의 농도와 관계없이 그 함량이 변화가 없었으며, 인과 칼륨은 아연 농도와 관계없이 지상부에서는 그 함량이 대체로 일정하였으나 지하부에서는 고농도 아연 처리시 인은 다소 증가하고 칼륨은 크게 감소하는 것으로 나타났다. 토양에서는 고농도 아연 처리시 칼륨이 증가하였다. 칼슘, 마그네슘, 나트륨은 식물체에서 보다 토양에 더 많이 함유되었으며, 그중 칼슘과 마그네슘은 뿌리보다 지상부에 더 많이 흡수된 것에 반하여 나트륨은 오히려 뿌리 쪽에서 더 많았다. 그리고, 지상부의 칼슘과 마그네슘은 아연의 농도가 증가함에 따라 체내 흡수가 감소하였으며 나트륨은 오히려 고농도 아연 하에서 증가하였다. 미량원소 중에서는 철과 구리의 함량은 지상부보다 뿌리 쪽에 더 높았으며, 망간은 뿌리보다 지상부 쪽에 더 높았다. 그리고, 철은 고농도 아연 처리시 지상부나 지하부 모두에서 그 함량이 줄어들었으며 구

리는 오히려 지하부에서 그 함량이 더 높았다. 고농도의 아연을 처리하였을 때 생체내 망간의 함량은 영향을 받지 않았다(Table 2).

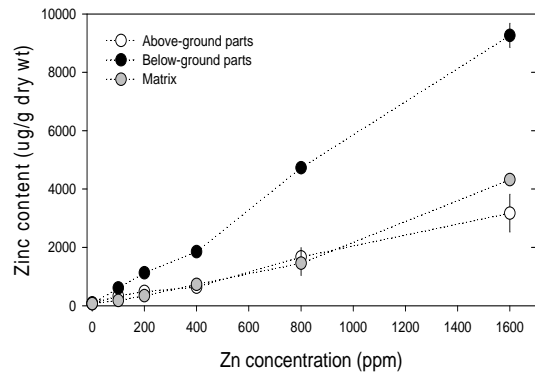


Fig. 4. Zinc contents in above-ground (leaves) and below-ground parts (roots), and nutrient matrix (soil) of sorghum-sudangrass hybrid (*Sorghum bicolor* × *S. sudanense*) plants grown for 5 days under various Zn concentrations. The values were represented as means ± SE of 5 independent measurements.

4. 고찰

아연은 식물체의 생장에 필요한 필수 미량원소이며 (Chaoui et al., 1997), 결핍이나 과다는 빈약한 생장과 낮은 건조 중량을 야기하며, 특히 아연이 과다하였을

Table 2. Contents of macro- and micro-nutrients in above-ground (leaves and stem) and below-ground parts (roots) of sorghum-sudangrass hybrid (*Sorghum bicolor* × *S. sudanense*) plants grown for 5 days under various Zn concentrations and its nutrient matrix (soil)

Analyzed materials	Zn concentrations (ppm)	Macro-nutrients (g · kg ⁻¹ DW)					Micro-nutrients (mg · kg ⁻¹ DW)				
		N	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Mn	Cu	
Above-ground parts (leaves & stem)	0	20.1 a	6.5 b	23.9 a	3.5 ab	3.9 ab	0.5 c	152.3 a	82.9 a	7.9 a	
	100	24.5 a	7.1 ab	23.9 a	3.7 ab	4.0 a	0.7 c	129.8 ab	84.5 a	8.8 a	
	200	23.0 a	6.8 ab	23.3 a	3.8 a	4.1 a	0.6 c	136.1 ab	87.5 a	8.7 a	
	400	24.6 a	7.6 ab	23.1 a	3.5 ab	3.8 ab	0.6 c	122.3 ab	89.6 a	9.5 a	
	800	24.2 a	7.4 ab	20.4 a	2.9 c	3.2 c	1.2 b	102.7 b	69.1 a	8.9 a	
	1600	25.9 a	7.9 a	25.1 a	3.3 b	3.4 bc	2.2 a	104.0 b	76.8 a	9.1 a	
Below-ground parts (roots)	0	14.1 a	2.8 b	19.4 a	3.0 a	2.3 a	2.4 a	851.6 a	64.4 a	11.0 b	
	100	15.9 a	3.3 b	18.6 a	2.9 a	2.7 a	2.8 a	895.4 a	70.7 a	12.4 b	
	200	15.7 a	3.2 b	19.9 a	3.0 a	2.7 a	2.8 a	858.9 a	68.9 a	12.7 b	
	400	15.3 a	3.5 ab	16.9 ab	3.3 a	3.1 a	3.0 a	927.3 a	75.2 a	16.7 ab	
	800	15.8 a	4.1 ab	13.0 bc	3.5 a	2.7 a	2.6 a	676.3 b	61.3 a	26.2 ab	
	1600	18.0 a	5.0 a	11.6 c	4.0 a	3.3 a	3.2 a	849.4 ab	77.7 a	33.0 a	
Matrix (soil)	0	4.5 a	0.73 b	7.7 b	7.5 a	4.0 a	4.1 ab	1645.9 a	92.3 ab	10.9 a	
	100	4.5 a	0.79 ab	8.0 b	7.6 a	4.4 a	4.2 ab	1718.9 a	106.6 a	11.4 a	
	200	4.1 b	0.77 ab	8.1 b	7.6 a	4.3 a	3.9 abc	1768.5 a	89.0 ab	11.9 a	
	400	4.4 ab	0.77 ab	8.9 a	7.4 a	4.2 a	4.4 a	1485.7 a	92.0 ab	11.2 a	
	800	3.9 b	0.82 a	8.9 a	7.4 a	4.0 a	3.8 bc	1486.7 a	96.3 ab	11.0 a	
	1600	3.8 b	0.77 ab	9.0 a	7.7 a	4.1 a	3.6 c	1343.6 a	76.0 b	11.1 a	

The values of macro- and micro-nutrients were represented as means of 5 independent measurements. The different letters in the same column in each part indicate statistically significant difference among different Zn concentrations ($p < 0.05$).

때에는 뿌리 생장이 강하게 억제된다(Shrotri et al., 1981). 본 연구에서도 비교적 낮은 농도인 200 ppm의 아연 처리는 아연을 처리하지 않은 대조구보다 뿌리 생장이나 식물체의 건중량에 있어 우호적으로 작용하였다. 그러나 400 ppm 이상의 높은 농도에서 5일 이상 재배하였을 때에는 뿌리 길이가 짧아지고 건중량이 감소하는 등 생육이 억제될 뿐만 아니라 잎이 점차 시들면서 황화 현상이 나타났으며, 800 ppm 이상의 농도에서는 잎의 근태근태에 갈색 소반점들이 생겨났다. 이러한 형태적 증상은 Fig. 2B에서 살펴본 바와 같이 800 ppm 이상의 고농도 아연 하에서는 SPAD 값이 30 이하로 낮아지는 것으로도 확인할 수 있었다. 고농도의 아연에서 뿌리 생장의 억제는 호밀풀(*Lolium perenne*)에서처럼 수분과 무기염류 흡수의 감속을 유도하여 결과적으로 식물체의 생장에 영향을 미치는 것으로 보인다(Monnet et al., 2001).

일반적으로 F_v/F_m 값이 0.8보다 낮을 때는 광계II의 반응중심이 손상을 입은 상태이거나 불활성상태에 처해있다고 보고 있음에 비추어 보았을 때(Björkman and Demmig, 1987), 800 ppm 이상의 아연은 F_v/F_m 의 감소를 야기하여 수수-수단그라스 교잡종이 스트레스를 받고 있음을 알 수 있다. 이는 광계II에서 활성상태의 반응중심의 크기와 밀도를 나타내는 지표인 F_v/F_o 의 감소로도 알 수 있다(Kriedemann et al., 1985). 이러한 광계II 활성의 감소는 고농도 아연이 활성산소종의 발생을 야기한 결과로 판단된다(Sagardoy et al., 2009; Jain et al., 2010). 녹조류에서도 카드뮴(Cd^{2+}), 코발트(Co^{2+}) 등 중금속에 노출되었을 때 F_v/F_m 과 F_v/F_o 이 감소하는 것으로 보고되었다(Mallick and Mohn, 2003). 그리고, 고농도의 아연은 호흡률(R_d)의 증가와 광합성률(A), 기공전도도(g_s)와 증산률(E) 등의 감소를 야기하였는데, 사탕무(*Beta vulgaris* L.)의 잎에서도 고농도의 아연이 잎의 호흡률 증가, 광합성률과 기공전도도의 감소를 유도하였다(Sagardoy et al., 2010). 아연에 대한 반응 중에 광합성률과 증산률의 감소는 기공 폐쇄와 직접적으로 관련이 있을 것이며, 수수-수단그라스 교잡종은 800 ppm 이상의 아연에서는 수분이용효율(WUE)이 낮아져 건조에 대한 저항능력이 낮아져 수분손실이 많아질 수 있음을 짐작케 한다(Vaillant et al., 2005). *Spartina densiflora*에

서도 고농도의 아연에 의해 광합성률의 감소와 이로 인하여 수분이용효율 감소도 나타났다(Mateos-Naranjo et al., 2008). 따라서 고농도의 아연이 수수-수단그라스 교잡종의 생장에 있어서 뿌리를 통한 세포로의 수분 수송의 억제, 잎의 수분 함량의 감소 또는 공변세포의 발달과 기능의 변화를 야기하여 기공전도도의 감소 등이 일어나고, 궁극적으로는 광합성과 증산률의 감소를 초래하는 것으로 보인다(Bonnet et al., 2000; Sagardoy et al., 2010).

수수-수단그라스 교잡종은 고농도의 아연에 노출되었을 때, 상당량의 아연을 흡수하여 축적하는 것으로 조사되었으며, 특히 뿌리에 축적되는 양이 상당히 많았다(Fig. 4). 그리고, 아연의 농도가 증가함에 따라 수수-수단그라스의 지상부에서 칼슘, 마그네슘, 철 함량의 감소와 나트륨 함량의 증가, 그리고 지하부에서 칼륨 함량의 감소와 구리 함량의 증가가 특징적이었다. 이는 고농도의 아연 하에서 이들 2가 양이온들의 유사성으로 인해 식물체의 여러 부위에서의 국소적 경쟁에 의해 생리적 균형이 파괴된 결과로 볼 수 있다(Prasad, 1999). 본 연구에서 고농도 아연 조건에서 SPAD 값의 감소 또한 아연에 의해 유도된 마그네슘 또는 철 등의 흡수가 감소된 결과일 수 있다. 마그네슘은 엽록소분자의 필수 성분이며, 철은 엽록소 생합성에 필요한 성분인데, 체내 흡수율이 낮으면 엽록소 합성이 원활하지 않거나 분해가 일어나 궁극적으로는 광합성 효율이 낮아질 수 있다. Fig. 2와 Fig. 3에서 살펴본 바와 같이 고농도의 아연에서 SPAD 값의 감소와 F_v/F_m 값의 감소로 나타나며, 광합성률의 저하가 광계II의 구조적 변화나 기능 저하의 결과임을 보여준다. 고농도의 아연에 의한 증상으로는 잎 발달의 저해, 황백화 현상, 적갈색 색소 반점들의 출현 등이며, 심하면 조직이 괴사할 수 있다(Todeschini et al., 2011). 다른 중금속과 마찬가지로 아연도 고농도로 존재할 때에는 영양의 불균형을 포함하여 생장억제, 잎의 황백화 현상, 광합성 억제 등이 나타날 수 있다(Hassan and Aarts, 2011; Todeschini et al., 2011; Cambrollé et al., 2012). 수수-수단그라스 교잡종에서도 고농도의 아연을 처리하였을 때 생장 억제, 바이오매스 감소 등이 나타났으며, 잎의 노화도 빨리 진행되었다.

한편, 광합성률은 대조구에서보다 100-200 ppm 아

연에서 높아서 수수-수단그라스 교잡종의 생육에 있어서 필수원소로서의 기능을 수행하는 것으로 보이며, 그 이상의 농도에서는 독성으로 작용하여 생육장애를 일으키는 것으로 보인다. Fig. 1과 Fig. 2의 생육 특성과 Fig. 3과 Table 1의 광합성효율 등을 토대로 아연의 최적농도는 400 ppm 이하인 것으로 보이며, 그 이상의 농도에서는 생육 저해, 광합성률과 수분이용효율의 감소 등을 초래하였다.

이상의 결과를 종합해보면, 수수-수단그라스 교잡종의 생육에 있어 필수원소로 작용하는 아연의 최적농도는 400 ppm 이하인 것으로 보이며, 그 이상의 농도에서는 생육 저해, 광합성률과 수분이용효율의 감소 등을 초래하였다. 특히 800 ppm 이상의 아연을 처리하였을 때 잎에서 마그네슘과 철 함량이 감소하고, SPAD 값과 F_v/F_m 값이 감소하는 등 고농도의 아연에 의해 영향이 나타났다. 그리고 고농도의 아연에 의해 뿌리 생장이 억제되었으며, 이는 수분과 무기염류 흡수의 감소를 유도하여 결과적으로는 전체 식물체의 생장에 영향을 미치는 것으로 보인다. 그러나 양액 내 아연의 농도가 높을수록 체내에 축적되는 아연의 양이 크게 증가하였으며 뿌리 쪽에 더 많이 축적되는 양상을 보였다. 그리고, 수수-수단그라스 교잡종은 빠른 성장과 더불어 건물생산량이 크기 때문에 축적되는 아연의 함량도 생산량에 비례하여 많아져 농경지에 과다하게 축적된 아연을 효과적으로 제거할 수 있을 것으로 보인다.

5. 결론

본 연구는 수수-수단그라스 교잡종의 아연 제거능을 알아보기 위해 다양한 농도의 아연을 처리하여 배양하였을 때 식물체의 바이오매스와 광합성의 변화, 아연 축적능 등을 살펴보았다. 아연은 수수-수단그라스 교잡종의 생장과 바이오매스에 모두 영향을 주고 농도가 높아짐에 따라 억제의 정도가 컸으며, 800 ppm 이상의 고농도에서는 잎이 점차 시들면서 황화 현상이 나타났다. 광계II의 광화학적 효율(F_v/F_m)과 잠재적 광합성능(F_v/F_0)은 800 ppm 이상의 처리구에서 3일 이후에 크게 낮아졌다. 광합성률(A)은 100-200 ppm 아연 처리구에서 $22.5 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 높았

으나 아연의 농도가 증가함에 따라 점차 감소하여 800 ppm과 1600 ppm 처리구에서 각각 $14.1 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 과 $1.8 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 매우 낮았다. 그리고, 기공전도도(g_s), 증산률(E)과 수분이용효율(WUE)도 광합성률의 변화와 유사하게 100-200 ppm에서 높고 아연의 농도가 증가함에 따라 점차 감소하였다. 반면에 호흡률(R_d)은 광합성률과는 반대의 양상을 보였다. 수수-수단그라스 교잡종의 체내 아연의 함량은 지상부보다 뿌리 쪽에 더 많았으며, 아연의 농도가 높을수록 체내에 축적되는 양이 크게 증가하였다. 그러나, 800 ppm 이상의 아연을 처리하였을 때 잎에서 마그네슘과 철 함량이 감소하고, SPAD 값과 F_v/F_m 값이 감소하는 등 고농도의 아연에 의해 마그네슘 또는 철 결핍 증상이 나타났다. 따라서, 수수-수단그라스 교잡종은 생장이 빠르고 건물생산량이 크기 때문에 축적되는 아연의 함량도 생산량에 비례하여 많아져 농경지 내 오염된 토양에서 중금속을 효율적으로 제거할 수 있을 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 2015년도 제주녹색환경지원센터의 지원에 의해서 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Baker, A. J. M., Brooks, R. R., 1989, Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements - A review of their distribution, ecology and phytochemistry, *Biorecovery*, 1, 81-126.
- Björkman, O., Demmig, B., 1987, Photon yield of O_2 evolution and chlorophyll fluorescence characteristic at 77K among vascular plant of diverse origins, *Planta*, 170, 489-504.
- Bonnet, M., Camares, O., Veisseire, P., 2000, Effects of zinc and influence of *Acremonium lolii* on growth parameters, chlorophyll a fluorescence and antioxidant enzyme activities of ryegrass (*Lolium perenne* L. cv. Apollo), *J. Exp. Bot.*, 51, 945-953.
- Broadley, M. R., White, P. J., Hammond, J. P., Zelko, I., Lux, A., 2007, Zinc in plants, *New Phytol.*, 173, 677-702.

- Cambrollé, J., Mancilla-Leytón, J. M., Muñoz-Vallés, S., Luque, T., Figueroa, M. E., 2012, Zinc tolerance and accumulation in the salt-marsh shrub *Halimione portulacoides*, *Chemosp.*, 86, 867-874.
- Chaoui, A., Mazhoudi, S., Ghorbal, M. H., Elferjani, E., 1997, Cadmium and zinc induction of lipid peroxidation and effects on antioxidant enzyme activities in bean (*Phaseolus vulgaris* L.), *Plant Sci.*, 127, 139-147.
- Foy, C. D., Chaney, R. L., White, M. C., 1978, The physiology of metal toxicity in plants, *Annu. Rev. Plant Physiol.*, 29, 511-566.
- Hänsch, R., Mendel, R. R., 2009, Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl), *Curr. opin. plant biol.*, 12, 259-266.
- Hassan, Z., Aarts, M. G. M., 2011, Opportunities and feasibilities for biotechnological improvement of Zn, Cd or Ni tolerance and accumulation in plants, *Environ. Exp. Bot.*, 72, 53-63.
- Hoagland, D. R., Arnon, D. I., 1950, The water-culture method for growing plants without soil, *Univ. of Calif. Agric. Exp. Stn. Circ.*, 347, 1-32.
- Jain, R., Srivastava, S., Solomon, S., Shrivastava, A. K., Chandra, A., 2010, Impact of excess zinc on growth parameters, cell division, nutrient accumulation, photosynthetic pigments and oxidative stress of sugarcane (*Saccharum* spp.), *Acta physiol. plant.*, 32, 979-986.
- Kaya, C., Higgs, D., 2001, Inter-relationships between zinc nutrition, growth parameters, and nutrient physiology in a hydroponically grown tomato cultivar, *J. plant nutrition*, 24, 1491-1503.
- Kriedemann, P. E., Graham, R. D., Wiskich, J. T., 1985, Photosynthetic dysfunction and in vivo changes in chlorophyll a fluorescence from manganese-deficient wheat leaves, *Aust. J. Agric. Res.*, 36, 157-169.
- Kumar, P. N., Dushenkov, V., Motto, H., Raskin, I., 1995, Phytoextraction: The use of plants to remove heavy metals from soils, *Environ. Sci. Technol.*, 29, 1232-1238.
- L'Herroux, L., Le Roux, S., Appriou, P., Martinez, J., 1997, Behaviour of metals following intensive pig slurry applications to a natural field treatment process in Brittany (France), *Environ. Pollu.*, 97, 119-130.
- Legros, S., Doelsch, E., Feder, F., Moussard, G., Sansoulet, J., Gaudet, J. P., Bottero, J. Y., 2013, Fate and behaviour of Cu and Zn from pig slurry spreading in a tropical water - soil - plant system, *Agri. Ecos. Environ.*, 164, 70-79.
- Mallick, N., Mohn, F. H., 2003, Use of chlorophyll fluorescence in metal-stress research: A case study with the green microalga *Scenedesmus*, *Ecotox. Environ. Saf.*, 55, 64-69.
- Mateos-Naranjo, E., Redondo-Gómez, S., Cambrollé, J., Luque, T., Figueroa, M. E., 2008, Growth and photosynthetic responses to zinc stress of an invasive cordgrass, *Spartina densiflora*, *Plant Biol.*, 10, 754-762.
- Monnet, F., Vaillant, N., Vernay, P., Coudret, A., Sallanon, H., Hitmi, A., 2001, Relationship between PSII activity, CO₂ fixation, and Zn, Mn, and Mg contents of *Lolium perenne* under zinc stress, *J. Plant Physiol.*, 158, 1137-1144.
- Mousavi, S. R., Galavi, M., Rezaei, M., 2013, Zinc (Zn) importance for crop production, *Intl. J. Agron. Plant Prod.*, 4, 64-68.
- NIAS (National Institute of Agricultural Science and Technology), 2000, Analytical methods of soil and plant. NIAS. Rural Development Administration (RDA), Suwon, Korea.
- Oh, M. H., 1998, Changes in copper and zinc content in volcanic ash soils with Years of Citrus cultivation, M.S. Degree, Jeju National University, Jeju, Korea.
- Oh, S., Koh, S. C., 2015, Copper and zinc uptake capacity of a sorghum-sudangrass hybrid selected for *in situ* phytoremediation of soils polluted by heavy metals, *J. Environ. Sci.*, 24, 1501-1511.
- Penha, H. G. V., Menezes, J. F. S., Silva, C. A., Lopes, G., de Andrade Carvalho, C., Ramos, S. J., Guilherme, L. R. G., 2015, Nutrient accumulation and availability and crop yields following long-term application of pig slurry in a Brazilian Cerrado soil, *Nutri. Cycling Agroeco.*, 101, 259-269.
- Prasad, M. N. V., 1999, Heavy metal stress in plants: from molecules to ecosystems, Springer, Berlin.
- Sagardoy, R., Morales, F., López-Millán, A. F., Abadía, A., Abadía, J., 2009, Effects of zinc toxicity on sugar beet (*Beta vulgaris* L.) plants grown in hydroponics, *Plant Biol.*, 11, 339-350.

- Sagardoy, R., Vázquez, S., Florez-Sarasa, I. D., Albacete, A., Ribas-Carbó, M., Flexas, J., 2010, Stomatal and mesophyll conductances to CO₂ are the main limitations to photosynthesis in sugar beet (*Beta vulgaris*) plants grown with excess zinc, *New Phytol.*, 187, 145-158.
- Shrotri, C., Rathore, V., Mohanty, P., 1981, Studies on photosynthetic electron transport, photophosphorylation and CO₂ fixation in Zn²⁺ deficient leaf cells of *Zea mays*, *J. Plant Nutri.*, 3, 945-954.
- Shute, T., Macfie, S. M., 2006, Cadmium and zinc accumulation in soybean: A threat to food safety?, *Sci. Total Environ.*, 371, 63-73.
- Sikdar, S. K., Grosse, D., Rogut, I., 1998, Membrane technologies for remediating contaminated soils: A critical review, *J. Membr. Sci.*, 151, 75-85.
- Todeschini, V., Lingua, G., D'Agostino, G., Carniato, F., Roccotiello, E., Berta, G., 2011, Effects of high zinc concentration on poplar leaves: A morphological and biochemical study, *Environ. Exp. Bot.*, 71, 50-56.
- Vaillant, N., Monnet, F., Hitmi, A., Sallanon, H., Coudret, A., 2005, Comparative study of responses in four *Datura* species to a zinc stress, *Chemosphere*, 59, 1005-1013.