

토양배지의 pH가 재배 및 자생 부추류의 생육과 양분흡수에 미치는 영향

구현희, 이상각, 장매희¹, 최종락, 이상은*

국립한경대학교 기후변화연구센터, ¹서울여자대학교 원예생명조경학과

Effects of pH of soil medium on the growth and nutrient absorption of cultivated and native Chinese chives plants

Hyun-Hwoi Ku, Sang Gak Lee, Mae-Hee Chiang¹, Jong-Lak Choi and Sang-Eun Lee*

Climate Change Research Center, Hankyong National University, Anseong 17579, Republic of Korea

¹Department of Horticulture, Biotechnology & Landscape Architecture, Seoul Women's University, Seoul 01797, Republic of Korea

*Corresponding author

Sang-Eun Lee

Tel. 031-670-5085

E-mail. selee@hknu.ac.kr

Received: 27 December 2018

Revised: 6 February 2019

Revision accepted: 15 February 2019

Abstract: This experiment was conducted to investigate the effects of pH on the mineral nutrient uptake and growth of the four Chinese chives species. The Chinese chives species used in the experiment were the cultivated species grown in the farm (cultivated *Allium tuberosum*) and three wild species of wild *Allium tuberosum*, *A. thunbergii* and *A. senescens*. The pH levels of soil medium were set to be 4.5, 6.5, and 7.5. Fresh weight (FW) of cultivated *A. tuberosum* was highest at all pH levels. The increase of soil pH increased the FW of the wild *A. tuberosum* and *A. thunbergii*, but no difference was noted for the *A. tuberosum* and *A. senescens*. Plant height was higher in the order of wild *A. tuberosum*, *A. thunbergii*, and cultivated *A. tuberosum* and *A. thunbergii*. Notably plant height of the wild *A. tuberosum* increased significantly by the pH increase. The Zn content of the wild *A. tuberosum* was shown to be significantly higher than that of the other species and increased with the increase of soil pH. This indicates that there is a close relationship between the plant height and Zn content in Chinese chives plant. Principal component analysis for characterizing closely related *A.* species using the factors of plant growth and amounts of nutrients uptake showed that the cultivated *A.* and wild *A. tuberosum* were in the 4th quadrant of the graph which are classified as the same species, while *A. senescens* and *thunbergii* was in 1st and 3rd quadrant indicating different species, respectively.

Keywords: soil, pH, nutrient absorption, native Chinese chives, plant growth

서 론

백합과 식물로 알려진 부추 (*Allium tuberosum* Rottler)는 29속 123종이 우리나라에서 자생하거나 재배되고 있다

(Park 2010). *A. tuberosum*의 인경은 밑 부분에 짧은 근경이 달리고, 화경은 길이 20~40 cm 정도에 이른다. 6~7월에 개화하며 화경 끝에 산형꽃차례가 달리며 꽃은 흰색이다. *A. thunbergii*의 인경은 길이 2 cm 정도의 난상 피침형으로 마

른 잎집에 싸여있고 외피는 약간 두꺼우며 갈색이 돈다. 단면이 삼각형인 잎은 지름이 2~5 mm 정도로 2~5개가 비스듬히 위로 퍼지고 흰빛이 도는 녹색이며, 생육 중에는 갈색을 띠는 분백색이기도 하다. 8~9월에 개화하며, 화경은 길이 30~60 cm 정도이고 끝에 산형꽃차례로 홍자색의 꽃이 많이 달린다. *A. senescens*의 인경은 길이 3 cm 정도의 난상 타원형이고 외피가 얇은 막질로서 섬유가 없으며, 화경은 높이 15~30 cm 정도이다. 인경에서 많이 나오는 잎은 길이 20~30 cm, 너비 3~9 mm 정도의 선형으로 두꺼운 부추잎과 비슷하다. 8~9월에 개화한다. 높이 20~30 cm의 화경 끝에 피는 둥근 산형꽃차례에 달리는 꽃은 연한 적자색이다(Lee 2006).

2017년에 조사된 노지 부추의 생산량은 10,883톤이며, 시설재배 부추의 생산량은 58,887톤으로 노지 생산량의 약 5.4배로 높다(KOSIS 2017). 시설재배 부추의 수요가 크게 늘면서, 품질보다는 생장이 왕성하고 수량이 높은 품종이 선택되어 재배되고 있다. 특히 국내에 도입된 시설재배 부추(e.g. 슈퍼 그린벨트)는 다수성이면서 휴면이 얇은 품종으로서 고소득 작목으로 평가되고 있다. 반면, 국내 재래종은 독특한 맛과 향기가 월등히 좋음에도 불구하고 거의 재배가 이루어지지 않아서 소멸되고 있는 실정이다(Chung and Youn 1996).

국내에서 자생하거나 재배 가능한 부추종은 기후와 토양에 대한 적응성이 넓고 생태적 및 생리학적 생육조건이 까다롭지 않아 전국적으로 재배될 수 있다. 국내 산야에서 자생하는 재래종 부추는 카로틴, 비타민 A, 비타민 B2, 비타민 C, 칼슘, 철 등을 다량 함유하고 있고 allyl sulfide, pentose, allylthiamine, sulfide 유도체, adenosine, alanine, glutamic acid, aspartic acid, valine 등과 dimethyl disulfide 와 dimethyl trisulfide 같은 8가지 지방족 황화합물 등을 함유하고 있어서 부추 특유의 향미성분을 가지고 있다(Bernhard 1970; Choi *et al.* 1992). 재래종 부추의 총 휘발성 향기성분은 주로 allyl sulfide류의 유기 황화합물로서 총 황 함량의 약 74%를 차지하고 있다. 유기 황화합물들은 식물과 인체 내에서 발현시키는 유익한 작용들 때문에 주목을 받아왔는데, 이 성분들은 혈액순환, 강장제 및 해독제 등의 효과를 나타내고 있는 것으로 알려졌다(Park *et al.* 1998). 한편 Khalid *et al.* (2014)는 부추가 마늘에 비해 높은 항균제 활성을 보이고 항산화 물질이 더 많이 농축되어 있는 것으로 보고하였다. 또한 칼슘과 가리 및 아연 등 무기성분들의 함량이 높다고 하였다.

토양산도(pH)는 식물생육을 위한 중요한 환경인자로 무기성분의 용해도와 토양미생물의 활동 및 양분의 유효도를 결정한다(Kim *et al.* 2006). 산성 또는 알칼리성 조건에 대한 식물의 내성은 다양하지만, 각각의 식물들은 적정 생육을 위한 다소 좁은 범위의 pH 조건을 가지고 있다. 일반적으로 재배작물은 약산성에서 중성인 토양에서 잘 자라며, pH 4.5 이하 또는 9 이상의 조건에서는 몇몇의 식물종만이 정상적인 생육할 수 있다(Brady and Weil 1990). 우리나라 전역에서 자생하고 있거나 재배되고 있는 부추는 일반적으로 지력이 좋고 양토 또는 사양토의 배수가 양호하며 토양 pH가 약산성에서 중성(pH 6.0~7.0)인 조건에서 생육이 원활한 것으로 알려져 있다(Kim *et al.* 2006).

우리나라에 자생하는 부추는 맛과 향이 뛰어난 고부가 가치 식품으로 기대되고 있다. 국내에 자생하는 야생부추, 산부추 및 두메부추는 지역별 자생지가 다르고 기후와 토양에 따라 성장 및 생리반응이 상이하여 유전자원으로서의 가치가 높게 평가되고 있다(Kim 1995). 그러나 자생부추를 인공재배하여 생육특성과 약리적 효과를 검증하는 연구가 국내에서는 아직까지 미흡한 실정으로, 자생부추의 급증하는 수요를 충족시키기 위한 인공재배를 위해서는 다양한 연구가 수행되어야 한다.

본 연구는 토양 내 양분 유효도 및 식물 흡수의 가장 중요한 영향인자가 토양 pH인 것에 착안하여, 인공토양의 pH가 부추 종에 따른 양분 흡수 및 생육에 미치는 영향을 확인함으로써 자생 부추류의 인공재배를 위한 기초자료를 얻기 위해 수행하였다.

재료 및 방법

1. 공시 부추종

식물분류 상 상이한 부추 4종을 뿌리째 자생지에서 채취하여 실험에 사용하였다. 부추 4종의 식물분류는 재배 부추와 야생부추는 *A. tuberosum*으로 같았고, 산부추는 *A. thunbergii*이었으며, 두메부추는 *A. senescens*이었다. 재배부추의 품종은 '새아침'으로 경기 안성지역 시설재배농가에서 선호하는 품종을 사용하였다. 야생부추는 충청북도 단양군 내 산야에서 채취하였으며, 토양의 산도는 중성~약알칼리성이었다. 산부추는 충청북도 괴산의 옥천계 토양대의 약알칼리성 토양에서 채취하였고, 마지막으로 두메부추는 강원도 동해안에서 자생한 것으로 토양의 산도는

약산성에서 중성인 토양에서 채취하여 사용하였다.

2. 토양배지 조성 및 pH 조절 방법

포트 증진용 배양토는 화강암의 세사질 마사토 82%와 원예용 상토 15% 및 숯가루 3%를 무게비로 넣고 잘 혼합한 것을 사용하였다. pH 처리는 완충곡선법으로 토양 pH 조절에 필요한 산과 알칼리량을 구하고 0.1 M HCl 용액과 Ca(OH)₂ 시약을 이용하여 5.5, 6.5 및 7.5의 3수준으로 처리하였다.

3. 부추 재배

토양 pH가 부추 4종의 무기양분 흡수와 생육에 미치는 영향을 알아보기 위하여 2016년 9월 23일부터 11월 1일까지 40일간 경기도 안성에 위치한 한경대학교의 구내 온실에서 육묘 포트를 이용하여 시험하였다.

미리 3수준으로 pH가 조절된 배양토를 포트(지름 16 cm, 높이 13.5 cm)에 넣고, 자생지에서 채취한 온 재배, 야생, 산 및 두메 부추를 각각 1주씩 이식하였다. 이식 전 채취한 재배, 야생, 산 및 두메부추의 초장이 일정하지 않아서 지상부 5 cm까지 남겨두고 그 이상의 잎을 잘라 초장을 일정하게 맞추었다. 반복수는 15반복으로 하였으며, 따라서 총 육묘 포트의 수는 4(부추종)×3(pH)×15(반복)으로 180개이었다. 재배기간 중 온실 내의 평균 온도는 24.6°C이었고 매일 오전과 오후에 관수하였다.

4. 생육조사 및 식물체분석 방법

부추 이식 후 40일에 초장을 측정하고 후 수확하여 즉시 생체중을 측정하였다. 이후 60~80°C로 급속 열풍건조 후 분쇄하여 식물체 분석시료로 사용하였다. 총 질소(T-N)와 S 함량은 CNS 분석기(vario MAX, Elementar, Germany)로 분석하였다. P와 K 함량은 건조 식물체시료를 50% HClO₄와 Conc. H₂SO₄ 혼합액으로 습식분해하여 분석기기로 정량하였고, 아연(Zn)은 HNO₃으로 시료를 분해하면서 때때로 촉매제인 H₂O₂를 첨가하여 습식분해한 것을 정량에 사용하였다. 공인 분석방법으로 P는 Ammonium meta vanadate 법을 이용하였고, K와 Zn은 ICP(Inductively Coupled Plasma Emission Spectrometer)로 분석하였다(GARES 2018).

5. 통계 분석

분산분석은 STAR V. 2.0.1 (IRRI 2013) 통계 프로그램을 사용하여 계산하였으며, pH 수준에 따른 부추종의 생체중과 초장의 차이는 던컨검정(Duncan's Multiple Range Test)으로 유의성을 평가하였다. 주성분 분석(Principal Component Analysis)을 통하여 부추종의 근연관계 및 식물체 양분함량과 식물생육과의 관계를 해석하였다. 이를 위해 Microsoft Excel용 XLSTAT 통계 프로그램을 사용하였다. 주성분 분석에 사용된 분석항목은 생체중과 초장 및 식물체의 양분흡수량이었다.

결과 및 고찰

1. pH 처리가 부추 종별 생육에 미치는 영향

토양배지의 pH가 서로 다른 부추종의 지상부 생체중과 초장에 미치는 영향을 조사하였다. 재배부추는 모든 pH 수준에서 타 부추종들에 비하여 생체중이 가장 컸다(Fig. 1a). 한편 토양배지 pH 수준의 증가는 야생부추와 산부추의 생체중을 증가시켰던 반면, 일반부추와 두메부추의 생체중에는 영향을 미치지 못하였다(Fig. 1b). 초장은 전체 pH 조건에서 야생부추, 산부추 > 재배부추 > 두메부추 순으로 컸다(Fig. 2a). 초장은 야생부추와 산부추가 일반부추에 비해 월등히 컸던 반면 생체중은 그 반대이었는데, 그것은 각 부추종의 형태적 차이 때문으로 판단되었다. 야생부추와 산부추는 엽폭이 가늘고 두께가 얇으며 길이가 긴 형태를 가진 반면, 일반부추는 엽폭이 넓고 잎 두께가 두꺼우며 길이가 짧은 형태를 가졌다.

한편 타 부추종과 달리 야생부추의 초장은 pH 증가에 따라 통계적으로 유의성 있게 증가하였다(Fig. 2b). pH 수준의 증가에 따라 타 부추종과 달리 야생부추의 초장과 생체중이 유의성 있는 증가를 보이는 것은 본 실험에 사용하기 위하여 채취한 야생부추 자생지의 토양특성과 관련이 있는 것으로 판단되었다. 야생부추는 전국적으로 분포하는데, 본 실험에 사용한 것은 자생지가 단양이었다. 단양은 석회암지대로서 석회암으로부터 풍화된 토양은 일반적으로 토양 pH가 높다. 따라서 pH가 높은 곳에 적응해온 야생부추는 자생지보다 pH가 낮은 산성 토양 배지에서 정상적 생육을 유지하기 어려웠을 것으로 생각된다.

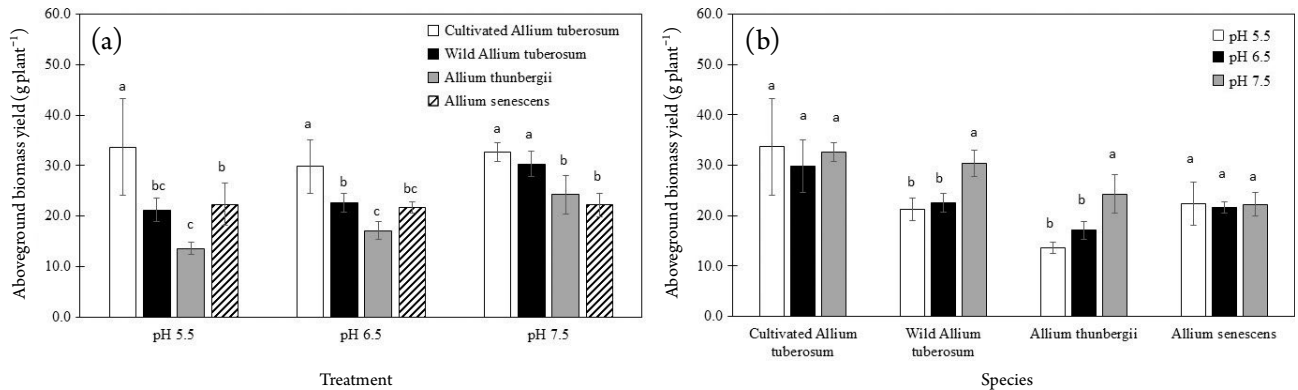


Fig. 1. Differences of fresh weight by pH treatment (a) and *Allium* species (b). The same letter was not significantly different at 5% of probability through DMRT.

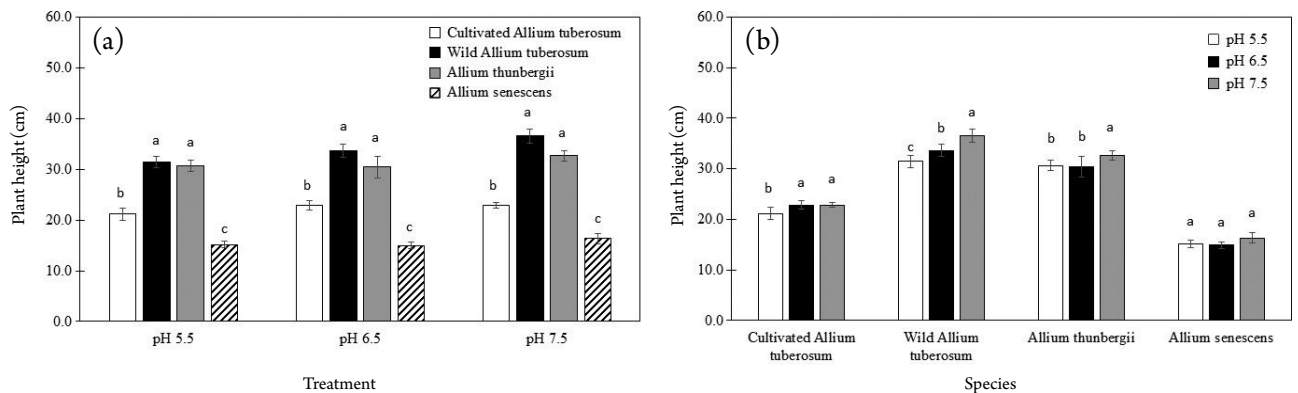


Fig. 2. Differences of plant height by pH treatment (a) and *Allium* species (b). The same letter was not significantly different at 5% of probability through DMRT.

2. 부추종별 생육량과 무기양분함량의 주성분 분석

주성분 분석(Principal component analysis; PCA) Biplot의 1축과 2축을 근거로 변수들 간의 영향분석이 가능하였다. 재배부추와 야생부추는 가까운 한 군을 이루고, 이 군과 나머지 산부추 및 두메부추는 각각 독립적인 관계를 보이는 것으로 나타났다(Fig. 3). 이는 실험에 사용한 부추들의 종분류와 일치하는 결과로서, 일반부추와 야생부추는 *A. tuberosum*으로 같은 종명을 가진 반면, 산부추는 *A. thunbergii*이고, 두메부추는 *A. senescens*로 다르다.

생체중은 일반부추와 야생부추가 두메부추나 산부추에 비하여 높은 경향을 보였고, 초장은 야생부추와 산부추가 일반부추나 두메부추보다 큰 경향을 보였다. 이는 앞서 생체중과 초장의 던컨 검정(DMRT)의 분석결과와 일치하는 것으로서 본실험의 주성분 분석에 대한 적합도를 나타

내는 결과로 판단된다.

K와 P 및 Zn의 함량과 생체중이 함께 IV 분면에 위치하는 것으로 볼 때, 이 무기성분들이 생체중에 영향을 끼친 것으로 생각된다. 한편 초장과 관련이 있는 무기영양성분은 N과 S로 나타났다. K는 식물체내 K⁺ 이온상태로 존재하면서 삼투압 조절기능을 가진다(Kim *et al.* 2006). 세포내에 K⁺ 이온 함량이 높아지면 삼투압이 증가되어 수분보유력이 커지므로 생체중을 증가시키게 된다. P는 DNA 복제를 증가시켜 세포분열을 촉진함으로써 생체중 증가에 기여할 수 있다. 한편 Zn은 유전정보 물질인 DNA와 RNA의 대사와 단백질 합성에 중요한 역할을 하는 것으로 알려졌다(Coleman 1992; Vallee and Falchuk 1993). Zn은 유전정보에 따라 단백질을 합성하는 공장 역할을 하는 리보솜의 구조적 성분이다. 또한 식물체내 Zn 농도가 증가하면 인돌초산(Indole acetic acid; IAA)의 합성이 증가되며, 이

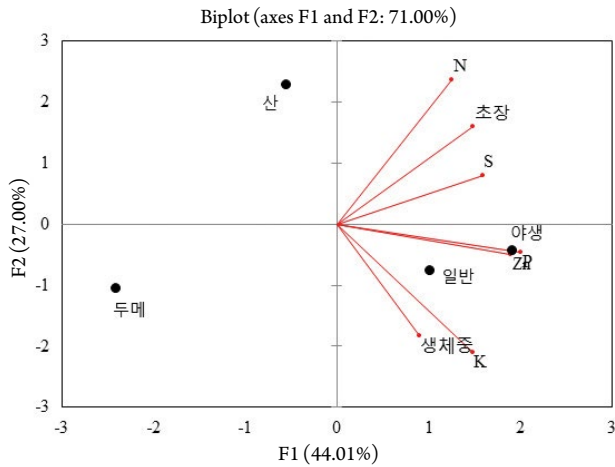


Fig. 3. Principal component analysis for determining closely related *Allium* species by the plant growth and contents of nutrients uptake. The x and y coordinates of the black circles indicated average eigenvalue results at all pH treatment of each species.

에 따라 식물의 길이생장이 증가한다고 보고되었다(Tsui 1948). 본 실험에서 야생부추의 Zn 함량은 타 부추종에 비해 월등히 높았으며, 배지 pH 수준이 증가할수록 증가하였다(Fig. 4). 이 결과는 앞서 야생부추의 초장이 타 부추종에 비해 크고(Fig. 2a), pH 증가에 따라 유의성 있게 증가(Fig. 2b)하는 원인 중의 하나가 식물체내 Zn 함량 증가에 있다는 것을 나타낸다.

또한 식물체 내에서 Zn은 효소 구조의 필수성분으로서 촉매적인 또는 구조적인 역할을 하는 것으로 알려져 있다(Vallee and Auld 1990; Vallee and Falchuk 1993). 구조적 역할을 하는 효소의 구조는 효소 속 4개의 cysteine 아미노산이 보유한 티올기(-SH)에 Zn이 배위결합(coordination bonding) 형태인 것으로 알려져 있다. 구조적 기능의 효소 종류로는 Alcohol dehydrogenase와 DNA 복제와 유전자 발현에 관련된 효소 등이 있다(Coleman 1992). 따라서 구조적 역할을 하는 효소가 만들어지기 위해서는 Zn과 함께 S 함유 아미노산인 cysteine이 존재해야 하므로, 식물영양학적 측면에서 Zn이 S와 밀접한 관계를 가지고 있다는 것을 시사하고 있다. 이는 주성분분석에서 야생부추와 Zn 및 S가 근접하여 분포한 것으로도 설명할 수 있다(Fig. 3).

위에서 논의된 내용을 토대로 무기양분의 함량이 생체중에 미치는 영향을 식물생리학적 측면에서 종합적으로 유추해보면, Zn의 증가는 IAA 합성을 증진시켜 세포신장 신호를 보냄으로써 IAA 유도에 의한 DNA 복제에 영향을 미치고, 이에 따라 DNA의 구성성분인 P 함량과 DNA

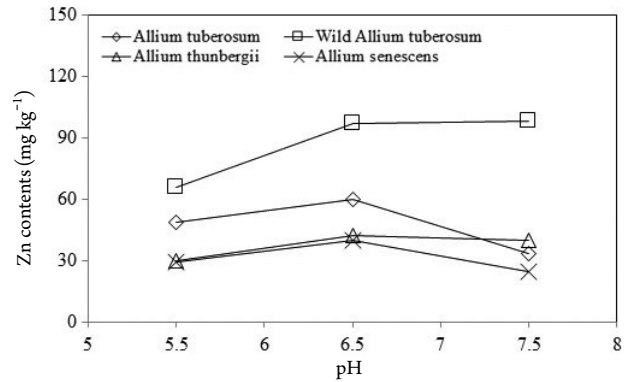


Fig. 4. Effect of pH on the Zn content of each species.

복제의 증가가 일어나므로 초장과 생체중이 증가하게 되는 것으로 추론할 수 있다(Tsui 1948; Vallee et al. 1990; Marschner 1995). 한편 S는 DNA 복제와 유전자 발현에 관련된 효소를 만드는데 기여하고, K는 독립적으로 식물의 팽압을 증가시켜 생체중을 늘리는데 공헌한 것으로 해석할 수 있다(Marschner 1995).

적 요

본 실험은 토양배지의 pH 수준에 따른 4가지 부추종의 무기양분 흡수와 생육에 미치는 영향을 구명하고자 육묘 포트에서 재배실험을 실시하였다. 실험에 사용된 부추종은 농가에서 재배하고 있는 재배부추와 야생하는 야생부추, 산부추, 두메부추를 자생지에서 수집한 것을 사용하였다. 배양토의 pH 수준은 5.5, 6.5, 7.5로 3수준이었다. 실험의 결과는 다음과 같다.

1. 재배부추는 모든 pH 수준에서 타 부추종들에 비하여 생체중이 가장 컸다. 한편 토양 배지 pH 수준의 증가는 야생부추와 산부추의 생체중을 증가시켰던 반면, 일반부추와 두메부추의 생체중에는 영향을 미치지 못하였다.

2. 초장은 전체 pH 조건에서 야생부추, 산부추 > 재배부추 > 두메부추 순으로 컸다. 초장은 야생부추와 산부추가 일반부추에 비해 월등히 컸던 반면 생체중은 그 반대이었는데, 그것은 각 부추종의 형태적 차이 때문으로 판단되었다. 한편 타 부추종과 달리 야생부추의 초장은 pH 증가에 따라 통계적으로 유의성 있게 증가하였다. 이것은 본 실험에 사용하기 위하여 채취한 야생부추 자생지의 토양특성과 관련이 있는 것으로 판단되었다.

3. 야생부추의 Zn 함량은 타 부추종에 비해 월등히 높았으며, 배지 pH 수준이 증가할수록 증가하였다. 이는 야생부추의 초장이 타 부추종에 비해 크고, pH 증가에 따라 유의성이 있게 증가하는 원인 중의 하나가 식물체내 Zn 함량 증가에 있다는 것을 나타낸다.

4. 생육량과 무기양분흡수량에 의한 주성분 분석은 부추류의 근연관계를 밝히는데 유용하였다.

사 사

본 연구는 2017년도 한경대학교 연구년 경비의 지원에 의한 것임.

REFERENCES

- Bernhard RA. 1970. Chemotaxonomy: Distribution studies of sulfur compounds in *Allium*. *Phytochemistry* 9:2019-2027.
- Brady NC and RR Weil. 1990. *The Nature and Properties of Soils*, 10th Edition. Macmillan publishing company, NY.
- Choi JS, JY Kim, JH Lee, HS Young and TW Lee. 1992. Isolation of adenosine and free amino acid composition from the leaves of *Allium tuberosum*. *J. Korean Soc. Food Nutr.* 21:286-290.
- Chung HD and SJ Youn. 1996. The physioecological characteristics and productivity of the Korean native *Allium tuberosum* Rottler. *J. Korean Soc. Hort. Sci.* 37:495-504.
- Coleman JE. 1992. Zinc proteins: Enzymes, storage proteins, transcription factors, and replication proteins. *Annu. Rev. Biochem.* 61:897-946.
- Gambrell RP and WH Jr. Patrick. 1978. Chemical and microbiological properties of anaerobic soils and sediments. pp. 375-423. In *Plant Life in Anaerobic Environments* (Hook DD and RM Crawford, eds.). Ann Arbor Science, Ann Arbor.
- GARES. 2018. Analytical methods for soil, plant, compost, liquid fertilizer, nursery materials, and irrigation water. Gyeonggi-do Agricultural Research & Extension Services. Taejeon Publisher.
- Hinsinger P, C Plassard, C Tang and B Jaillard. 2003. Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: a review. *Plant Soil* 248:43-59.
- IRRI. 2013. Statistical tool for agricultural research. Version 2.0.1. International Rice Research Institute. Los Baños, Philippines.
- Kemmou S, JE Dafir, M Wartiti and M Taoufik. 2006. Seasonal variations and potential mobility of sediment phosphorus in the Al Massira reservoir, Morocco. *Water Qual. Res. J. Can.* 41:427-436.
- Khalid N, I Ahmed, MSZ Latif, T Rafique and SA Fawad. 2014. Comparison of antimicrobial activity, phytochemical profile and minerals composition of Garlic *Allium sativum* and *Allium tuberosum*. *J. Korean Soc. Appl. Biol. Chem.* 57:311-317.
- Kim GH. 2006. *Soil Science*. Hyangmunsa, Seoul.
- Kim WB. 1995. Crop cultivation-Protected cultivation situation and technique of wild vegetable. *Korean Res. Soc. Protected Hort.* 8:71-80.
- KOSIS. 2017. Annual status of Greenhouse crop production in 2017. Korean statistical information service, Statistics Korea.
- Laanbroek HJ. 1990. Bacterial cycling of minerals that affect plant growth in waterlogged soils: a review. *Aquat. Bot.* 38:109-125.
- Lee TB. 2006. *Coloured Flora of Korea*. Hyangmunsa, Seoul. p. 781.
- Marschner H. 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*, 2nd ed. Academic press, London.
- Park ER, JO Jo, SM Kim, MY Lee and KS Kim. 1998. Volatile flavor components of Leek (*Allium tuberosum* Rottler). *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.* 27:563-567.
- Park JH. 2010. Phytochemical constituents and biological activity of *Scilla sinensis* Merr. and *Allium thunbergii* G. Don. PhD. Dissertation. Sungkyunkwan University, Seoul.
- Phillips IR. 1998. Phosphorus availability and sorption under alternating waterlogged and drying conditions. *Commun. Soil Sci. Plant* 29:3045-3059.
- Ponnamperuma FN. 1972. The chemistry of submerged soils. *Adv. Agron.* 24:29-96.
- Sallade YE and JT Sims. 1997. Phosphorus transformations in the sediments of Delaware's agricultural drainageways: II. Effect of reducing conditions on phosphorus release. *J. Environ. Qual.* 26:1579-1588.
- Tsui C. 1948. The role of zinc in auxin synthesis in the tomato plant. *Am. J. Bot.* 35:172-179.
- Vadas PA and JT Sims. 1998. Redox status, poultry litter, and phosphorus solubility in Atlantic Coastal plain soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62:1025-1034.
- Vallee BL and DS Auld. 1990. Zinc coordination, function, and structure of zinc enzymes and other proteins. *Biochem.* 29:5647-5659.
- Vallee BL and KH Falchuk. 1993. The biochemical basis of zinc. *Physiol. Rev.* 73:79-118.