

Research Article



CrossMark

Open Access

염스트레스가 감자(*Solanum tuberosum* L.)의 건물, 환원당, 무기성분의 함량 및 조성에 미치는 영향

임주성*, 김미옥, 홍미순, 김미숙, 천충기, 박영은, 조지홍, 조광수, 장동철, 최장규, 이종남

농촌진흥청 국립식량과학원 고령지농업연구소

Effects of Salt Stress on Dry Matter, Glucose, Minerals Content and Composition in Potato (*Solanum tuberosum* L.)

Ju Sung Im^{*}, Mi Ok Kim, Me Soon Hong, Mi Suk Kim, Chung ki Cheun, Yeong Eun Park, Ji Hong Cho, Kwang Soo Cho, Dong Chil Chang, Jang Gyu Choi and Jong Nam Lee (Highland Agriculture Research Institute, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Pyeongchang 25342, Korea)

Received: 17 March 2019/ Revised: 26 March 2019/ Accepted: 29 March 2019

Copyright © 2019 The Korean Society of Environmental Agriculture

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.

ORCID

Ju Sung Im

<https://orcid.org/0000-0001-9981-9240>

Abstract

BACKGROUND: Salinity is one of the main environmental stresses deteriorating qualities as well as yields of food crops. This study was conducted to identify the effects of salt stress on dry matter ratio, glucose content, and mineral content and composition in potatoes (*Solanum tuberosum* L.).

METHODS AND RESULTS: Four potato varieties were grown in plastic pots (diameter 20 cm and height 25 cm) with three salinity levels (EC: 1.0, 4.0, and 8.0 dS/m) in a glasshouse. Dry matter ratio, specific gravity, starch, and glucose content in tubers harvested at 90 days after sowing were analyzed. Also, mineral contents (T-N, T-C, P₂O₅, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺) in stem, leaf, and tuber were investigated and statistically analyzed for analysis of variance (ANOVA). Dry matter ratio, specific gravity, and starch content in tubers were reduced in all varieties as the salt concentration increased. Glucose content tended to decrease according to the salt concentration. In ANOVA analysis of mineral contents, there were significant differences in K⁺ and Mg²⁺ of leaf and stem, in Na⁺ of leaf and tuber, and also in Ca²⁺ of leaf

by the interactions of variety and salinity. In the case of K⁺/Na⁺ and Ca²⁺/Na⁺, the stem was more sensitively influenced by the salt treatment than the leaf or the tuber. The K⁺/Na⁺ and Ca²⁺/Na⁺ decreased in leaf, stem, and tuber of four varieties, as the salt concentration became higher. The decreasing level varied according to the varieties. 'Kroda' and 'Duback' maintained relatively higher K⁺/Na⁺ and Ca²⁺/Na⁺ than 'Atlantic' or 'Goun' under the salt stress conditions.

CONCLUSION: The composition and accumulation of minerals in potato plant as well as dry matter ratio, starch, and glucose contents were significantly influenced by salt stress. The respond patterns were different depending on the varieties and it was related to the salt tolerance among varieties.

Key words: Dry matter ratio, Glucose, Mineral, Potato variety, Salt stress

서론

감자(*Solanum tuberosum* L.)는 칩, 프렌치프라이, 플레이크 등 다양한 가공식품의 원료로써 널리 이용되는 전분이 풍부한 작물이다. 감자는 비타민과 각종 미네랄이 풍부하여 완전 식품으로 여겨지며, 전 세계적으로 100여 국가 이상의 광

*Corresponding author: Ju Sung Im

Phone: +82-33-330-1630; Fax: +82-33-330-1519;

E-mail: imjusung@korea.kr

범위한 지역에서 재배된다(Kolasa, 1993). 하지만 최근 기후 변화로 인한 가뭄과 건조의 빈발로 농경지의 토양 수분이 과도하게 증발되어 토양내 염류 축적이 심화되고 있을 뿐만 아니라 관개용수의 부족에 따른 지하 대수층의 염류수 활용 및 화학비료의 과다 사용으로 농경지와 농업 용수원의 염류화가 빠르게 진행되고 있어서 가공용 원료 감자의 수급 불안과 가공 품질에 관한 염스트레스의 부정적 영향에 대하여 우려가 크다(Levy and Veilleux, 2007). 이는 감자가 비교적 낮은 염도(EC 1.6-2.5 dS/m)에서도 수량 감소가 발생하는 염에 취약한 작물이기 때문이다(Maas and Hoffman, 1977). 염스트레스는 작물의 성장과 발육을 제한하는 대표적 환경요인으로서(Yun, 2005), 오늘날 전세계 경작지의 23% 가량이 염에 의해 피해를 입는 것으로 알려져 있다(Rhoades and Loveday, 1990). 농경지에서 주로 문제가 되는 염은 NaCl인데(Li *et al.*, 2006), 토양이나 물에 과도할 경우, 근권부의 삼투압 저하 및 수분 흡수 저해(Parida and Das, 2005), 세포질내 이온 불균형(Hasegawa *et al.*, 2000), K⁺ 이온의 세포내 유입 방해 및 생체효소의 활성 억제(Dreyer *et al.*, 1999) 등을 유발하여 결국 작물의 수량 감소의 원인이 된다. 토양수에 함유된 Na⁺ 이온은 Na₂CO₃를 형성하고 토양의 pH를 높여서, 토양내 철, 인 등의 가용성을 떨어뜨려 다양한 무기성분의 식물체내 흡수를 방해함으로써 이들과 관련된 작물의 품질에도 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Ayers and Westcot, 1985). 염스트레스 환경에서 감자는 파종후 출현 지연, 줄기 왜화, 엽수 및 엽면적 감소, 총 엽록소 감소, 식물체 노화, 괴경 경화, 표피 러셋화 등 생육 불량과 괴경의 형태적 품질 악화 등이 밝혀져 있으며, 이들의 종합적인 결과로써 수량성 저하가 보고된 바 있다(Levy and Veilleux, 2007; Kim *et al.*, 2013; Im *et al.*, 2016). 염스트레스 환경에서 가공 형질에 관해서는 토마토(Yin *et al.*, 2010)의 경우 전분 및 당함량의 증가가, 배추(Kim *et al.*, 2010)에서는 건물함량의 증가가 보고되었다. 반면, 감자에서는 Ghosh 등(2001)이 감자 식물체의 모든 조직에서 건물함량의 감소를, Gaurav 등(2017)이 감자 괴경의 건물함량과 전분함량의 감소 및 당함량의 증가를 보고하여 타작물들과 다소 차이가 있었는데, 아직까지 건물함량이나 전분, 환원당 등 가공 형질 관련 염스트레스의 영향에 대해서는 연구가 미미한 실정이다. 한편, 염스트레스 환경에서 Na⁺ 이온의 식물체내 축적 양상과 Na⁺ 이온 및 K⁺ 이온의 식물체 부위별 함량 비율은 내염성 수준과 관련되어 있어 감자 품종간에도 차이가 있을 것으로 보인다(Flowers *et al.*, 1977; Levy *et al.*, 1993; Jaarsma *et al.*, 2013). 또한 Na⁺ 이온은 여러 무기성분의 흡수나 축적에 영향을 미치게 되어 염스트레스 환경에서 감자 식물체의 조직간 무기성분 조성이 달라질 것으로 생각되며, 이와 함께 무기성분 조성의 차이로 인해 건물이나 전분함량, 환원당 등 감자 가공에서 중요하게 여겨지는 형질들이 영향을 받을 것으로 추정된다. 하지만 감자에 있어 염스트레스 관련 생육과 수량성에 대한 연구 정보는 많으나, 가공 형질 등에 관한 연구 정보는 미흡한 실정이다. 이에 따라 감자에 염스트레스를 처리하여 염스트레스가 감자의 주요 가공 형질

및 식물체의 조직간 무기성분의 함량과 조성에 미치는 영향을 분석하고, 이에 대한 품종간 반응 차이를 분석하였다.

재료 및 방법

시험품종

시험품종은 염스트레스에 대한 감자 품종간 가공 형질의 반응 차이를 비교 분석하기 위하여 국내외에서 식가공 원료 감자로써 주로 이용되는 대서('Atlantic'), 고운('Goun'), 크로다('Kroda'), 두백('Duback') 등 4품종을 공시하였다.

염상토 및 염수 조제

염스트레스 처리에 사용된 염상토와 염수는 상업용 원예상토(Sooksooki 2ho, Nongwoobio, Suwon, South Korea) 및 실험온실의 관수용 수도물에 순도 97% 이상의 국내산 천일염을 일정량 첨가하여 EC 1.0(대조구), 4.0, 8.0 dS/m 등 3수준으로 조제 처리하였다. 즉, 염상토는 비배관리를 위하여 전용복비(N:P:K=10:8:9, 슈퍼감자, 남해화학, 포항, 대한민국)를 먼저 첨가한 후, 염농도 수준별 썩썩이 상토(EC 0.42 dS/m) 50 L당 천일염을 각각 8 g, 45 g, 86 g 첨가하여 골고루 혼합한 후 사용하였다. 염수는 수도물(EC 0.67 dS/m) 100 L당 천일염을 각각 11 g, 130 g, 265 g 첨가하여 완전히 녹인 후, 염스트레스 처리를 위한 관수에 이용하였다.

재배관리 및 염스트레스 처리

강원도 평창군 대관령에 위치한 고령지농업연구소의 망실포장에서 여름재배를 통하여 수확된 품종별 건전한 씨감자를 파종 25일전 산광취아 하였다. 괴경 정단부에서 맹아가 0.5 cm 내외로 균일하게 출현된 씨감자를 강원도 강릉에 위치한 유리온실에 3월 하순경 파종하였으며, 봄작형에 준하여 재배 및 관리하였다. 즉, 염처리 농도별로 조제된 염상토를 플라스틱 포트(지름 20 cm, 높이 25 cm)에 적당량 충진한 후, 포트당 괴경 1개씩을 10 cm 깊이로 파종하였다. 관수는 염처리 농도별 조제된 염수를 사용하여 생육초기(파종-파종후 30일)에는 7일 간격으로 저면관수를, 생육중기부터 수확까지는 3-4일 간격으로 저면관수 및 식물체 상부관수를 동시에 실시하였다. 이 때 염상토와 염수는 각 처리 수준별 동일하도록 적용하여 처리하였다.

가공 관련 형질 분석

염처리에 따른 감자 품종별 가공 관련 형질의 특성을 알아보기 위하여 파종후 90일에 수확하여 괴경을 포함한 식물체 부위별 건물함량을 조사하였다. 또한, 괴경의 비중, 전분함량, 건물함량 중 전분이 차지하는 비율, 그리고 환원당함량을 분석 비교하였다. 식물체의 부위별(잎, 줄기, 뿌리, 괴경) 건물함량은 잘게 썬 부위별 시료를 영하 80°C의 초저온냉동고에 24시간동안 보관한 후, 진공동결건조시스템(PVTFD 20R, II Shin Co. Ltd., Korea)으로 건조시켜 건조전 무게에 대한 건조후 무게의 백분율로 나타내었다. 괴경의 비중은 수확 즉시 흡수

제거하고 수선한 100 g 내외의 건전한 괴경을 사용하여 먼저 공기중 무게를 측정 후, 물속(수중)에서의 무게를 측정하여 '비중 = 공기중 무게 / (공기중 무게 - 수중 무게)'의 식으로 계산하였다.

괴경의 전분함량은 동결건조된 시료를 이용하여 알카라인 침지법(Alkaline method)으로 분석하였다. 먼저, 시료 20 g에 0.2%(w/v) NaOH 20 mL를 가하여 24시간동안 침지 후 분쇄한 다음, NaOH로 씻으며 250 μ m와 150 μ m의 체로 걸렀다. 이를 증류수로 세척하여 1.0 M의 acetic acid로 중화한 후, 5500 rpm으로 10분 동안 원심분리 하였다. 이후 상등액을 버리고 흰 전분만 얻어질 때까지 원심분리 과정을 반복하였으며, 40°C에서 48시간동안 건조시킨 후 무게를 측정하여 생체무게에 대한 백분율로서 표시하였다. 환원당함량은 3,5-Dinitrosalicylic acid(DNS)법으로 분석하였다. 즉, 건조 분말 시료 1 g을 취한 다음 80% ETOH 20 mL를 분주한 후 호모게나이저(Ultra-Turrax T25 Basic Homogenizer, IKA Co., Staufen, Germany)로 균질화 하였다. 균질액은 filter paper(No. 2, Whatman, Maidstone, UK)와 0.45 μ m membrane filter(Milipore, Bedford, MA, USA)를 이용하여 2차 추출하였다. 추출시료 1 mL와 DNS 1 mL를 test tube에 넣고 Waterbath(95°C, 10분)에서 증탕한 후 냉각시킨 다음 증류수 3 mL를 첨가하여 550 nm에서 UV/VIS spectrophotometer(X-ma 2000, Human Corp., USA)로 측정하였다. 분석결과는 생체중에 대한 함량으로 표시하였다.

식물체 무기성분 분석

식물체 부위별 무기성분은 건조된 시료를 마쇄하여 농촌진흥청(Rural Development Administration, 2012)의 농업연구조사분석기준에 따라 분석하였다. 즉, 동결건조시료 1 g에 35%의 HNO₃ 10 mL를 첨가하였다. 고주파분해기기(AMDS Ethos 1, Milestonesrl Co., Italy)로 200°C 조건에서 투명한 액체가 될 때까지 120분간 산분해 하였다. 분해액은 filter paper(No.6, Whatman, UK)로 여과한 다음, 각 성분별 분석에 사용하였다. 분석대상 성분은 염처리 이온인 Na⁺과 식물에 있어 대표적인 필수요소이면서 다양한 조효소의 구성 및 활성화에 필요한 Total Nitrogen(T-N), P₂O₅, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺이었으며, Na⁺함량에 대한 기타 성분들의 비율을 비교하였다. T-N은 Kjeldahl법으로, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ 및 Na⁺은 유도결합질량분석기(Inductively Coupled Plasma Spectrometer, Optima 2100DV, PerkinElmer Co., Norwalk, CT, USA)를 이용하여 분석하였다.

통계 분석

본 실험의 시험구는 각 처리당 품종별 포트 5개씩을 3반복으로 배치하여 수행하였다. 본 실험에서 도출된 데이터의 통계분석은 SAS enterprise guide 4.3 프로그램(SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)으로 ANOVA(Analysis of variance) 분석 하였으며, Duncan's Multiple Range Test 5% 수준에서 유의성을 검정하였다.

결과 및 고찰

염스트레스 처리에 따른 건물율, 비중, 전분함량 및 환원당함량 비교

염스트레스 수준 및 감자 품종별 건물율에 대한 이원분석 결과, 식물체 부위별 반응에 차이가 있었다(Table 1). 즉, 잎의 경우 품종과 염의 교호작용에 의하여 매우 민감하게 영향을 받았던 반면($p \leq 0.001$), 줄기와 뿌리는 유의성이 낮은 것으로 분석되었다. 괴경은 품종($p \leq 0.01$), 염스트레스($p \leq 0.001$) 각 요인에 대해 민감하게 영향을 받았으나, 두 요인의 교호작용에 대해서는 유의성이 낮았다. 특히, 감자 가공시 가공수율과 가공비에 직접 관계되어 중요하게 여겨지는 괴경의 건물율은 염처리 농도가 증가할수록 시험품종 모두에서 공통적으로 감소되어 염스트레스가 가공용 원료 감자의 생산에 부정적인 영향을 주는 환경 요인임을 알 수 있었다. Ghosh 등(2001)은 염스트레스로 인하여 감자의 모든 조직에서 건물함량이 감소되었는데, 줄기, 복지, 뿌리에서보다 괴경에서 건물 감소가 가장 컸다고 보고하여, 본 실험의 결과와 유사하였다. 이는 감자 식물체의 염저항성 기작과 관련이 있는 것으로 보인다. 즉, 염스트레스 환경조건에서 감자 식물체는 염저항성을 높이기 위하여 지상부의 광합성 동화산물을 지하부 괴경에 축적하기 보다는 proline과 같은 염스트레스 저항성 증진 물질의 합성에 소모함으로써 줄기, 잎 등 식물체의 기초생장을 유지하는 방향으로 대사작용을 진행한다고 밝혀진 바 있다(Levy, 1992; Im *et al.*, 2016).

한편, 품종에 따라 염스트레스에 의한 괴경 건물율의 감소 폭에 차이가 있었다. 즉, 고염(EC 8.0 dS/m) 처리시 대조구(EC 1.0 dS/m) 대비 '대서'는 5.8%, '고운'은 6.2%, '크로다'는 4.3%의 감소를, '두백'은 이중 가장 낮은 2.9%의 감소를 나타내었다. 감자 괴경의 비중과 전분함량의 경우 괴경 건물율과 동일한 경향을 나타내어 서로 밀접한 관계가 있는 요소들임을 확인할 수 있었다(Haase, 2003). 이와 함께 이들 가공 관련 형질들에 있어 '대서'나 '고운'이 '크로다'나 '두백'보다 염스트레스에 더 민감한 품종인 것으로 분석되어 염스트레스 대응 가공원료 감자 품종의 선발이 의미가 있을 것으로 생각되었다. 한편, 건물함량에 대한 전분함량의 비율을 분석한 결과, '두백'을 제외한 나머지 세 품종에서 염처리 농도가 높아질수록 전분함량의 비율이 감소하는 경향이 관찰되었다. 따라서 염스트레스 대응 가공원료용 감자 품종의 선택이 필요한 경우에는 건물 및 전분함량 각각의 수준은 물론, 건물에서 전분이 차지하는 비율에 대해서도 관심을 가져야 할 것으로 판단되었다.

감자 고온 가공 시 갈변과 밀접한 관련이 있는 환원당함량은 재배 환경이나 품종에 따라 차이가 있는 것으로 알려져 있는데(Yoon *et al.*, 1999), 본 실험에서도 품종($p \leq 0.001$), 염($p \leq 0.01$), 그리고 두 요인의 교호작용($p \leq 0.001$) 모두에 대하여 민감하게 영향을 받은 것으로 분석되었다. 대부분 품종에서 염처리 농도가 높을수록 환원당함량이 감소하는 경향이 있으나, '두백'에서는 변화가 적었다.

Table 1. Comparison of dry matter rate, specific gravity, starch, and glucose contents according to potato varieties and salinity levels

Variety	Salinity (EC, dS/m)	Dry matter rate(%)				Specific gravity	Starch (%; B)	B/A (%)	Glucose (mg · 100g ⁻¹)
		Leaf	Stem	Root	Tuber (A)				
Atlantic	1.0	3.1 b ^{a)}	6.2 a	23.5 a	18.4 a	1.065 a	12.3 a	66.8	2,369 a
	4.0	8.8 a	5.6 a	41.1 a	14.7 ab	1.047 ab	8.8 b	59.9	2,211 a
	8.0	9.3 a	6.4 a	51.3 a	12.6 b	1.031 b	4.7 c	37.3	1,798 b
Goun	1.0	10.0 a	5.9 a	40.2 a	18.2 a	1.065 a	12.0 a	65.9	3,491 a
	4.0	8.7 a	5.1 a	27.9 a	15.6 ab	1.051 ab	9.9 ab	63.5	2,115 b
	8.0	6.8 a	5.7 a	34.5 a	12.0 b	1.024 b	6.5 b	54.2	2,149 b
Kroda	1.0	9.8 a	5.9 a	62.1 a	15.8 a	1.053 a	9.2 a	58.2	5,223 a
	4.0	8.5 ab	6.1 a	16.6 a	13.3 b	1.038 b	7.3 b	54.9	5,512 a
	8.0	7.5 b	6.0 a	50.6 a	11.5 c	1.021 c	5.6 c	48.7	3,907 b
Duback	1.0	7.3 a	4.6 b	58.2 a	18.4 a	1.061 a	11.5 a	66.1	993 a
	4.0	6.6 a	4.5 b	40.8 a	16.8 ab	1.057 a	9.3 ab	55.4	947 a
	8.0	8.2 a	6.0 a	37.3 a	15.5 b	1.051 a	8.0 b	66.1	1,038 a
Variety		NS	*	NS	**	**	**	-	***
Salinity		NS	NS	NS	***	***	***	-	**
Variety x Salinity		***	NS	NS	NS	NS	NS	-	***

^{a)}Means followed by the same letters within columns are not significantly different by DMRT at P≤0.05.

NS, *, **, *** Non-significant or significant at P≤0.05, 0.01, or 0.001 respectively.

Table 2. Results of two way ANOVA in the effects of variety, salinity, and their interactions on minerals in leaf, stem, and tuber of four potato varieties

Variables		T-N	P ₂ O ₅	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
Leaf	Variety	3.06*	52.25***	7.69***	15.67***	22.98***	7.35**
	Salinity	44.29***	11.49***	81.62***	109.78***	20.61***	322.93***
	Variety x Salinity	1.23 ^{NS}	1.36 ^{NS}	5.79***	4.04**	6.97***	6.91***
Stem	Variety	3.86*	45.90***	6.09**	13.75***	26.95***	1.99 ^{NS}
	Salinity	50.23***	35.37***	59.38***	11.79***	70.70***	369.07***
	Variety x Salinity	4.53**	4.51**	13.46***	1.52NS	3.40*	0.27 ^{NS}
Tuber	Variety	3.68*	14.70***	5.48**	4.62*	1.68 ^{NS}	10.59***
	Salinity	51.91***	24.48***	19.09***	40.10***	6.61**	229.40***
	Variety x Salinity	2.05 ^{NS}	3.48*	1.27 ^{NS}	1.39 ^{NS}	1.08 ^{NS}	6.86***

Numbers represent F values at 5% level.

NS, *, **, *** Non-significant or significant at p≤0.05, 0.01, or 0.001, respectively.

염스트레스 처리에 따른 감자 식물체의 무기성분함량 ANOVA 분석 결과

감자 재배 시 염스트레스의 주된 원인은 토양과 물의 염류 화이다. 토양 중 Na⁺ 이온의 증가는 토양 및 토양수의 pH를 높이고, 알칼리화를 촉진시켜 뿌리의 수분 흡수를 방해할 뿐만 아니라, 다양한 양분에 대해서도 흡수와 동화를 저해하여 필수 이온들의 세포내 균형을 교란시키는 것으로 알려져 있다(Hasegawa *et al.*, 2000; Munns and Tester, 2008). 본 실험에서 감자 식물체의 무기성분에 대한 ANOVA 분석 결과(Table 2), 잎, 줄기, 괴경의 모든 부위에서 분석 대상 무기 성분들 모두 품종, 염 각각의 단일 요인에 대해 통계적으로 유의성 있는 차이가 도출되었다. 특히, K⁺ 및 Mg²⁺은 잎과

줄기에서, Na⁺은 잎과 괴경에서 품종×염의 교호작용에 의해 민감하게 영향을 받은 것으로 분석되었다. 이 외에도 잎에서 Ca²⁺(p≤0.01) 등이, 줄기에서 T-N(p≤0.01), P₂O₅(p≤0.01) 등이 품종×염에 의한 유의적 차이가 있는 것으로 나타났다. 본 결과에서 식물체 조직간 염에 대한 무기 성분의 축적 반응이 다르다는 것을 알 수 있으며, 이는 염스트레스에 대한 조직간 역할 차이가 있음을 간접적으로 보여주는 것으로 이해된다(Jaarsma *et al.*, 2013).

염스트레스 처리에 따른 식물체 부위별 Na⁺, K⁺, Ca²⁺ 이온함량 비교

염처리에 따른 감자 품종 및 식물체 부위별 염스트레스 기

작에 관련된 주요 무기성분을 분석하였다. 염처리로 인하여 함량 변화가 가장 심했던 것은 Na^+ 이온이었다(Fig. 1). 염처리 농도가 증가할수록 잎, 줄기, 괴경에서 Na^+ 함량도 증가하였으며, 증가폭은 잎에서 가장 두드러졌고, 다음은 줄기, 괴경 순이었다. EC 4.0 dS/m에서 미미하였던 반면, EC 8.0 dS/m의 고염처리에서는 급격한 증가를 나타냈다. 식물체 부위별 Na^+ 축적은 품종에 따라 달랐으며, ‘대서’와 ‘고운’은 잎에서, ‘크로다’와 ‘두백’은 줄기에서 다른 두 품종들보다 많은 경향이였다. K^+ 함량은 잎에서는 염처리 농도가 높을수록 감소하였던 반면, 줄기에서는 EC 4.0 dS/m에서 증가한 후 EC 8.0 dS/m의 고염처리에서는 감소하였다(Fig. 2). K^+ 함량은 특히 줄기에서 염처리 농도별 증감폭이 컸는데, EC 4.0 dS/m처리의 ‘크로다’와 ‘두백’에서 가장 많았다. Ca^{2+} 함량은 네 품종 모두에서 공통적으로 잎, 줄기, 괴경 모든 부위에서 염처리로 축적이 증가하였다(Fig. 3). 특히 잎에서의 함량 증가가 줄기나 괴경에서보다 두드러졌으며, 품종에 있어서는 ‘크로다’와 ‘두백’에서의 증가가 ‘대서’나 ‘고운’에서보다 높은 경향이였다. 염스트레스 조건에서 식물체 내 Na^+ 이온의 함량 증가는 일반적으로 알려져 있는 사실이나(Kim *et al.*, 2010), 품종 및 식물체 조직간 축적 양상에 대해서는 연구가 미흡하다. 다만, Jaarsma 등(2013)이 염스트레스 조건에서 내염성이 강한 품종은 줄기에, 약한 품종은 잎에 Na^+ 이온의 축적이 많은 경향이였다고 보고한 바 있다. 본 실험에서도 염처리로 인하여 염저항성이 약한 것으로 알려진 ‘대서’와 ‘고

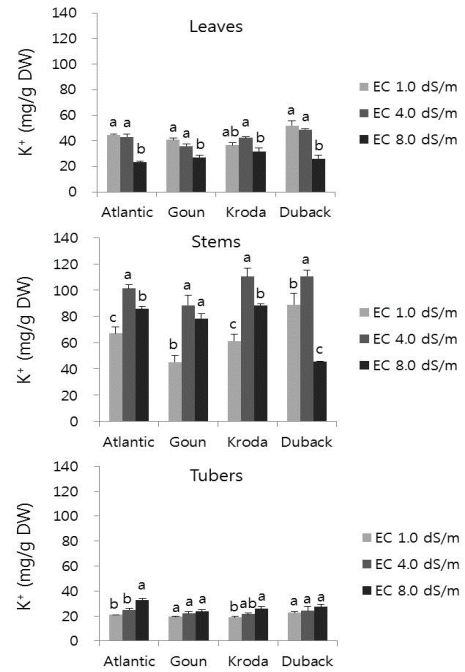


Fig. 2. Comparison of K^+ content in leaf, stem, and tuber of four potato varieties under saline conditions. Vertical bars represent the standard errors of means(n=3). Different letters indicate significant differences at $P \leq 0.05$ according to Duncan's multiple range test.

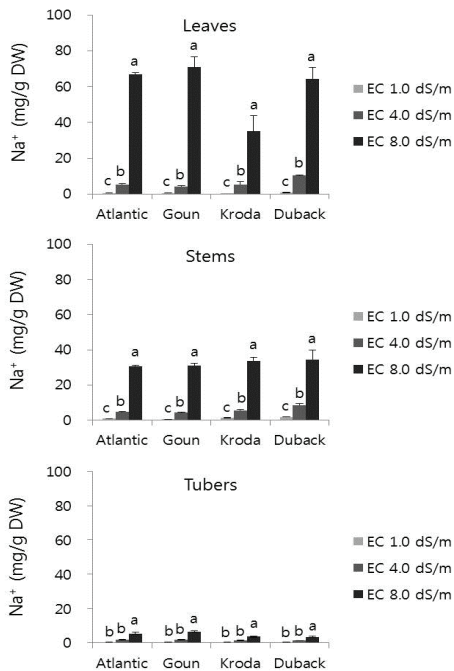


Fig. 1. Comparison of Na^+ content in leaf, stem, and tuber of four potato varieties under saline conditions. Vertical bars represent the standard errors of means(n=3). Different letters indicate significant differences at $P \leq 0.05$ according to Duncan's multiple range test.

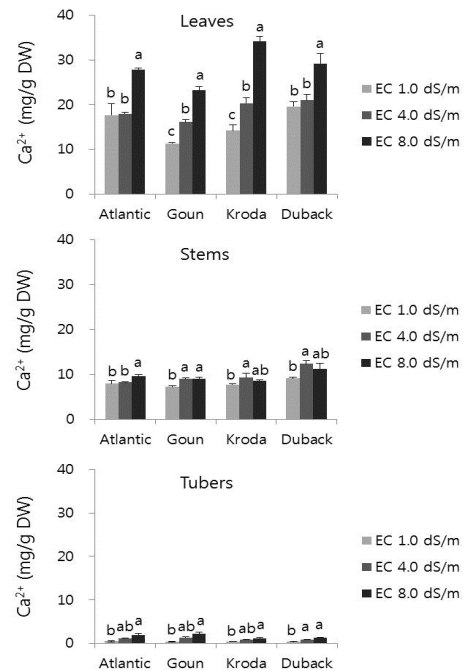


Fig. 3. Comparison of Ca^{2+} content in leaf, stem, and tuber of four potato varieties under saline conditions. Vertical bars represent the standard errors of means(n=3). Different letters indicate significant differences at $P \leq 0.05$ according to Duncan's multiple range test.

운'은 잎에서, 상대적으로 강한 것으로 알려진 '크로다'와 '두백'은 줄기에서 Na^+ 이온의 축적이 많은 것을 볼 수 있었는데, 품종에 따른 염스트레스에 대한 반응 차이에서 비롯된 것으로 생각되었다(Im *et al.*, 2016). 무기성분의 식물체 조직별 ANOVA 분석에서(Table 2) 여러 무기성분들 중 K^+ 이온은 잎과 줄기에서 동시에 고도의 유의성($p \leq 0.001$)을 나타냈는데, K^+ 은 세포내 다양한 효소들의 co-factor로서 삼투스트레스 조절(Shabala and Cuin, 2008; Hauser and Horie, 2010), 세포막의 안정성(Rengel, 1992) 등에 중요한 역할을 수행하는 이온으로 알려져 있다. 따라서 염스트레스 환경에서 세포내 K^+ 이온의 항상성 유지와 보유력은 대부분의 내염성 식물이 갖는 주된 특징으로 보고되어 있기도 하다(Chen *et al.*, 2007; Cuin *et al.*, 2008).

염스트레스 처리에 따른 Na^+ 이온과 무기성분 함량비의 ANOVA 분석 결과

염스트레스처리에 따른 Na^+ 이온 함량에 대한 각 무기성분 함량비의 ANOVA 분석 결과는 Table 3과 같다. 잎의 경우, Na^+ 이온에 대한 기타 무기성분의 함량비는 염처리에 대해서는 민감하였으나, $\text{P}_2\text{O}_5/\text{Na}^+$ ($p \leq 0.01$)를 제외하고는 품종이나 품종×염의 교호작용에 대한 유의성은 없었다. 하지만 줄기에서는 Na^+ 이온에 대한 기타 모든 무기성분의 함량비가 품종, 염, 그리고 품종×염의 교호작용에 대해 고도의 유의성($p \leq 0.001$)을 나타내었다. 피경에서는 T-N/ Na^+ , $\text{P}_2\text{O}_5/\text{Na}^+$ 이 품종 및 품종×염의 교호작용에 대해 유의적 차이를 나타냈다. 이러한 결과로부터 염스트레스 환경 조건에서 감자 식물체는 잎이나 피경보다 줄기에서 Na^+ 이온에 대한 기타 무기성분들의 변이가 더 민감하게 영향을 받는 것을 알 수 있었다. Jaarsma 등(2013)은 내염성 수준에 따른 식물체 조직간 무기성분의 조성 및 함량 차이를 보고한 바 있고, Flowers 등(1977)은 염스트레스 피해가 Na^+ 이온의 절대적인 함량 증가가 아닌 K^+ 및 Na^+ 이온간 불균형에서 기인한다고 하였다. 본 실험에서 다른 조직보다 줄기에서 Na^+ 이온의 함량과 기타 무기성분 비율이 고도의 유의성을 나타냄에 따라, 품종간

내염성 판단에 있어 줄기에서의 무기성분 조성, 특히 K^+ 이온과 Na^+ 이온의 상대적 비율에 주목할 필요성이 있을 것으로 생각된다. 즉, Na^+ 이온에 대한 K^+ 이온 비율의 ANOVA 분석에서 품종에 의한 잎과 피경에서의 유의성은 낮았으나, 줄기에서는 고도로 유의적인 차이를 나타냈다($F=15.36$, $p \leq 0.001$). 염에 대해서는 잎($F=40.94$, $p \leq 0.001$), 줄기($F=239.03$, $p \leq 0.001$), 피경($F=322.26$, $p \leq 0.001$) 등 모든 조직에서 매우 민감한 차이가 있었다. 품종×염의 교호작용에 있어서도 잎과 피경에서는 유의성이 낮았으나, 줄기에서는 매우 높았다($F=11.85$, $p \leq 0.001$). 한편, 염스트레스에 처한 식물체에서 환경스트레스의 신호전달물질을 구성하는 것으로 알려져 있는 Ca^{2+} 이온(Liu and Zhu, 1997)도 Na^+ 이온과의 비율에 있어 품종에 대해서는 잎과 피경에서 유의성이 없었던 반면, 줄기에서는 민감하게 영향을 받은 것으로 나타났다($F=18.76$, $p \leq 0.001$). 또한 염에 대해서는 잎, 줄기, 피경 모두에서 민감하게 반응하였으나, 품종×염의 교호작용에 대해서는 줄기에서만 고도의 유의적 차이가 있었다($F=16.55$, $p \leq 0.001$).

염스트레스 처리에 따른 K^+/Na^+ 및 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 비교

염처리에 따른 Na^+ 이온에 대한 K^+ 과 Ca^{2+} 이온의 비율을 분석하였다. K^+/Na^+ 은 염처리 농도가 높을수록 감소하는 경향이 있었다(Fig. 4). 특히 EC 4.0 dS/m의 염처리 시 모든 품종들의 잎, 줄기, 피경에서 급감하였는데, 그 감소폭은 품종간 차이가 있었다. 즉, '대서'와 '고운'에서 감소폭이 컸고, '크로다'와 '두백'에서는 상대적으로 적었으며, 이러한 경향은 줄기에서 두드러졌다. 즉, 염스트레스 환경에서 '크로다'와 '두백'은 '대서'나 '고운'보다 K^+ 이온의 손실이 상대적으로 적은 것을 알 수 있었다. $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 은 염처리로 인하여 시험품종들 모두 잎에서 감소폭이 가장 컸고, 줄기, 피경 순이었다(Fig. 5). 잎에서는 '두백'이 다른 품종들 보다 감소폭이 가장 적었으며, 줄기에서는 '크로다'와 '두백'이 '대서'나 '고운'보다 상대적으로 적었다. 이는 염스트레스 환경조건에서 '크로다'와 '두백'이 '대서'나 '고운'보다 줄기에 Na^+ 에 대

Table 3. Results of two way ANOVA in the effects of variety, salinity, and their interactions on ratios of other minerals with Na^+ in leaf, stem, and tuber of four potato varieties

Variables		T-N/ Na^+	$\text{P}_2\text{O}_5/\text{Na}^+$	K^+/Na^+	$\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$	$\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$
Leaf	Variety	2.05 ^{NS}	6.67 ^{**}	1.09 ^{NS}	1.26 ^{NS}	2.84 ^{NS}
	Salinity	48.84 ^{***}	66.68 ^{***}	40.94 ^{***}	37.80 ^{***}	56.05 ^{***}
	Variety x Salinity	1.59 ^{NS}	5.08 ^{**}	0.93 ^{NS}	1.09 ^{NS}	2.29 ^{NS}
Stem	Variety	54.65 ^{***}	67.10 ^{***}	15.36 ^{***}	18.76 ^{***}	37.42 ^{***}
	Salinity	460.19 ^{***}	426.38 ^{***}	239.03 ^{***}	165.07 ^{***}	264.33 ^{***}
	Variety x Salinity	36.79 ^{***}	40.74 ^{***}	11.85 ^{***}	16.55 ^{***}	27.14 ^{***}
Tuber	Variety	7.02 ^{**}	3.65 [*]	2.28 ^{NS}	0.52 ^{NS}	1.19 ^{NS}
	Salinity	307.64 ^{***}	228.94 ^{***}	322.26 ^{***}	32.52 ^{***}	159.26 ^{***}
	Variety x Salinity	3.13 [*]	2.72 [*]	1.42 ^{NS}	0.69 ^{NS}	0.86 ^{NS}

Numbers represent F values at 5% level.

^{NS}, ^{*}, ^{**}, ^{***} Non-significant or significant at $p \leq 0.05$, 0.01, or 0.001, respectively.

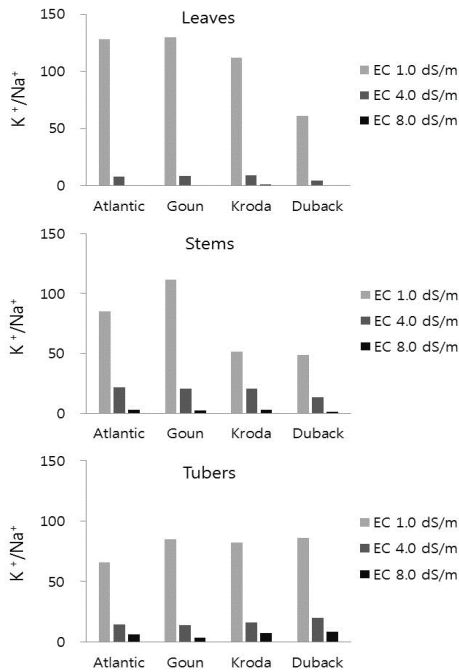


Fig. 4. Comparison of K⁺/Na⁺ in leaf, stem, and tuber of four potato varieties under saline conditions.

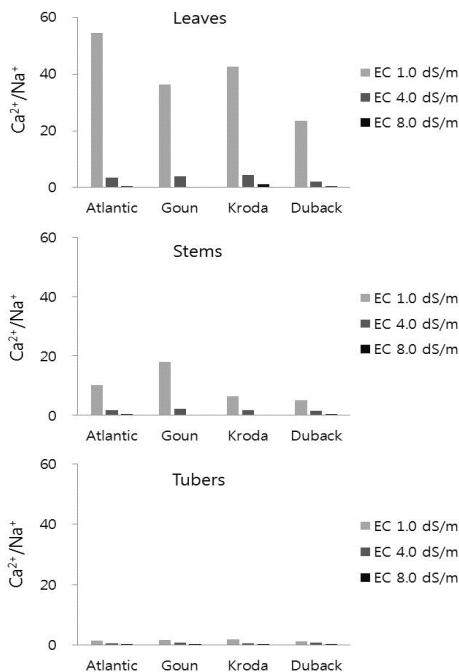


Fig. 5. Comparison of Ca²⁺/Na⁺ in leaf, stem, and tuber of four potato varieties under saline conditions.

한 Ca²⁺ 이온의 함량 비율을 상대적으로 더 높게 유지하고 있음을 나타낸다. 일반적으로 K⁺ 이온은 세포막을 안정화 시키고 (Rengel, 1992), 세포내 삼투스트레스를 조절(Shabala and Cuin, 2008; Hauser and Horie, 2010)하여 염스트레스에 저항성을 갖게 한다. 하지만 K⁺ 이온은 Na⁺ 이온과 화학적인

특성이 유사하여 염류화 환경 하에서 세포내 유입 시 Na⁺ 이온과 경쟁관계를 형성하기 때문에, 식물체내 Na⁺ 이온의 흡수 증가는 반대로 K⁺ 이온의 유입 감소를 의미한다(Aziz and Khan, 2001). 따라서 식물체내 K⁺ 이온의 보유력은 염스트레스에 처한 식물에서 중요한 저항성 요소가 된다. 또한, Ca²⁺ 이온은 인지질의 인과 카르복실 그룹을 연결하여 세포막을 견고하게 하고(Legge *et al.*, 1982), 막투과성을 안정적으로 유지시켜서(Cramer *et al.*, 1987), 식물 조직내 Ca²⁺ 이온의 축적은 염스트레스에 대한 저항력을 높이는 것으로 알려져 있다(Suhayda *et al.*, 1992). 따라서, 염스트레스 환경에서 K⁺ 이온과 Ca²⁺ 이온의 보유능력이 높을수록 Na⁺ 이온의 세포내 유입을 줄일 수 있고, Na⁺ 이온에 의한 이온 불균형을 경감시킬 수 있다. 이 때문에 염스트레스 환경 하에서 K⁺ 이온과 Ca²⁺ 이온의 보유 능력은 염스트레스 저항성 판단의 중요한 요소로 사용되기도 한다(Chen *et al.*, 2007; Cuin *et al.*, 2008). 이러한 측면에서, 본 실험의 염처리 조건에서 Na⁺ 이온에 대한 K⁺과 Ca²⁺ 이온의 비율이 비교적 높게 유지되었던 ‘크로다’, ‘두백’은 상대적으로 감소폭이 컸던 ‘대서’, ‘고운’에 비해 염스트레스 저항성이 강한 품종으로서 생각되었다.

본 시험의 결과, 염스트레스는 감자의 중요한 가공형질인 건물율, 전분함량, 환원당함량을 감소시키며, 조직간 무기성분에 있어 염스트레스가 심할수록 앞에서는 Na⁺과 Ca²⁺ 함량이 증가하고, 줄기에서는 K⁺ 함량의 변화가 커지는 것을 확인하였다. 또한 염스트레스에 대한 이들 반응은 품종에 따라 차이가 있으며, ‘크로다’나 ‘두백’이 ‘대서’, ‘고운’보다 염처리에 따른 건물 및 전분함량의 감소폭이 상대적으로 적어 염스트레스 환경조건 하에서 가공용 원료 감자의 생산에 유리할 것으로 판단된다.

Note

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgment

This research was supported by the project ‘Technology Development of Early Breeding and Selection for Potato with Environmental Stress tolerance’ (PJ01254002), Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). Water quality for agriculture, No. 29, pp.1-86, Irrigation and Drainage Paper, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
 Aziz, I., & Khan, M. A. (2001). Experimental assessment

- of salinity tolerance of *Ceriops tagal* seedlings and saplings from the Indus delta, Pakistan. *Aquatic Botany*, 70(3), 259-268.
- Chen, Z., Zhou, M., Newman, I. A., Mendham, N. J., Zhang, G., & Shabala, S. (2007). Potassium and sodium relations in salinised barley tissues as a basis of differential salt tolerance. *Functional Plant Biology*, 34(2), 150-162.
- Cramer, G. R., Lynch, J., Lauchli, A., & Epstein, E. (1987). Influx of Na^+ , K^+ , and Ca^{2+} into roots of salt-stressed cotton seedlings; Effect of supplemental Ca^{2+} . *Plant Physiology*, 83(3), 510-516.
- Cuin, T. A., Betts, S. A., Chalmandrier, R., & Shabala, S. (2008). A root's ability to retain K^+ correlates with salt tolerance in wheat. *Journal of Experimental Botany*, 59(10), 2697-2706.
- Dreyer, I., Horeu, C., Lemaillet, G., Zimmermann, S., Bush, D. R., Rodriguez, N. A., Schachtman, D. P., Spalding, E. P., Sentenac, H., & Gaber, R. F. (1999). Identification and characterization of plant transporters using heterologous expression systems. *Journal of Experimental Botany*, 50(1), 1073-1087.
- Flowers, T. J., Troke, P. F., & Yeo, A. R. (1977). The mechanism of salt tolerance in halophytes. *Annual Review of Plant Physiology*, 28, 89-121.
- Ghosh, S. C., Asanuma, K. I., Kusutani, A., & Toyota, M. (2001). Effect of salt stress on some chemical components and yield of potato. *Soil Science and Plant Nutrition*, 47(3), 467-475.
- Haase, N. U. (2003). Estimation of dry matter and starch concentration in potatoes by determination of underwater weight and near infrared spectroscopy. *Potato Research*, 46(3-4), 117-127.
- Hasegawa, P. M., Bressan, R. A., Zhu, J. K., & Bohnert, H. J. (2000). Plant cellular and molecular responses to high salinity. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 51(1), 463-499.
- Hauser, F., & Horie, T. (2010). A conserved primary salt tolerance mechanism mediated by HKT transporters: a mechanism for sodium exclusion and maintenance of high K^+/Na^+ ratio in leaves during salinity stress. *Plant Cell and Environment*, 33(4), 552-565.
- Im, J. S., Cho, J. H., Cho, K. S., Chang, D. C., Jin, Y. I., Yu, H. S., & Kim, W. Y. (2016). Effect of salinity stress on growth, yield, and proline accumulation of cultivated potatoes (*Solanum tuberosum* L.). *Korean Journal of Horticultural Science & Technology*, 34(6), 818-829.
- Jaarsma, R., de-Vries, R. S. M., de-Boer, A. H. (2013). Effect of salt stress on gGrowth, Na^+ accumulation and proline metabolism in potato (*Solanum tuberosum*) cultivars. *PLoS ONE*, 8(3), e60183.
- Jha, G., Choudhary, O. P., & Sharda, R. (2017). Comparative effects of saline water on yield and quality of potato under drip and furrow irrigation. *Cogent Food & Agriculture*, 3(1), 1369345.
- Kim, J. S., Shim, I. S., & Kim, M. J. (2010). Physiological response of chinese cabbage to salt stress. *Korean Journal of Horticultural Science & Technology*, 28(3), 343-352.
- Kim, S., Yang, C. H., Jeong, J. H., Choi, W. Y., Lee, K. S., & Kim, S. J. (2013). Physiological response of potato variety to soil salinity. *Korean Journal of Crop Science*, 58(2), 85-90.
- Kolasa, K. M. (1993). The potato and human nutrition. *American Potato Journal*, 70(5), 375-384.
- Legge, R. L. E., Thompson, E., Baker, J. E., & Lieberman, M. (1982). The effect of calcium on the fluidity and phase properties of microsomal membrane that isolated from post climacteric golden delicious apples. *Plant and Cell Physiology*, 23(2), 161-169.
- Levy, D. (1992). The response of potatoes (*Solanum tuberosum* L.) to salinity: Plant growth and tuber yields in the arid desert of Israel. *Annals of Applied Biology*, 120(3), 547-555.
- Levy, D., Fogelman, E., & Ytzhak, Y. (1993). Influence of water and soil salinity on emergence and early development of potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars and effect of physiological age of seed tubers. *Potato Research*, 36(4), 335-340.
- Levy, D., & Veilleux, R. E. (2007). Adaptation of potato to high temperatures and salinity-a review. *American Journal of Potato Research*, 84(6), 487-506.
- Li, X. G., Li, F. M., Ma, Q. F., & Cui, Z. J. (2006). Interactions of NaCl and Na_2SO_4 on soil organic C mineralization after addition of maize straws. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(8), 2328-2335.
- Liu, J. P., & Zhu, J. K. (1997). An *Arabidopsis* mutant that requires increased calcium for potassium nutrition and salt tolerance. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 94(26), 14960-14964. <https://doi.org/10.1073/pnas.94.26.14960>.
- Maas, E. V., & Hoffman, G. J. (1977). Crop salt tolerance-current assessment. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 103(2), 115-134.
- Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 651-681.
- Parida, A. K., & Das, A. B. (2005). Salt tolerance and

- salinity effects on plants: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 60(3), 324-349.
- Rengel, Z. (1992). The role of calcium in salt toxicity. *Plant, Cell & Environment*, 15(6), 625-632.
- Rhoades, J. D., & Loveday, J. (1990). Salinity in irrigated agriculture. In: *Irrigation of agricultural crops* (eds. Stewart, B. A., Nielsen, D. R.), pp. 1089-1142. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
- Shabala, S., & Cuin, T. A. (2008). Potassium transport and plant salt tolerance. *Physiologia Plantarum*, 133(4), 651-669.
- Suhayda, C. G., Redmann, R. E., Harvey, B. L., & Cipywnyk, A. L. (1992). Comparative response of cultivated and wild barley species to salinity stress and calcium supply. *Crop Science*, 32(1), 154-163.
- Yin, Y. G., Kobayashi, Y., Sanuki, A., Kondo, S., Fukuda, N., Ezura, H., Sugaya, S., & Matsukura, C. (2010). Salinity induces carbohydrate accumulation and sugar regulated starch biosynthetic genes in tomato (*Solanum lycopersicum* L. cv. 'Micro-Tom') fruits in an ABA and osmotic stress-independent manner. *Journal of Experimental Botany*, 61(2), 563-574.
- Yoon, J. T., Kwon, H. J., Hong, G. P., Ahn, M. S., Heu, N. K., Lim, H. T., & Kim, K. H. (1999). The changes of nutrient composition in the edible potato varieties during storage. *Korean Journal of Horticultural Science & Technology*, 17(4), 467-469.
- Yun, D. J. (2005). Molecular mechanism of plant adaption to high salinity. *Journal of Plant Biotechnology*, 32(1), 1-14.