

토양개량제와 수크령 식재에 따른 고농도 염화칼슘 염분저감 효과 비교^{1a}

양지² · 박재현³ · 윤용한⁴ · 주진희^{5*}

Comparison of the High Concentration Calcium Chloride(CaCl₂) Salt Reduction Effect of Soil Amendment Agent and Planting *Pennisetum alopecuroides*^{1a}

Ji Yang², Jae-Hyeon Park³, Yong-Han Yoon⁴, Jin-Hee Ju^{5*}

요약

본 연구는 고농도 염화칼슘 처리 토양에서 토양개량제인 하이드로볼, 활성탄의 처리와 수크령 식재 유무에 따른 토양침출수의 화학적 특성과 토양 내 염분 저감 효과에 미치는 영향을 규명하고자 수행하였다. 고농도 제설제처리 염분토양에서 토양개량제 하이드로볼, 활성탄의 염분 저감 효과 및 수크령의 식재 효과를 알아보기 위하여 2018년 4월부터 10월까지 유리온실에 직경 10 cm, 높이 9 cm의 플라스틱 포트에 수크령을 식재하고 무처리 (Cont.), 하이드로볼 (H), 활성탄 (AC), 수크령식재 (P), 하이드로볼 + 수크령식재 (H + P), 활성탄 + 수크령식재 (AC + P) 총 6개의 처리구로 나누었다. 염화칼슘 (CaCl₂) 처리는 10 mg/L 농도의 수용액을 조제하여 2주 간격 1회 200mL씩 분주하였다. 토양침출수 분석은 pH와 EC, 염류계 치환성양이온 (K⁺, Ca²⁺, Na⁺, Mg²⁺) 함량을 측정하였고, 수크령의 생육은 초장, 엽장, 엽폭, 엽수를 측정한 뒤 실험종료 후 생체중, 건물중, 건물률, T/R률을 조사 분석하였다. 토양침출수 화학성 분석결과, 토양산도는 처리구별 뚜렷한 차이를 보이지는 않았으나 모든 처리구에서 약산성을 띄었으며, 전기전도도는 H + P, P, AC + P, H, AC, Cont. 순으로 감소하는 경향을 보였다. 염류계 치환성양이온함량에 있어서 토양 염류도의 지표라 할 수 있는 Ca²⁺ 항목에서 Cont., P, H, AC, H + P, AC + P 순으로 높아지는 경향을 보였다. 수크령의 생육변화는 H + P, AC + P, P 순으로 초장, 엽장, 엽폭, 엽수 모든 항목에서 상대생장률이 통계적으로 유의하게 높게 나타났다. 따라서 하이드로볼과 활성탄은 제설제 피해지역 토양개량제로 활용가치가 높으며 수크령은 토양 내 고농도 염화칼슘 염분저감 식물소재로 적합한 수종이라 판단된다.

주요어: 토양제염, 내염성식물, 염스트레스, 식물정화, 토양침출수

1 접수 2020년 5월 7일, 수정 (1차: 2020년 6월 30일, 2차: 2020년 7월 22일), 게재확정 2020년 7월 27일

Received 7 May 2020; Revised (1st: 30 June 2020, 2nd: 22 July 2020); Accepted 27 July 2020

2 건국대학교 대학원 녹색기술융합학과 박사과정 Dept. of Green Technology Convergence, Graduate School, Konkuk University, 268 Chungwon-daero, Chungju-si 27478, Korea.(jasmin85@kku.ac.kr)

3 국립산림품종관리센터 종묘관리과 박사후 연구원 Korea Forest Seed & Variety Center, 72, Suhoeri-ro, Suanbo-myeon, Chungju-si 27495, Korea.(jh2344@korea.kr)

4 건국대학교 녹색환경시스템전공 교수 Dept. of Green Technology Convergence, Konkuk University, 268 Chungwon-daero, Chungju-si 27478, Korea.(yonghan7204@kku.ac.kr)

5 건국대학교 녹색환경시스템전공 부교수 Dept. of Green Technology Convergence, Konkuk University, 268 Chungwon-daero, Chungju-si 27478, Korea.(jjhkkc@kku.ac.kr)

a 이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2018R1A1A3A0)임.

* 교신저자 Corresponding author: Tel: +82-43-840-3541, E-mail: jjhkkc@kku.ac.kr

ABSTRACT

The purpose of this study was to investigate the effects of soil amendment treatments, such as hydroball, and active carbon, and planting *Pennisetum alopecuroides* for reducing calcium chloride (CaCl_2) of soil leachate and the growth of *Pennisetum alopecuroides*. The experiment planted *Pennisetum alopecuroides* in a plastic pot with a diameter of 10 cm and a height of 9 cm in a greenhouse April-October 2018. The experimental group comprised six treatments, including Non-treatment (Cont.), Hydroball (H), Active carbon (AC), planting *Pennisetum alopecuroides* (P), hydroball + planting *Pennisetum alopecuroides* (H + P), and active carbon + planting *Pennisetum alopecuroides* (AC + P). The dissolution of the CaCl_2 concentration 200ml of 10g/L was irrigated once every two weeks. We measured the growth (plant height, leaf length, leaf width, number of leaves), EC, pH, and exchangeable cations (K^+ , Ca^{2+} , Na^+ , and Mg^{2+}) according to the high concentration of CaCl_2 in the plant and soil leachate. In a treatment with the 'hydroball' amendment, the soil leachate electrical conductivity (EC), and the cation exchangeable were decreased more than those of the control, while the growth of *Pennisetum alopecuroides* relative growth rate(RGR) increased. Overall, application with the hydroball amendment added the planting of *Pennisetum alopecuroides* improved the salt reduction effect more than the control group. These results indicate that the application of the soil amendment agent hydroball was suitable soil amendments in accordance with the high concentration of calcium chloride (CaCl_2). Also, Planting *Pennisetum alopecuroides* is expected to be appropriate for salt-tolerant plant for soil affected by deicing salt agents.

KEY WORDS: SALT REDUCTION, SALT-TOLERANT PLANTS, SALT STRESS, PHYTOREMEDIATION, SOIL LEACHATE

서론

겨울철 도로 제빙을 위해 주로 사용되는 제설제의 주성분은 염화칼슘(CaCl_2)과 염화나트륨(NaCl)과 같은 염소이온(Cl^-)을 함유한 염화물계 제설제이다(Shin *et al.*, 2010). 이 중 CaCl_2 는 물에 녹을 때 열을 발생하여 용빙 속도가 빠르며 처리가 쉬워 단기간에 눈을 녹인다는 장점을 가지고 있어 우리나라에서 사용빈도와 양이 증가하고 있다(Do *et al.*, 2012). 하지만 녹은 눈은 다량의 염화물계 이온을 함유하게 되고 수용액 상태로 토양에 흡수되어 이른 봄에 식물의 개엽 시기와 맞물리게 되면서 피해를 가속화 시킨다(Sung *et al.*, 2009). 특히 토양 내 특정 염류이온이 과도하게 집적되면 식물의 생리적 활동이 시작되는 봄에 늦은 개엽, 신초 신장 불량 등의 피해를 유발하고(Kwon *et al.*, 2014), 식물체 내 염록소 파괴, 세포막 손상, 수분삼투압 저하 등의 독성을 야기하여 식물 생육을 저해하는 원인이 된다(Lee *et al.*, 2017). 국내외에서는 염화물계 제설제를 대체하기 위하여 폐유기산과 칼슘계부산물을 반응시켜 만든 CMA(Calcium Magnesium Acetate)와 친환경 액상 제설제 EFD(Eco-Friendly Deicer)등 비염화물계 제설제 개발에 대

한 위한 연구가 진행되고 있으나(Dunn *et al.*, 1980; Shin *et al.*, 2010), 상당히 고가이고 속효성이 떨어진다는 문제점이 있다(Do *et al.*, 2012).

최근 염도가 높고 배수가 불량한 간척지의 제염에 토양개량제를 사용한 결과, 토양 물리성 개선에 효과적인 것으로 보고되었다(Jeon *et al.*, 2017). 토양개량제는 비용이 경제적이고 처리가 간편하며 단기간에 토양 내 통기성과 배수를 도와 식물이 성장하기 쉬운 토양으로 만들어 주는 장점이 있다(Jang *et al.*, 2010). 특히 하이드로볼은 적갈색의 풍화토로 50~60%가 이산화규소(SiO_2)로 구성되어 있으며, 대부분 표면이 넓은 벌집 구조로 수많은 공간이 복층 구조를 이루고 있다(Hwang *et al.*, 2000). 이러한 스폰지 같은 구멍으로 높은 수분 보유력을 지니고 있어 식물생육에 긍정적 효과가 나타나며(Takahashi and Miyake, 1974; Na *et al.*, 2013), 독소 제거, 정화 작용 등의 역할로(Koh *et al.*, 2000; Park *et al.*, 2000; Choi and Lee, 2013) 중금속을 흡착 제거하거나(Ryoo and Choi, 2012; Lim *et al.*, 2005; Moon *et al.*, 1996), 녹조를 제거하기 위한 연구도 활발하게 진행되고 있다(Choi and Lee, 2013). 또한 토양개량제인 활성탄은 갈탄, 이탄 등을 활성화제인 염화아연이나

인산과 같은 약품으로 처리하여, 건조시키거나 목탄을 수증기로 활성화시켜 탄소를 함유한 물질을 활성 시킨 것으로 내부 표면적이 크고 흡착능력이 매우 강한 무정형 탄소의 집합체이다(Park *et al.*, 2004). 살균력과 탈취 효과가 있으며 흡착력이 뛰어나 수질오염물질의 제거에 널리 쓰이는 재료이며(Kim *et al.*, 2006), 채소, 과수, 화훼, 화분, 버섯재배 등에 활용되며 토질을 개선하는데 큰 효과가 있다고 보고되었다(Jang *et al.*, 2010).

한편, 환경오염 저감 및 제어 목적으로 식물정화기술(phytoremediation technology)에 대한 관심이 높아지고 있다(Lee, 2012). 식물정화기술은 경제적이고, 토양 안정화에 도움을 주며, 다양한 종류의 오염물질 처리에 적합할 뿐 아니라, 관상가치가 우수하여 경관성을 향상시킬 수 있는 기술이다(Kwon *et al.*, 2019). 일반적으로 고농도 염 환경에서 서식하는 식물종은 건조와 염 조건에 대해 저항성을 가지는 삼투조절(osmoregulation)을 수행한다(Choi *et al.*, 2004). 단자엽식물에 속하는 벼과(Poaceae)식물은 염해 토양과 건조한 지역에서 잘 자라 경제적 가치가 높고 염 분비선을 통하여 외부로 유입된 염을 체외로 배출시켜 염 스트레스에 대한 내성이 높다(Atia *et al.*, 2019). 벼과의 대표적인 수종인 수크령(*Pennisetum alopecuroides*)은 제설제 수용액이 유입되는 과정에서 염분에 노출되기 쉬운 도로 및 하천 주변에서 자생하며 훼손지의 교란 지역 및 인공 비탈면 녹화에 많이 사용되는 식물이다. 다양한 환경에 잘 적응하며 열악한 환경 조건하에서 견디며 꽃이 아름다워 관상가치가 뛰어난 식물로 알려져 있다(Mane *et al.*, 2011). 또한 식물과 토양을 활용하여 물 순환과 오염물질 흡수를 돕는 LID 침투도랑 시설에 적응력이 높은 식물로도 선정된 바 있으며(Lee *et al.*, 2016), 자연 친화적인 녹화를 위한 생태 복원용 식물로도 많이 사용되고 있다(Cho and Lee, 2014). 따라서 수크령을 이용하여 자연 친화적인 방법으로 토양의 성질을 개량하는 것은 제설제 피해지 토양을 제염하는 유용한 접근방법이 될 수 있다.

이에 본 연구는 고농도 염화칼슘 처리에 따른 하이드로볼과

활성탄의 토양개량 효과와 토양 침출수의 화학적 특성과 수크령의 생육 반응을 비교 분석하여, 염화칼슘 피해를 위한 토양-식물 연속체 정화 기법을 검증하고자 한다.

연구방법

1. 연구재료 및 실험구조

본 실험은 2018년 4월부터 10월까지 충북 충주시 건국대학교 글로벌캠퍼스 내 유리온실에서 수행되었으며, 실험기간 중 내부의 환경조건은 평균기온 12.87°C, 일조시간 합계는 248.9hr 이었다. 실험에 사용된 공시식물은 2018년 3월에 충남 천안시 병천면에 위치한 식물원에서 크기 10cm의 수크령 모종을 구입한 후 유리온실에서 약 한 달간 순화 시킨 뒤, 초장을 5cm로 균일하게 잘라 사용하였다. 토양재료는 코코피트 74.84%, 질석 15%, 흑운모 5%, 펄라이트 5%, 비료 0.158%, 습윤제 0.002% 로 이루어진 원예용 상토(Han Pan-Seung, SGtech, Korea)를 사용하였다. 토양개량제는 다공질 소재인(Jang *et al.*, 2010) 지름 8mm인 하이드로볼(Hwangto-Ball, YKbio, Korea)과 규격 8×30 mesh인 입상활성탄(Activated Carbon, YAKURI Pure Chemicals, Japan)을 사용하였으며, 제설제는 겨울철 도로제설에 가장 보편적으로 쓰이는 순도 74% 분말 염화칼슘(CaCl₂, Oriental Chemical Industries, Korea)을 사용하였다. 실험구 조성은 고농도 제설제 처리에 따른 수크령의 생육 및 토양개량제의 효과에 대하여 알아보기 위해 직경 10cm, 높이 9cm의 플라스틱 포트에 부직포를 깔고 원예용상토 100g을 채운 뒤 모종을 10반복 정식하였으며, 포트 하부로 침투되는 토양침출수의 집수를 위해 지름 14cm의 플라스틱 용기를 받쳐놓았다. 토양개량제의 처리는 상토대비 활성탄을 20% 혼합한 처리에서 생육에 적합한 pH가 유지되었으며 식물생육이 전반적으로 우수하였다는 연구결과(Kim *et al.*, 2004)를 참고하여 부피비 20%에 해당되는 활성탄을 혼합

Table 1. Experimental characteristics of the treatment of soil amendments and *Pennisetum alopecuroides* planting effect.

Treatments	^x Cont.	H	AC	P	H + P	AC + P
<i>Pennisetum alopecuroides</i>	^y N	N	N	P	P	P
Horticultural growing media (%)	100	80	80	100	80	80
Hydroball (%)	-	20	-	-	20	-
Active carbon (%)	-	-	20	-	-	20

^xCont.; non-treatment, H; hydroball treatment, AC; active carbon treatment, P; planting *Pennisetum alopecuroides*, H + P; planting *Pennisetum alopecuroides* in the hydroball treatment, AC + P; planting *Pennisetum alopecuroides* in the active carbon treatment)

^yN; non-treatment, P; planting *Pennisetum alopecuroides*

하여 처리하였으며, 무게는 40g plant⁻¹이었다. 균일한 조건에서 토양개량제 효과를 검증하기 위하여 하이드로볼 또한 동일하게 부피비 20% 수준인 80g plant⁻¹을 혼합처리 하였다. 실험구는 상토단일(Cont.), 하이드로볼(H), 활성탄(AC), 수크령식재(P), 하이드로볼 + 수크령식재(H + P), 활성탄 + 수크령식재(AC + P) 총 6가지로 구분하였다(Table).

2. 측정·분석 방법

겨울철 도로에서 적설량에 따른 제설제의 사용 농도는 1.19~7.96%범위이며, 눈이 녹은 후 수용액 상태로 실제 사용하게 되는 제설제의 사용 농도는 약 0.5~0.8%이다(Shin *et al.*, 2010). 제설제는 물에 녹아 수용액 상태로 토양과 식물에 피해를 주며 실제 가장 많은 영향을 끼치는 계절은 이른 봄이라고 볼 때(Sung *et al.*, 2009), 현장에서 사용되는 염농도와 동일한 토양 환경조건에서 실험을 수행하기 위해 고농도 염화칼슘 처리를 1.0%로 설정하였고 이를 분말 염화칼슘(순도 74%)으로 환산하여 10g/L 농도의 수용액으로 조제하여 2주 1회 200mL씩 처리구에 분주하였다. 투과되는 토양침출수는 집수하여 분석에 사용하였으며, 식물의 기본적인 생육을 위하여 흙이 마르지 않게 2일 간격으로 물을 200mL씩 관수 하였다. 토양침출수는 시료 채취 후 5B여과지(Adventec, filter paper No. 5B, Japan)로 여과하여 전기전도도(ST- 3100C, Ohaus Crop, USA)와 산도(ST-3100pH, Ohaus Corp, USA)를 측정하였으며 염화칼슘 농도에 따른 토양 내 염류계 치환성양이온 함량 변화를 알아보기 위하여 유도결합플라즈마 원자방출분광기(ICP OES DV-5300, Perkin elmer, USA)를 이용하여 염류계 치환성양이온(K⁺, Ca²⁺, Na⁺, Mg²⁺) 함량을 분석하였다. 수크령의 생육반응은 매월 마지막 주 초장, 엽장, 엽폭, 엽수를 조사하였으며, 실험 시작일과 처리 후 90일째 생육 값을 측정하여 상대생장률을 구하였다. 상대생장률(RGR, relative growth rate)은 RGR = 100 x B/A의 식을 이용하였다(Song *et al.*, 2010). 여기에서 A는 초기 식물체 생육항목 측정값, B는 해당 시기의 식물체 생육항목 측정값이다. 실험종료 후에는 식물재료를 채취하여 지상부, 지하부 생체중을 잴 뒤 열풍건조기(C-DF, CHANGSHIN Sci Co, Korea)를 이용하여 70℃에서 48시간 건조한 후 건물중을 측정하였으며, 건물물(DM: dry matter) = (건물중/생체중) × 100 (Kwack *et al.*, 2014)과 T/R률(root/shoot ratio) = (지하부 건물중/ 지상부 건물중) × 100 (Wang *et al.*, 2015)을 산출하였다.

모든 측정은 시료당 3반복 평균값을 사용하였으며, 수집된 데이터는 PASW statistics 18(SPSS Inc., USA) 프로그램을 이용하여 각 처리 간 차이를 분석하기 위하여 ANOVA test 하였고, 사후검정으로 Duncan multiple range test를 이용하여 5% 유의수준에서 처리평균간 차이를 검정하였으며, 이를

SigmaPlot 12.3(Systat software, Inc., San Jose, CA, USA)을 통해 그래프화 하였다.

결과 및 고찰

1. 토양침출수

1) 산도, 전기전도도

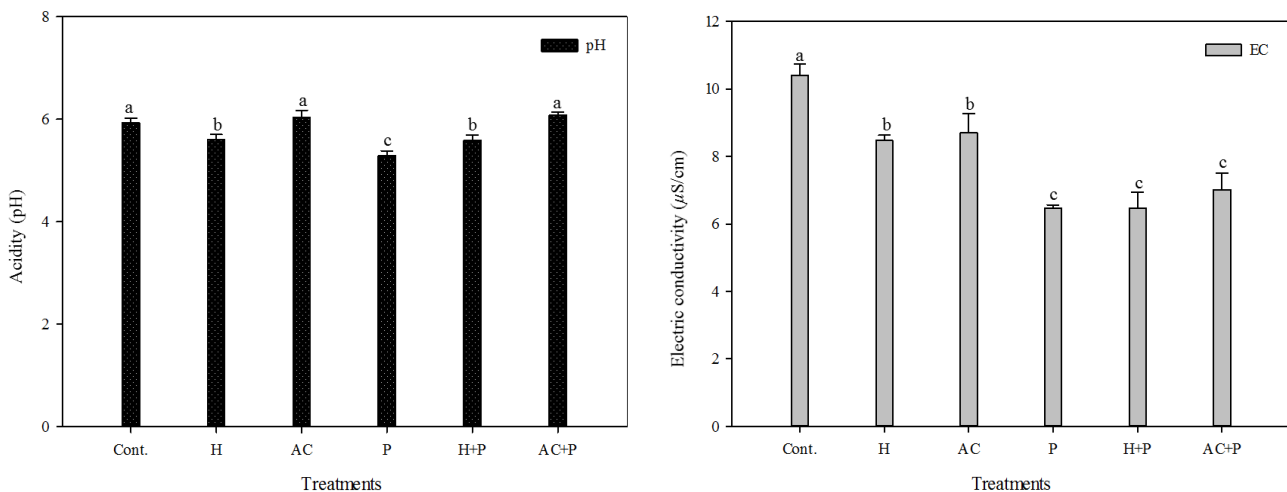
토양 pH는 표준 토양 화학 분석을 위하여 수행되는 가장 기본적인 항목 중 하나로(Minasny *et al.*, 2011) 고농도 염화칼슘 수용액에 따른 수크령의 토양침출수 산도는 Cont.(5.92 ± 0.10), H(5.60 ± 0.09), AC(6.04 ± 0.13), P(5.28 ± 0.09), H + P(5.58 ± 0.10), AC + P(6.08 ± 0.06) 으로 전반적으로 약산성을 띄었으나 활성탄 단일처리 AC와 활성탄과 수크령식재를 혼합 처리한 AC + P에서 pH가 증가하는 양상을 보였다(Figure 1). 선행연구에서 활성탄의 혼합비율에 따른 상토 내 화학성분 변화 실험에서 활성탄이 혼합된 상토의 pH범위는 4.7~7.2이고 활성탄을 20% 혼합한 상토의 pH는 5.2~5.8의 범위로 기간이 경과될수록 초기보다 pH는 높아지는 경향을 보였다는 결과(Kim *et al.*, 2004)로 미루어보아 이는 활성탄 자체의 높은 pH가 강하게 작용된 것이라 사료된다(Kang and Ju, 2013). 특히 활성탄은 약산성이나 알칼리성을 좋아하는 식물을 재배할 때 pH 증진에 이용이 가능할 것으로 판단되나(Lee *et al.*, 2018), pH7이상의 알칼리 토양 또는 염류가 많이 집적된 토양은 활성탄을 사용하지 않는 것이 바람직하다고 사료된다(Park *et al.*, 2008). 토양의 포화침출수에 대한 염농도(Salinity)는 전기전도도(EC)로 평가되어지는데(Lee *et al.*, 2003), 고농도 염화칼슘 처리에 따른 전기전도도는 Cont.(10.40 ± 0.33 μ S/cm), H(8.48 ± 0.15 μ S/cm), AC(8.71 ± 0.56 μ S/cm), P(6.47 ± 0.10 μ S/cm), H + P(6.47 ± 0.47 μ S/cm), AC + P(7.02 ± 0.49 μ S/cm)로 나타났다. 대조구(Cont.)에 비해 수크령 단일식재 P처리구에서 3.93 μ S/cm 값만큼 큰 폭으로 낮은 경향을 보인 이유는 수크령은 대표적인 단자엽 식물로 토양 침출수 내 Ca²⁺, Cl⁻ 이온을 막아 체내 낮은 이온함량을 유지하고, 삼투조절을 담당하는 세포질성 삼투물질이 수용액 상태로 전하를 띠지 않는 경향이 있기 때문에(Choi *et al.*, 2004) 토양 침출수 내 전기전도도를 낮춘 것이라 사료된다. P처리구와 동일하게 수크령과 하이드로볼을 혼합 처리한 H + P처리구에서도 대조구(Cont.)와 비교하였을 때 3.93 μ S/cm 만큼 뚜렷하게 낮은 값을 보였는데, 토양개량제로 쓰인 하이드로볼은 회강암이 풍화되어 만들어진 이차광물로 표면전하 때문에 양이온과 음이온을 흡착하거나 교환반응이 일어나는 성질을 가지고 있다(Moon *et al.*, 1996; Park *et al.*, 2009). 또한 물과 혼합시키면 부유되면서 현탁액을 이루게 되는데, 이러한 현탁액은 수용액

내 양이온의 농도가 높고, 양이온의 전하가 클수록 응집을 촉진시켜 수분을 포함한 토양의 안정화를 이룬다(Rengasamy *et al.*, 1986; Heil and Sposito, 1993; Dontsova and Norton, 2002). 따라서 원자가가 높은 + 2가 양이온이 용해되어 있는 CaCl_2 수용액에서는 하이드로볼 현탁액의 응집을 촉진시켜 확산정도가 약해져(Moon, 1996; Park *et al.*, 2009), 염류계 치환성양이온 층이 얇게 압축되어 토양침출수 내에 전기전도도 또한 낮아진 것으로 사료된다(Figure 1).

2) 염류계 치환성양이온

고농도 염화칼슘 토양에서 토양개량제 하이드로볼과 활성탄 처리와 수크령 식재에 따른 토양 침출수내 염류계 치환성양이온 함량은 다음과 같다(Figure 2). K^+ 은 Cont.(243.62 ± 6.01mg/L), H(221.09 ± 10.60mg/L), AC(240.44 ± 17.38mg/L), P(130.28 ± 11.57mg/L), H + P(98.81 ± 8.13mg/L), AC + P(237.58 ± 8.35mg/L)로 대조구에서 가장 높았으며 H + P처리구에서 가장 적은 함량을 보였다. 일반적으로 K^+ 는 식물생육에 있어서 다량원소로 이용될 수 있으며 결핍 시 잎의 황백화 현상 및 식물생육의 저하를 유발하는데(Wang, 2007), 본 실험에서 H + P 처리구의 K^+ 함량은 식물생육저하를 초래하는 농도는 아닌 것으로 판단되었다(Lee *et al.*, 2018). Ca^{2+} 는 Cont.(1164.07 ± 102.25mg/L), H(840.30 ± 75.47mg/L), AC(715.21 ± 53.04mg/L), P(502.10 ± 3.23mg/L), H + P(454.46 ± 33.09mg/L), AC + P(383.83 ± 9.28mg/L)로 대조구에서 가장

높게 나타났으며, AC + P처리에서 가장 낮게 나타났다. 활성탄의 흡착능력은 활성탄의 표면과 내부에 생성되어 있는 복잡하고도 미세한 세공(pore) 구조에 영향을 가장 많이 받는데(Lee *et al.*, 2005), 활성탄소 1g은 1,000~1,700m²의 표면적을 가지고 있는 다공성 물질이다(Park *et al.*, 2004). 이 같은 특징 때문에 고농도의 염화칼슘 토양으로부터 침수된 토양침출수 내 염류계 치환성양이온 Ca^{2+} 이 흡착되어 함량이 감소된 것으로 보여진다. Na^+ 는 Cont.(152.86 ± 1.71mg/L), H(143.47 ± 3.91mg/L), AC(172.91 ± 6.89mg/L), P(155.12 ± 15.35mg/L), H + P(103.81 ± 4.63mg/L), AC + P(117.53 ± 0.31mg/L)로 AC처리에서 가장 높게 나타났으며, H + P처리구에서 낮은 함량을 보였고, Mg^{2+} 는 Cont.(88.41 ± 3.44mg/L), H(94.94 ± 3.83mg/L), AC(92.61 ± 3.40mg/L), P(110.99 ± 5.03mg/L), H + P(75.67 ± 1.19mg/L), AC + P(69.93 ± 5.51mg/L)로 P처리에서 가장 높은 함량을 보였으며, AC + P처리에서 낮은 함량을 보였다(Figure 2). 종합하면, 염류계 치환성양이온 K^+ 와 Na^+ 에서는 H + P에서 가장 적은 함량을 보였고, Ca^{2+} 는 AC + P처리구에서, Mg^{2+} 는 AC처리구에서 이온함량이 적게 검출되었다. 이와같은 결과는 토양에 존재하는 다양한 이온 중에서 특히 Na^+ 이온은 토양 입자간 반발력 증가를 통해 입단형성을 저해하여 투수성과 경운성을 나쁘게 하는 등 토양 물리성 악화에 가장 큰 영향을 미친다(Lee *et al.*, 2003). 이에 하이드로볼의 분산과 응집에 4가지 양이온(K^+ , Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+})전하량이 미치는 영향에 대한 연구에서(Park *et al.*, 2009) 수용액 중



Vertical bars give the standard error (se) of the mean. Different letters indicate significant different among treatments at $p \leq 0.05$ by Duncan's multiple range test (Cont.; non-treatment, H; hydroball treatment, AC; active carbon treatment, P; *Pennisetum alopecuroides* planting, H + P; *Pennisetum alopecuroides* planted in the hydroball treatment, AC + P; *Pennisetum alopecuroides* planted in the active carbon treatment)

Figure 1. Acidity and electric conductivity and of soil leachate as effected by *Pennisetum alopecuroides* plants and soil amendments.

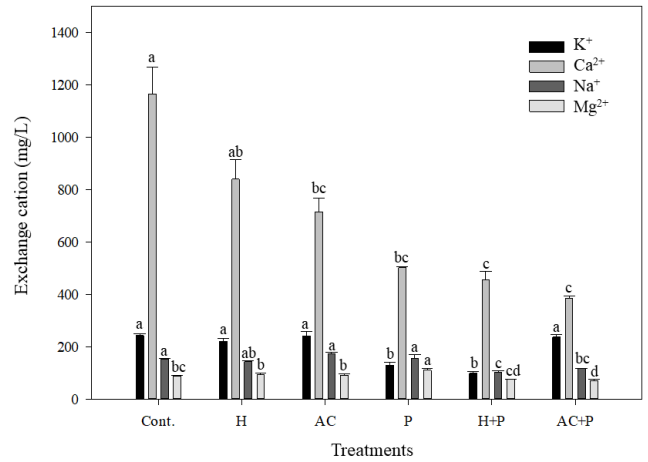
이온농도가 높은 + 2가 양이온(Ca^{2+} , Mg^{2+})을 포함한 경우에는 점토광물에 강하게 흡착되어 응집이 일어나 수용액 내 이온함량이 감소한다는 결과에 따라 토양침출수 내 염류계 치환성양이온 함량이 감소한 것이라 판단된다(Regasamy *et al.*, 1986; Heil and sposito, 1993; Dontsova and Norton, 2002; Park *et al.*, 2009). 또한 활성탄을 이용한 상수처리에서 칼슘은 활성탄 표면에서 이온교환에 의해 10~68mg/g양이 축적이 되며(Lee *et al.*, 2003), 이것을 부피비로 환산하면 L당 1~6.8% 인테 활성탄에 함유되어 있는 양이온과 수용액 중에 존재하는 양이온과의 교환을 의미하는 양이온 교환능력은 17.0mg/g으로 약 L당 1.7%의 교환능력을 갖는다. 이러한 활성탄의 흡착 반응이 침출수내 Ca^{2+} , Mg^{2+} 이온함량을 감소시킨 것이라 판단된다(Choi *et al.*, 2004).

한편, 수크령을 식재하지 않은 Cont.(대조구)에 비해 수크령을 식재한 P처리구가 Ca^{2+} 이온함량이 179.92mg/L 더 낮았고 H처리구는 H + P처리구보다 281.89mg/L, AC처리구는 AC + P처리구보다 402.96mg/L 값만큼 뚜렷하게 감소하는 경향을 보인 이유는 벼과 식물의 특성으로 수크령은 명아주과 식물에 비해 체내에 높은 K^+ , Ca^{2+} , Na^+ 이온과 삼투조절 물질을 축적하여 효과적인 이온조절을 통해 토양침출수 내에 염류계 치환성 양이온 함량이 줄어든 것이라 보여진다(Choi *et al.*, 2004).

2. 식물생육

1) 염화칼슘($CaCl_2$) 처리에 따른 수크령의 상대생장률

식물생육에 있어 토양의 환경조건은 매우 중요한 영향을 끼치는데 고농도 염화칼슘 처리에 따른 수크령 생육을 관찰한 결과는 다음과 같다(Table 2). 생육반응은 식재초기 4월 수크령의 생육값과 생장이 가장 활발한 8월의 값으로 초장, 엽장, 엽폭, 엽수의 상대생장율을 비교 분석하였다. 수크령의 초장은 통계적으로 유의적 차이를 보였으며, P(171.25 ± 7.72%), H + P(400.98 ± 37.16%), 그리고 AC + P(399.15 ± 19.76%)의



Vertical bars give the standard error (se) of the mean. Different letters indicate significant different among treatments at $p \leq 0.05$ by Duncan's multiple range test (Cont.; non-treatment, H; hydroball treatment, AC; active carbon treatment, P; *Pennisetum alopecuroides* planting, H + P; *Pennisetum alopecuroides* planted in the hydroball treatment, AC + P; *Pennisetum alopecuroides* planted in the active carbon treatment)

Figure 2. Levels of soil exchangeable cations (K^+ , Ca^{2+} , Na^+ , and Mg^{2+}) in the soil leachate samples taken from *Pennisetum alopecuroides* as effected by *Pennisetum alopecuroides* plants and soil amendments.

생장률을 나타내 H + P처리구의 수크령 초장이 P처리구에 비해 약 2.3배 우수한 생육을 보였으며 AC + P처리구도 비슷한 경향이였다. 엽장은 P(226.97 ± 7.87%), H + P(386.24 ± 44.25%), AC + P(378.43 ± 18.98%)로 측정되어 H + P처리구의 엽장이 P처리구보다 약 1.7배 우수하였고 통계적 유의성을 보였으며, 엽폭에서는 P(76.28 ± 2.76%), H + P(138.96 ± 5.63%), AC + P(133.33 ± 4.45%)로 P처리구와 비교하였을 때 H + P처리구에서 엽폭이 1.8배 넓었으나 AC

Table 2. Effect of soil amendments on the realtive growth rate(RGR) of *Pennisetum alopecuroides* in the salt accumulation soils($CaCl_2$ 10 g/L).

Treatment	Plant height (%)	Leaf length (%)	Leaf width (%)	No. of leaves (%)
^y P	171.25 ± 7.72b ^z	226.97 ± 7.87b	76.28 ± 2.76b	78.86 ± 2.83b
H + P	400.98 ± 37.16a	386.24 ± 44.25a	138.96 ± 5.63a	154.19 ± 5.27a
AC + P	399.15 ± 19.76a	378.43 ± 18.98a	133.33 ± 4.45a	151.23 ± 18.69a
^x Significance	**	**	**	*

^zMean separation within columns by Duncan's multiple range test at 5% level. All value are mean ± SD of ten determinations. ^yP; *Pennisetum alopecuroides* planting, H + P; planting *Pennisetum alopecuroides* with hydroball treatment, AC + P; planting *Pennisetum alopecuroides* with active carbon treatment. ^xSignificance was determined by ANOVA. ^{ns} nonsignificant, *, ** means significant at $p \leq 0.05$, 0.01 respectively.

+ P처리구 1.7배와 근소한 차이였으며, 엽수 역시 P(78.86 ± 2.83%), H + P(154.19 ± 5.27%), AC + P(151.23 ± 18.69%)로 P처리구에 비해 H + P처리구에서 1.9배 엽수가 많았지만 AC + P처리구 역시 1.9배로 비슷한 수준을 보였다. 전반적으로 모든 생육측정 항목에서 수크령 단일식재한 P처리에 비하여 하이드로볼과 수크령을 식재한 H + P처리에서 생육이 우수한 생육상태를 보이며 유의한 차이를 나타냈다. 이는 고농도 염화칼슘 토양은 낮은 수분 포텐셜과 과도한 염류계 치환성양이온으로 식물의 생육을 억제하나(Kim *et al.*, 2004) 하이드로볼의 높은 수분보유력으로 인해 식물생육에 긍정적 영향을 끼친 결과라 판단된다(Na *et al.*, 2013). 또한 AC + P처리구에서도 H + P처리구 보다는 낮은 생장률을 보였으나 근소한 차이로 P처리구 보다 양호한 생육상태를 보였는데, 이와같은 결과는 염류집적 토양에서 토양개량제에 의한 제염효과를 알아보기 위한 실험에서 활성탄 처리는 토양의 이화학적 특성을 향상시켜 식물의 초장과 엽장을 증진시키고 뿌리의 활력을 도와 주근에 따른 세근의 고른 발달을 돕고 지하부 생장을 좋게 한 것으로 사료되었다(Park *et al.*, 2004).

2) 생체중, 건물중, 건물률, T/R률

수크령의 생체중, 건물중, 건물률, T/R률을 지상, 지하부로 나누어 비교한 결과, 수크령의 지상부 생체중은 P(7.50 ± 0.71g), H + P(15.00 ± 0.89g), AC + P(9.41 ± 0.54g)로 나타났으며 건물중은 P(1.97 ± 0.20g), H + P(5.49 ± 0.47g), AC + P(3.20 ± 0.17g)로 나타났다(Table 3). 지하부 생체중은 P(5.0 ± 0.64g), H + P(22.17 ± 2.13g), AC + P(11.38 ± 0.84g)로 측정되었으며, 건물중은 P(0.68 ± 0.08g), H + P(4.7 ± 0.73g), AC + P(1.81 ± 0.17g)로 측정되었다. 지상부, 지하부의 생체중, 건물중에서 모두 H + P처리구의 생체중 건물중이 가장 무거웠으며 이는 지하부에서 더 뚜렷하게 나타났다. 생체중과 건물중은 식물의 수분변화를 알 수 있는 지표로서(Ju

et al., 2016) 염화칼슘은 식물의 생체중을 감소시키는데 (Patykowski *et al.*, 2018) 건물률 역시 지상부 P(26.28 ± 0.87g), H + P(36.47 ± 2.15g), AC + P(34.64 ± 2.12g), 지하부 P(13.69 ± 0.72g), H + P(20.25 ± 1.55g), AC + P(15.87 ± 0.70g)로, 하이드로볼을 처리한 H + P에서 가장 높았으나 활성탄 처리 AC + P처리와 차이는 크지 않았다. T/R률은 P(34.25 ± 1.98%), H + P(85.50 ± 12.63%), AC + P(57.97 ± 6.18%)로 H + P에서 가장 높았으며 처리간 차이가 매우 뚜렷했다(Table 3). 본 실험에 사용된 활성탄은 입상활성탄(granular activated carbon, GAC)형태로 오염물질들에 대해 높은 제거능을 나타내지만 시간이 경과할수록 수중의 오염물질과 결합되어 흡착력이 저하되는 특성을 가지고 있다(Son *et al.*, 2009). 따라서 하이드로볼과 활성탄처리가 염류집적 토양에서 식물생육에 각기 다른 영향을 미치며 이와같은 생육결과를 나타낸 것으로 판단된다(Table 2).

3. 종합

본 연구는 고농도 염화칼슘처리 토양에서 친환경 토양개량제인 하이드로볼, 활성탄처리와 수크령 식재에 따른 토양침출수의 화학특성과 수크령의 생육상태를 평가하고, 이에 따른 제설제 피해지 토양환경에 적용 가능한 토양개량제의 효용성과 수크령의 염분저감 효과를 검증하여 토양-식물 연속체 기법의 효과를 규명하고자 하였다. 처리구는 상토단일(Cont.), 하이드로볼(H), 활성탄(AC), 수크령식재(P), 하이드로볼 + 수크령식재(H + P), 활성탄 + 수크령식재(AC + P)로 구분하였다.

토양침출수의 산도는 처리구별 차이가 뚜렷하게 나타나지 않았으나 활성탄을 혼합한 AC처리구와 AC + P처리구에서 시간이 경과함에 따라 pH가 증가하는 경향을 보였다. 전기전도도는 대조구(Cont.)에 비해 하이드로볼과 활성탄, 그리고 수크령을 혼합 처리한 H + P처리구와 AC + P처리구에서 큰폭으

Table 3. Fresh weight(g · plant⁻¹), dry weight(g · plant⁻¹), dry meter(%), T/R ratio of *Pennisetum alopecuroides* as effected by soil amendments.

Treatment	Shoots			Roots			T/R
	FW	DW	DM	FW	DW	DM	
^y P	7.50 ± 0.71b ^z	1.97 ± 0.20c	26.28 ± 0.87b	5.00 ± 0.64c	0.68 ± 0.08b	13.69 ± 0.72b	34.25 ± 1.98b
H + P	15.00 ± 0.89a	5.49 ± 0.47a	36.47 ± 2.15a	22.17 ± 2.13a	4.70 ± 0.73a	20.25 ± 1.55a	85.50 ± 12.63a
AC + P	9.41 ± 0.54b	3.20 ± 0.17b	34.64 ± 2.12a	11.38 ± 0.84b	1.81 ± 0.17b	15.87 ± 0.70b	57.97 ± 6.18b
^x Significance	**	**	**	**	**	**	**

^zMean separation within columns by Duncan's multiple range test at 5% level. All value are mean ± SD of ten determinations. ^yP; *Pennisetum alopecuroides* planting, H + P; planting *Pennisetum alopecuroides* with hydroball treatment, AC + P; planting *Pennisetum alopecuroides* with active carbon treatment.

^xSignificance was determined by ANOVA. ^{ns} nonsignificant, *, ** means significant at p ≤ 0.05, 0.01 respectively.

로 감소되는 양상을 보였다. 토양침출수 내 치환성양이온(K^+ , Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+})은 토양 염류도를 평가하는 대표적 지표로 구분되는 Ca^{2+} 항목에서 대조구가 가장 높은 함량을 보였고 AC + P처리구에서 가장 낮은 함량을 보였으며, Na^+ 의 함량은 수크령을 식재하지 않은 대조구(Cont.)에서 가장 높은 함량을 보였고 H + P처리구에서 가장 낮았다. 수크령의 식물생육은 초장, 엽장, 엽폭, 엽수 모든 항목에서 대조구(Cont.)가 가장 저조한 생육상태를 보였고, H + P처리구에서 가장 우수하였으며, 통계적 유의성이 인정되었다. 생체중, 건물중, 건물률, T/R률에서도 P처리구에 비해 H + P처리구는 유의하게 억제되지 않고 염분의 영향을 크게 받지 않음을 알 수 있었다. 이러한 결과는 하이드로볼과 활성탄은 고농도 염화칼슘 집적 토양의 염분저감 효과가 있다고 사료되며 수크령은 토양-식물 연속체 기법으로 토양 염류저감을 위한 내염성 식재수종으로 활용가능성이 높을 것으로 기대된다.

REFERENCES

- Atia, A., A. Debez, M. Rabhi, Z. Barhoumi, C.C. Haouari, H. Gouia and A. Smaoui(2019) Salt tolerance and potential uses for saline agriculture of halophytes from the Poaceae. *Sabkha Ecosystems* 49: 223-237. (in English abstract)
- Cho, Y.H. and K.H. Lee(2014) Germination and early growth characteristics of *Pennisetum alopecuroides*, *Phragmites communis*, and *Miscanthus sinensis* according to the seeding methods. *J. Korean Env. Res. Tech.* 17(1): 163-172. (in Korean with English abstract)
- Choi, H.J. and S.M. Lee(2013) Effect of clay on the growth and changes of mineral contents of soybean sprout. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society* 14(8): 29-35. (in Korean with English abstract)
- Choi, S.C., J.J. Bae and Y.S. Choo(2004) Inorganic and organic solute pattern of coastal plants, Korea. *Journal of Ecology* 27(6): 355-361. (in Korean with English abstract)
- Do, J.N., T.S. Kim, C.B. Lee, Y.J. Kim and B.S. Chun(2012) An experimental study for the effective use scheme of snow removal materials on road. *Korean Geo-Environmental Society* 13(2): 5-17. (in Korean with English abstract)
- Dontsova, K.M. and L.D. Norton(2002) Clay dispersion, infiltration, and erosion as influenced by exchangeable Ca and Mg. *Soil Sci.* 167(3): 184-193. (in English abstract)
- Dunn, S.A. and R.V. Schenk(1980) Alternative highway deicing chemicals. *Bjorksten Research Corp.* pp. 79-108. (in English abstract)
- Heil, D. and G. Sposito(1993) Organic matter role in illitic soil colloids flocculation: I. Counter ions and pH. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57(5): 1241-1246. (in English abstract)
- Hwang, J.Y., M.I. Jang, J.S. Kim, W.M. Cho, B.S. Ahn and S.W. Kang(2000) Mineralogy and chemical composition of the residual soils (hwangto) from South Korea. *J. Miner. Soc. Korea* 13(3): 147-163. (in Korean with English abstract)
- Jang, H.S., S.G. Lee, J.H. Moon and C.H. Pak(2010) Growth of *syngonium podophyllum* in drainless containers fitted with drainage layers. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 28(2): 192-199. (in Korean with English abstract)
- Jeon, J.H., D.G. Kim, T.J. Kim, Y.H. Son and H.Y. Um(2017) Assessing changes in characteristics of reclaimed soil with soil conditioner treatment and field monitoring. *Korean Society of Agricultural Engineers Proceeding* 176.pp. (in Korean with English abstract)
- Ju, J.H., J.Y. Park, X. Hui, E.Y. Lee, K.H. Hyun, J.S. Jung, E.Y. Choi and Y.H. Yoon(2016) Growth and physiological response of three evergreen shrubs to de-icing salt($CaCl_2$) at different concentrations in winter-focusing on *Euonymus japonica*, *Rhododendron indicum*, and *Buxus koreana*. *J. KILA.* 44(2): 122-129. (in Korean with English abstract)
- Kang, K.C. and J.H. Ju(2013) Growth responses of *epipremnum aureum* as affected by different water and activated carbon ratios in ornamental hydro-culture. *J. Korean Soc. People Plants Environ.* 16(6): 377-382. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.T., S.H. Kim and H.J. Kim(2006) Characteristics of physical and adsorption of Korean traditional charcoal. *Korean J. Sanitation.* 21(4): 77-86. (in Korean with English abstract)
- Kim, K.C., M.J. Uhm, Y.H. Moon and Y.G. Choi(2004) Changes in the physico-chemical properties of growing media and the growth of oriental melon seedlings(*Cucumis melo* L.) by charcoal application. *Journal of Bio-Environment Control* 13(1): 61-66. (in Korean with English abstract)
- Koh, S.M., T. Takagi, M.Y. Kim, K. Naito, S.S. Hong and S. Sudo(2000) Geological and geochemical characteristics of the hydrothermal clay alteration in South Korea. *Resource Geology* 50(4): 229-242. (in English abstract)
- Kwack, Y., S.W. Park and C. Chun(2014) Growth and development of grafted cucumber transplants as affected by seedling ages of scions and rootstocks and light intensity during their cultivation in a closed production system. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 32(5): 600-606. (in Korean with English abstract)
- Kwon, H.J., C.H. Lee and S.Y. Kim(2019) Heavy metals uptake capability and growth of fifteen compositae plants for phytoremediation. *Korean J. Plant Res.* 32(1): 1-8. (in Korean with English abstract)
- Kwon, M.Y., S.H. Kim and J.H. Sung(2014) The responses of growth and physiological traits of acer triflorum on calcium chloride ($CaCl_2$) concentration. *Korean J. Environ. Ecol.* 28(5): 500-509. (in Korean with English abstract)

- Lee, E.Y., K.H. Hyun and J.S. Jung(2016) Analysis on appropriate plants of infiltration swale for road runoff. J. Korean Env. Res. Tech. 19(5) :19-27. (in Korean with English abstract)
- Lee, J.H.(2012) An overview of phytoremediation technology and its applications to environmental pollution control. Korean Society for Biotechnology and Bioengineering Journal 27(5): 281-288. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.H., K.J. Ji, Y. An and H.M. Ro(2003) Soil salinity and vegetation distribution at four tidal reclamation project areas. Korean Journal of Environmental Agriculture 22(2): 79-86. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.H., S.H. Lee, C.H. Lee, Y.K. Park and M. Okada(2003) Effects of calcium accumulation on the adsorption of pesticides by biological activated carbon. J. of KSEE. 25(3): 364-369. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.W., S.K. Bae, J.H. Kwon, Y.S. Na, C.D. An, Y.S. Yoon and S.K. Song(2005) Correlations between pore structure of activated carbon and adsorption characteristics of acetone vapor. J. of KSEE. 27(6): 620-625.(in Korean with English abstract)
- Lee, Y.H., J.Y. Kim, J.S. Lee, K. Pros, J.W. Park and G.H. Han(2017) A rapid determination of chloride in saturated paste extracts of salt-affected soils using EC change upon AgCl precipitation. Journal of Applied Biological Chemistry 60(3): 279-282. (in Korean with English abstract)
- Lee, Y.H., S.H. Kang, J.M. Choi and J.Y. Kim(2018) Physical and chemical properties of bottom ash and coir dust mix used as horticultural substrates. Korean J Horti Sci Technol. 36(2): 161-171.(in Korean with English abstract)
- Lee, Y.H., S.T. Lee, K.P. Hong, S.D. Lee, J.H. Kim, Y.S. Ok, M.K. Kim and H.R. Kim(2013) Long-term variations of chemical properties in controlled horticultural soils of Gyeongnam Province. Korean Journal of Soil Science and Fertilizer 46(5): 308-312. (in Korean with English abstract)
- Lim, N.H., Seo, H.J. and C.G. Kim(2005) Physicochemical adsorption characteristics of MTBE and cadmium on clay minerals. J. Korean Society of Environ. Eng. 27(3): 231-239.(in Korean with English abstract)
- Mane, A.V., B.A. Karadge and J.S. Samant(2011) Salt stress induced alteration in growth characteristics of a grass *Pennisetum alopecuroides*. Journal of Environmental Biology 32(6): 753-758. (in English abstract)
- Minasny, B., A.B. McBratney, D.M. Brough and D. Jacquier(2011) Models relating soil pH measurements in water and calcium chloride that incorporate electrolyte concentration. European Journal of Soil Science 62(5): 728-732. (in English abstract)
- Moon, H.S.(1996) Clay Mineralogy. Minumsa, Seoul. 503-509pp.
- Na, T.S., K.J. Choi, B.K. Yoon, M.S. Cho, H.G. Kim, H.J. Kim, D.M. Son and Y.K. Yoo(2013) Effect of mixture media of red clay and peatmoss on quality and drainage solution in hydroponics of *Solanum lycopersicum* 'Mascara'. Protected Horticulture and Plant Factory 22(1): 1-6. (in Korean with English abstract)
- Park, B.K., K.M. Kim, Y.I. Kim, S.Y. Yum, J.W. Lee, S.W. Hyung, J.H. Hwang, Y.M. Kim, M.H. Kong, C.B. Kim and Y. Roh(2009) Effect of cation and ionic strength on dispersion and coagulation of hwangto and clay minerals. J. Miner Soc Korea 22(3): 249-259. (in Korean with English abstract)
- Park, J.H., B.G. Kim and C.H. Won(2000) Treatment of livestock wastewater with coagulant-loess. J. Korean Society of Environ. Eng. 22(10): 1799-1808. (in Korean with English abstract)
- Park, K.S., Y.W. Huh, D.K. Park, H.C. Choi, J.I. Song and J.H. Kwag(2008) Effect of fertilizing activated charcoal made of chicken manure and decision of its applying amount under protected cultivation of sweet pumpkin(*Cucurbita maxima*). Proceedings of the 17th Symposium on the Korean Society For Bio-Environment Control, Jinju, Korea, May, pp. 461-465. (in Korean with English abstract)
- Park, S.O., K.W. Park, G.P. Lee, M.J. Kim and J.H. Lee(2004) Effects of soil conditioners on the growth of cucumber and tomato. Journal of Bio-Environment Control 13(4): 194-199. (in Korean with English abstract)
- Patykowski, J., J. Kołodziejek and M. Wala(2018) Biochemical and growth responses of silver maple (*Acer saccharinum* L.) to sodium chloride and calcium chloride. Peer J. 6: e5958. (in English abstract)
- Rengasamy, P., R.S.B. Greene and G.W. Ford(1986) Influence of magnesium on aggregate stability in sodic red-brown earths. Soil Research 24(2): 229-237. (in English abstract)
- Ryoo, K.S. and J.H. Choi(2012) A comparative study on adsorption characteristics of total nitrogen and phosphorus in water using various adsorbents. J. Korean Chem. Soc. 56(6): 700-705.(in Korean with English abstract)
- Shin, S.S., S.D. Park, H.S. Kim and K.S. Lee(2010) Effects of calcium chloride and eco-friendly deicer on the plant growth. J. Korean Soc. Environ. Eng. 32(5): 487-498. (in Korean with English abstract)
- Son, H.J., S.J. Yoo, J.S. Roh and P.J. Yoo(2009) Biological activated carbon(BAC) process in water treatment. Journal of Korean Society of Environmental Engineers 31(4): 308-323. (in Korean with English abstract)
- Song, J.H., H.Y. Jin and T.H. Ahn(2010) A study on physicochemical properties of artificial substrates and changes of plant growth in tropical plant resources research center of Korea national arboretum. J. Korean Env. Res. Tech. 13(2): 52-62. (in Korean with English abstract)
- Sung, J.H., S.M. Je, S.H. Kim and Y.K. Kim(2009) Effect of calcium chloride (CaCl₂) on the characteristics of *Photosynthetic Apparatus*, stomatal conductance, and fluorescence image of the leaves of cornus kousa. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology 11(4): 143-150. (in Korean with English abstract)

abstract)

Takahashi, E. and Y. Miyake(1974) Concern for silicon deficiency symptom in tomato. Agriculture and Horticulture 49: 15-20. (in English abstract)

Wang, S., P. Liu, D. Chen, L. Yin, H. Li and X. Deng(2015) Silicon enhanced salt tolerance by improving the root water uptake and

decreasing the ion toxicity in cucumber. Frontiers in Plant Science 6: 1-10. (in English abstract)

Wang, Y.T.(2007) Potassium nutrition affects phalaenopsis growth and flowering. Hort. Science 42(7): 1563-1567. (in English abstract)