

충주시 가로수의 황변정도에 따른 토양 내 제설제 성분의 흡수이행성 평가*

김재영¹⁾ · 김원태²⁾ · 윤용한³⁾ · 주진희³⁾

건국대학교 대학원 녹색기술융합학과¹⁾ · 연암대학교 환경조경과²⁾ · 건국대학교 녹색기술융합학과³⁾

Investigation on Translocation of De-icing Salts influenced by the Intensity of Foliar Damage of Roadside Trees in Chung-ju City*

Kim, Jae-Young¹⁾ · Kim, Won-Tae²⁾ · Yoon, Young-Han³⁾ and Ju, Jin-Hee³⁾

¹⁾ Department of Green Technology Convergence, College of Science Technology,
Graduate School of Konkuk University,

²⁾ Department of Environment and Landscape Architecture, Yonam College,

³⁾ Department of Green Technology Convergence, College of Science Technology, Konkuk University.

ABSTRACT

Use of de-icing salts results in accumulation of high concentrations of ions on roadside soils and tree. The purpose of this study is to determine translocation of seasonal impact of exchangeable cations originating from de-icing salt on roadside surface soil-plant influenced by the intensity of foliar damage (NY = 0-25%, SY = 26-50%, CY = 51-75%) of trees. This paper investigated the concentration of four exchangeable cations (K^+ , Ca^{2+} , Na^+ , and Mg^{2+}) on the roadside surface soil. The tree (*Ginkgo biloba*) samples were collected from the Konkuk and Judeok intersections in Chung-ju city. The sequential extraction procedure was applied to 120 soil samples of the soil surface and 30 tree samples. Four cation exchange ions were determined by ICP-OES. The content of four exchangeable cations present on roadside soil was found to be the lowest in NY but highest in CY from tree pits in the order of NY < SY < CY. Especially, the results were apparent during spring time compared to other seasons. Soil collected from tree pits had the highest concentration

* 본 연구는 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2015R1C1A2A01052633)

First author : Kim, Jae-Young, Department of Green Technology Convergence, College of Science Technology, Graduate School of Konkuk University-Glocal Campus,
Tel : +82-43-840-3536, E-mail : kiasswe@kku.ac.kr

Corresponding author : Ju, Jin-Hee, Department of Green Technology Convergence, College of Science Technology, Konkuk University-Glocal Campus,
Tel : +82-43-840-3541, E-mail : jjhkkc@kku.ac.kr

Received : 8 February, 2018. **Revised** : 27 August, 2018. **Accepted** : 21 August, 2018.

of Ca^{2+} possibly due to a higher volume of traffic on those streets resulting in splashing of more calcium chloride (CaCl_2). The analysis of three exchangeable cations (K^+ , Mg^{2+} , and Na^+) in the tree leaves revealed higher levels than roadside surface soil when foliar damage ratio increased in the order of $\text{NY} < \text{SY} < \text{CY}$ in summer. In addition, a strong positive linear relationship was observed between the concentration of exchangeable cations in soil and trees. It is hypothesized that the results of this study can be a valuable baseline for managing de-icing salt on roadside soil and trees, in order to mitigate the salt stress that can damage the roadside soil and trees.

Key Words : *Exchangeable Cations, Foliar Damage Intensity, Ginkgo biloba, Roadside Soil, Phytodesalination*

I. 서 론

전 세계적으로 주로 사용되고 있는 제설제는 염화물계인 염화나트륨(NaCl), 염화칼슘(CaCl_2), 염화마그네슘(MgCl_2), 염화칼륨(KCl) 등으로 (Kwon and Kim, 2008), 물에 녹은 염화물은 가로수나 도로변의 식물생육 및 육상군집뿐 아니라 강이나 호수 등에 흘러 들어가면 수중생태계의 파괴와 음용수의 오염에 영향을 미칠 수 있다 (Kim and Lee, 2014). 특히 제설제의 과다사용은 토양 내 특정 양이온의 증가를 유도할 수 있어 한계량 이상을 식물이 흡수할 경우 식물체가 피해를 받을 수 있다(Stephanie and David, 2005). 또한 토양 내 염화물의 함량이 높아질 경우 식물의 세포조직에 이온 축적이 더 많이 일어나는데, 초본 식물은 고농도의 염에 내성을 보이지만 가로수와 같은 목본식물은 내성이 약한 것으로 알려져 있다 (Shin et al., 2010). 이는 단기적으로 수분흡수를 방해하고 장기적으로는 특정 이온의 독성농도 임계치 이상에 도달해 세포내 영양분 균형이 깨져 식물의 늦은 개엽, 신초신장 불량, 엽 생장 저해 및 변색, 조기낙엽, 고사 등의 피해를 유발할 가능성이 높다고 본다(Zhang et al., 2012; Kwon et al., 2014).

국외에서는 이미 도시 내 토양의 제설제 오염은 일반적인 환경문제로 다뤄지고 있으며 (Cunningham et al., 2008), 토양과 식물의 관리기

법에 따라 영향을 받는 것으로 알려지면서 (Cekstere and Osvalde, 2013), 가로변 녹지는 지속가능한 환경복원을 위한 중요한 요소 중 하나로 강조되고 있다(Willis and Petrokofsky, 2017). 국내에서 가로변 토양과 식생에 미치는 제설제에 관한 연구는 내염성 식물 탐색(Sung et al., 2010; Lee et al., 2013; Kwon et al., 2014; Ju et al., 2016a; Ju et al., 2016b; Je and Kim, 2016; Je and Kim, 2017), 식생형 LID 시설물 설치 및 개선(Choi et al., 2017), 엽면코팅제 처리효과(Kwon and Kim, 2008), 계절별 영향(Kim et al., 2017) 등으로 대부분 내염성 수종탐색에 집중되어 있어, 실제 가로변 토양 내 상대적인 제설제 오염상태를 밝히기 위한 자료로서는 한계가 있다.

흡수이행성이란 오염된 토양과 물로부터 직접적인 흡수 이행을 통한 식물체로의 오염 잔류 농도를 의미하며(Jung et al., 2006; Choi et al., 2018), 오염물질의 독성 및 등급을 간접적으로 설명하는데 유용한 자료가 될 수 있으나 제설제 오염과 관련된 연구는 미흡한 실정이다. 이에 본 연구에서는 대표적인 제설제 피해지역이라고 할 수 있는 가로변의 가로수의 황변정도를 기준으로 계절별로 토양산도, 토양전기전도도, 염화물계 치환성양이온 농도를 분석하고자 한다. 특히, 은행나무의 가지적 황변정도가 가장 확연한 여름철을 기준으로 하부 토양과 식물체 내 염화물계 치환성양이온의 상관성을 살펴봄

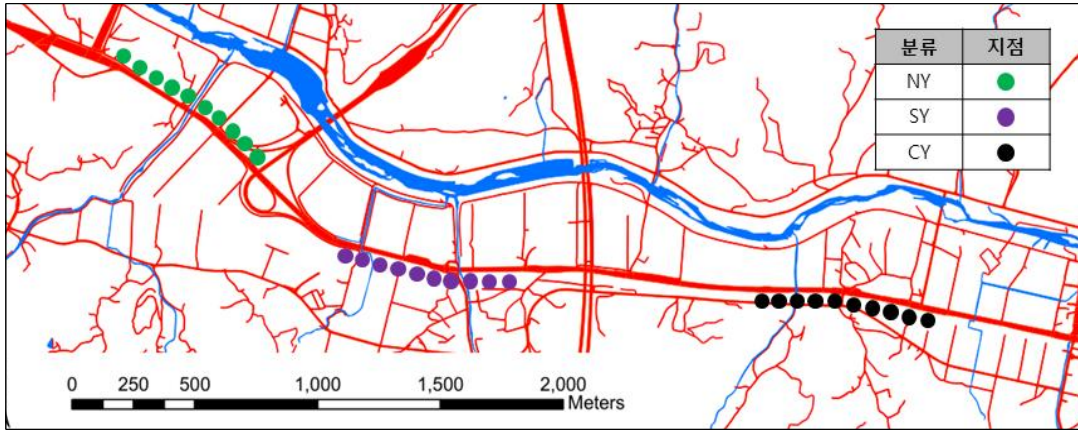


Figure 1. Classification of foliar damage ratio of *Ginkgo biloba* and location of samples investigated roadside in the Chung-ju city. NY: Nothing yellowing, SY: Slight yellowing, CY: Considerable yellowing

으로써 흡수이행성을 평가하고자 한다. 이러한 결과를 통해 가로수의 가시적인 황변과 토양 내 제설제의 상대적인 오염상태와의 상호 관련성을 검토함으로써 추후 가로수 제설제 피해지역의 관리방안에 있어 가로수의 황변정도로 가시적인 염해의 등급을 간접적으로 제시할 수 있는 근거자료를 마련하고자 한다.

II. 연구범위 및 방법

1. 연구범위

충주시는 2010년 기준으로 도시화된 12개동과 농촌지역인 1개읍, 12개면으로 구성되어 있는 도농 복합도시이다. 도시지역 인구는 지속적으로 증가하여 왔으며, 시가지공간이 확대되고, 주거활동을 포함한 다양한 경제, 사회활동이 활발하게 진행되어 왔다(Ryu, 2012). 이에 교통량과 제설제의 살포량은 연관성이 높다고 볼 때, 향후 충주시는 동서고속도로 개통, 충주기업도시개발, 경제자유구역지정 신개발에 대한 수요가 급격하게 증가함에 따라 제설제 피해지역이 또한 확대될 것으로 예상된다. 이에 본 연구의 대상지는 국도 3호선과 국도 36호선이 중첩되어 1일 차량 통행량이 2016년 기준으로 약

34,000대로 충주시에서 가장 교통량이 많은 충주 건대사거리에서 주덕오거리(총 5km) 가로변을 대상지로 선정하였다. 실제로 충주시 전체 제설제 살포량을 조사한 결과 매년 2천 톤 이상의 염화물계 제설제가 사용되어졌으며, 2015년 말부터 2016년 초까지는 염화나트륨 1,528ton, 염화칼슘 492ton, 친환경제설제 51ton으로 총 2,008ton이 살포된 것으로 확인되었다.

조사기간은 2016년 2월부터 2016년 11월까지로 조사시기는 제설제가 겨울철에 집중살포되는 특성이 있어 계절별로 수행하되, 겨울철은 토양채취가 가능한 2016년 2월을 기점으로, 봄철은 5월, 여름철은 8월, 가을철은 11월에 각각 현장조사와 실내분석을 병행하였다. 가로변 제설제 피해정도는 가로수의 여름철 전엽의 엽손상도(FDI; Foliar damage intensity)는 황변정도를 기준으로, 0~25%는 NY(Nothing yellowing), 26~50%는 SY(Slight yellowing), 51~75%는 CY(Considerable yellowing) 등 3구간으로 구분하였다(Jacobi et al., 2012). 이러한 구간 내 수고 약 8m, 흉고직경 약 20cm, 수령 20년 이상의 비교적 크기가 균일한 은행나무를 각각 10주씩 선정하여 식물체 및 하부 토양을 현장조사 하였다(Figure 1).

2. 연구방법

토양 및 식물체의 시료조제, 화학성분 및 염화물계 치환성양이온 분석은 토양 및 식물체 화학분석법(NIAST, 2000)에 준하였다.

1) 토양 및 식물체 채취 및 건조

토양 내 양·수분의 흡수 역할을 하는 세균이 토심 30cm 이내에 주로 분포한다는 점을 감안하여 토심 10~20cm 깊이의 은행나무 주변 사방 4개 지점에서 각각 계절별로 120개, 총 480개의 시료를 채취하였다. 토양시료는 1주일 동안 풍건한 후 0.2mm 표준망체(Standard Test Sieve, Daihan, Korea)로 체 가름하여 분석시료로 사용하였다. 또, 식물체 채취는 잎이 가장 무성한 여름철에 수관의 상부로부터 1/4~1/2지점에서 고지가위로 채취하였다. 수확된 엽은 3차 증류수로 3회 세척하였으며, 건조는 내부의 수분이 모두 증발하기까지 2주 이상 자연 건조시킨 후 분쇄기(BL-311E, Tefal, France)로 곱게 갈았다.

2) 염화물계 치환성양이온

염화물계 치환성양이온 분석을 위한 추출 시약은 아세트산(CH_3COOH)과 3차 증류수를 57ml대 8ml의 비율로 1L 플라스크에 넣은 후 암모니아(NH_4OH) 69ml를 혼합하여 3N- CH_3COOH 와 3N- NH_4OH 용액으로 pH7로 조절하여 제조하였다. 기건한 토양은 5g, 분쇄한 식물체는 0.5g을 각각 정밀 측정하여 100ml 삼각플라스크에 담고 추출 시약(1N- NH_4OH -pH7) 50ml를 넣었으며, 이를 항온수평진탕기(HB-203S, Hanbaek, Korea) 100회/분, 진폭 10cm로 30분간 진탕한 후, 5B여과지로 여과하였다. 한편, 제설제의 주요성분으로 알려진(Li et al., 2015), 4가지 염화물계 치환성양이온(Ca^{2+} , K^+ , Na^+ , Mg^{2+}) 농도는 ICP(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer:perkin-elmer OES-5300DV)로 정량하였다.

3) 통계분석

계절별 토양 및 식물체의 시료에 대한 분석결과를 평균값과 표준오차(SE, standard error)로 표시하였다. 특히 토양 내 염화물계 치환성양이온이 식물체 내 흡수이행되어 황변정도가 뚜렷이 구분되는 여름철 정량결과를 중심으로 PASW Statistics 18 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) 프로그램을 사용하여 Pearson 상관성 분석을 통해 흡수이행성을 평가하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 계절별 가로변 제설제 피해지별 토양 내 염화물계 치환성양이온

1) 겨울철(2016년 2월)

겨울철 가로수 하부 토양 내 염화물계 치환성양이온의 평균농도는 대조구인 NY(Nothing yellowing)구간에서 칼륨양이온(K^+) 0.10cmol/kg, 칼슘양이온(Ca^{2+}) 4.97cmol/kg, 나트륨양이온(Na^+) 0.22cmol/kg, 마그네슘양이온(Mg^{2+}) 0.30cmol/kg, SY구간에서 칼륨양이온 0.19cmol/kg, 칼슘양이온 4.15cmol/kg, 나트륨양이온 0.45cmol/kg, 마그네슘양이온 0.36cmol/kg, CY구간에서 칼륨양이온

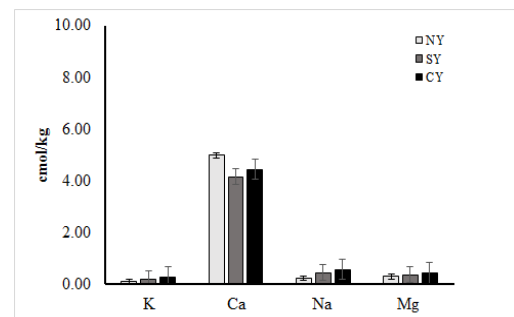


Figure 2. Four exchangeable cations originating from de-icing salt concentrations in roadside surface soil influenced by foliar damage intensity of roadside trees in winter. Each value in the figure is the mean and the vertical bars give the standard error (SE). NY: Nothing yellowing, SY: Slight yellowing, CY: Considerable yellowing (Feb., 2016)

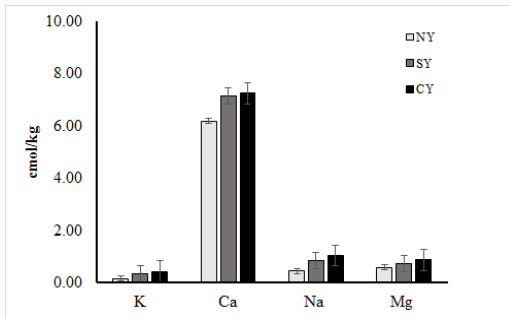


Figure 3. Four exchangeable cations originating from de-icing salt concentrations in roadside surface soil influenced by foliar damage intensity of roadside trees in winter. Each value in the figure is the mean and the vertical bars give the standard error (SE). NY: NY: Nothing yellowing, SY: Slight yellowing, CY: Considerable yellowing (May, 2016)

0.28cmol/kg, 칼슘양이온 4.44cmol/kg, 나트륨양이온 0.57cmol/kg, 마그네슘양이온 0.43cmol/kg로 조사되었다(Figure 2). 따라서 칼슘양이온이 가장 높게, 칼륨양이온이 가장 낮았으나 은행나무의 황변 정도간의 차이는 뚜렷하지 않았다. 이와 같은 결과는 겨울철 표토의 경우 동결융해를 반복하기 때문에 12월부터 표토에 축적된 염화물계 치환성양이온의 지중 침투속도가 느려지기 때문인 것으로 해석되었다(Lee et al., 2006).

2) 봄철(2016년 5월)

봄철 가로수 하부 토양 내 염화물계 치환성양이온의 평균농도는 NY구간에서 칼륨양이온(K^+) 0.16cmol/kg, 칼슘양이온(Ca^{2+}) 6.18cmol/kg, 나트륨양이온(Na^+) 0.44cmol/kg, 마그네슘양이온(Mg^{2+}) 0.59cmol/kg, SY구간에서 칼륨양이온 0.34cmol/kg, 칼슘양이온 7.12cmol/kg, 나트륨양이온 0.83cmol/kg, 마그네슘양이온 0.73cmol/kg, CY구간에서 칼륨양이온 0.43cmol/kg, 칼슘양이온 7.24cmol/kg, 나트륨양이온 1.04cmol/kg, 마그네슘양이온 0.87cmol/kg으로 조사되었다(Figure 3). 전반적으로 봄철 가로수 하부 토양 내 염화물계 치환성양이온의 농도는 겨울철에 비해 높았으

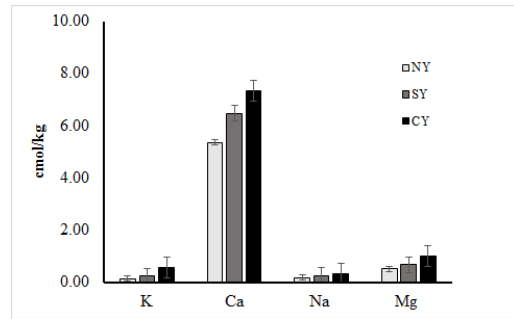


Figure 4. Four exchangeable cations originating from de-icing salt concentrations in roadside surface soil influenced by foliar damage intensity of roadside trees in summer. Each value in the figure is the mean and the vertical bars give the standard error (SE). NY: Nothing yellowing, SY: Slight yellowing, CY: Considerable yellowing (Aug., 2016).

며, 특히 칼슘양이온의 농도가 NY < SY < CY순으로 은행나무의 황변정도에 따라 확연한 증가세를 보였다.

3) 여름철(2016년 8월)

여름철 가로수 하부 토양 내 염화물계 치환성양이온의 평균농도는 NY구간에서 칼륨양이온(K^+) 0.12cmol/kg, 칼슘양이온(Ca^{2+}) 5.35cmol/kg, 나트륨양이온(Na^+) 0.16cmol/kg, 마그네슘양이온(Mg^{2+}) 0.51cmol/kg, SY구간에서 칼륨양이온 0.24cmol/kg, 칼슘양이온 6.46cmol/kg, 나트륨양이온 0.24cmol/kg, 마그네슘양이온 0.66cmol/kg, CY구간에서 칼륨양이온 0.55cmol/kg, 칼슘양이온 7.32cmol/kg, 나트륨양이온 0.34cmol/kg, 마그네슘양이온 1.01cmol/kg으로 분석되었다(Figure 4). 여름철 가로수 하부 토양 내 염화물계 치환성양이온의 농도는 칼슘양이온을 제외하고 봄철보다 전반적으로 낮았으며 이는 식물체 흡수, 강우 유실 등에 기인한 결과로 보인다. 조경설계기준(2007년)에 의하면 치환성칼륨은 상급, 중급, 하급이 각각 3.0 이상, 3.0~0.6, 0.6 미만, 치환성칼슘은 5.0 이상, 5.0~2.5, 2.5 미만, 치환성 마그네슘은 3.0 이상, 3.0~0.6, 0.6cmol/kg 미만으로 기준을 삼고 있

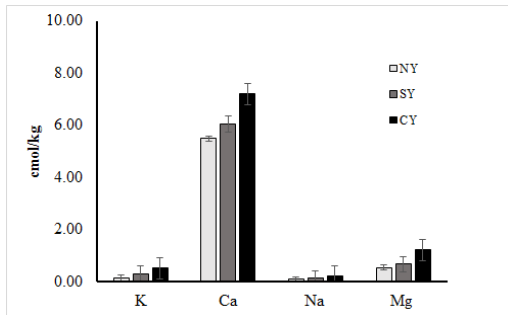


Figure 5. Four exchangeable cations originating from de-icing salt concentrations in roadside surface soil influenced by foliar damage intensity of roadside trees in autumn. Each value in the figure is the mean and the vertical bars give the standard error (SE). NY: Nothing yellowing, SY: Slight yellowing, CY: Considerable yellowing (Nov., 2016)

는데, 황변정도가 높은 NY구간과 비교해볼 때, 칼슘을 제외하고 칼륨과 마그네슘은 비교적 낮은 수치를 보였다.

4) 가을철(2016년 11월)

가을철 가로수 하부 토양 내 염화물계 치환성양이온의 평균농도는 NY구간에서 칼륨양이온(K^+) 0.14cmol/kg, 칼슘양이온(Ca^{2+}) 5.49cmol/kg, 나트륨양이온(Na^+) 0.09cmol/kg, 마그네슘양이온(Mg^{2+}) 0.54cmol/kg, SY구간에서 칼륨양이온 0.29cmol/kg, 칼슘양이온 6.04cmol/kg, 나트륨양이온 0.12cmol/kg, 마그네슘양이온 0.67cmol/kg, CY구간에서 칼륨양이온 0.52cmol/kg, 칼슘양이온 7.20cmol/kg, 나트륨양이온 0.21cmol/kg, 마그네슘양이온 1.22cmol/kg으로 조사되었다(Figure 5). 가을철 염화물계 치환성양이온의 농도 또한 다른 계절과 마찬가지로 NY < SY < CY순으로 가로수의 엽 손상도가 높을수록 증가하는 경향을 나타냈다.

계절별 가로수 하부 토양 내 4가지 염화물계 치환성양이온의 총량을 살펴본 결과, 겨울철, 봄철, 여름철, 가을철이 평균 1.27, 2.16, 1.91, 1.88cmol/kg으로 봄철 > 여름철 > 가을철 > 겨울철 순으로 조사되었다.

이것은 겨울철 표토의 동결융해 반복으로 염화물계 치환성양이온의 이동성이 감소된 반면, 봄철 기온 상승에 따라 전반적으로 증가한 것으로 해석된다. 또한 여름철에는 식물체의 흡수이행 뿐 아니라 여름 장마로 인한 자연적 용탈현상으로 인해 토양 내 집적되었던 치환성양이온이 감소함에 따라 계절별 차이를 보인 것으로 해석된다. 더불어 가로수 엽손상도에 따른 하부 토양 내 염화물계 치환성양이온을 분석한 결과, 가로수의 황변정도가 높을수록 염화물계 치환성양이온의 농도가 증가하였으며, 사계절 모두 칼슘양이온(Ca^{2+})이 가장 높아 제설제 중 염화칼슘($CaCl_2$)의 과다 살포로 인해 영향을 받았을 것으로 추정된다. 한편, 식물의 오염물질에 대한 선택적 흡수와 부위별 이행특성에 크게 영향을 받을 수 있으므로(Jung et al., 2006), 토양 내 오염의 정도를 평가함에 있어 가로수별 허용한계치(tolerance level)을 통해 오염지수를 환산할 수 있는 방안이 필요하다고 본다.

2. 토양 내 염화물계 치환성양이온의 식물체 간 흡수이행성 평가

여름철 가로수 식물체 내 염화물계 치환성양이온을 분석한 결과, NY구간에서 칼륨양이온(K^+)은 2.03cmol/kg, SY구간에서 4.31cmol/kg, CY구간에서 4.38cmol/kg로 각각 조사되었다. 가지적 황변증상이 낮은 NY구간에서는 칼륨양이온이 낮게 나타났으며, 황변증상이 높은 CY구간에서 가장 높았으나 황변증상이 중간인 SY구간과의 차이는 뚜렷하지 않았다. 칼슘양이온(Ca^{2+})은 NY구간에서 3.09cmol/kg, SY구간에서 3.60cmol/kg, CY구간에서 5.23cmol/kg로 각각 조사되었다. 칼슘양이온 또한 NY구간에서는 가장 낮게, CY구간에서는 가장 높게 측정되었다. 나트륨양이온(Na^+)은 NY구간에서 1.04cmol/kg, SY구간에서 1.42cmol/kg, CY구간에서 1.82cmol/kg로 각각 조사되었다. 마그네슘양이온(Mg^{2+})은

NY구간에서 2.03cmol/kg, SY구간에서 2.34cmol/kg, CY구간에서 2.90cmol/kg로 각각 분석되었다. 마그네슘양이온 또한 상기 3가지 양이온과 유사하게 엽 손상도가 높을수록 증가하는 경향을 보였다 (Figure 6).

칼륨은 식물체 구성성분 중 가장 풍부한 양이온이며 건조중량의 10%를 차지하며 농도는 약 120mM정도로 일정하게 조절된다. 일반적으로 나트륨은 식물에 필요하지는 않으며 식물의 뿌리에서 흡수가 제한되어 지상부로 수송하지 못한다. 하지만 일부 염류저항성을 지닌 식물들은 칼륨을 대신하여 삼투압을 일정하게 유지하는 비특이적 기능을 수행하게 된다(Subbarao et al., 1999). 칼슘은 식물세포의 원형질막의 기능유지를 위해 필수적인 요소로 적합한 농도는 0.2~0.5mM 정도이다. 식물을 염류 스트레스(salinity stress)를 유발하는 고농도의 나트륨에 노출시킬 경우, 식물에 현저한 보호효과가 있어 농도가 증가될 수 있다(Patil et al., 2005). 가로수의 전엽이 엽손상도가 높을수록 식물체 내 염화물계 치환성양이온의 농도가 증가하는 경향을 보여 과도한 제설제의 살포가 식물체에 직·간접적 피해증상을 초래할 수 있음을 보여준다고 하겠다.

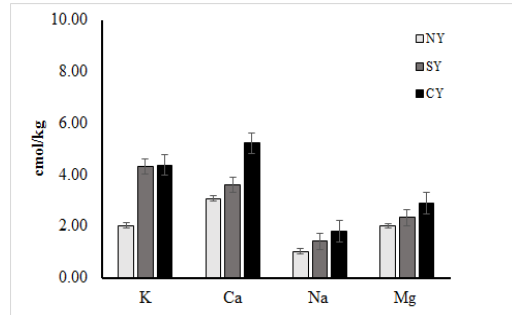


Figure 6. Four exchangeable cations originating from deicing salt (K^+ , Ca^{2+} , Na^+ , and Mg^{2+}) concentrations in roadside trees (*Ginkgo biloba*) influenced by foliar damage intensity of roadside trees in summer. Each value in the figure is the mean and the vertical bars give the standard error (SE). NY: Nothing yellowing, SY: Slight yellowing, CY: Considerable yellowing (Aug., 2016)

또한 칼슘양이온을 제외한 나머지 염화물계 치환성양이온 농도가 토양보다 높게 나타났는데, 이는 토양-식물체 간 염화물계 치환성양이온의 이행으로 봄철부터 토양 내 염화물계 치환성양이온 농도가 가로수 내 지속적으로 축적될 뿐만 아니라 양이온 간의 경합에 따른 길항작용으로 인해 발생된 것으로 해석된다(Kwon et al., 2014).

Table 1. Correlation analysis four exchangeable cations originating from deicing salt concentrations between roadside surface soil and tree (*Ginkgo biloba*) influenced by foliar damage intensity of roadside trees in summer (Aug., 2016)

	Foliar damage intensity	Soil K^+	Soil Ca^{2+}	Soil Na^+	Soil Mg^{2+}	Tree K^+	Tree Ca^{2+}	Tree Na^+
Soil K^+	.902**							
Soil Ca^{2+}	.394	.421						
Soil Na^+	.467*	.413	.296					
Soil Mg^{2+}	.824**	.831**	.425	.466*				
Tree K^+	.731**	.617**	.353	.405	.512*			
Tree Ca^{2+}	.774**	.852**	.271	.409	.609**	.671**		
Tree Na^+	.617**	.766**	.312	.361	.470*	.453*	.602**	
Tree Mg^{2+}	.800**	.730**	.334	.261	.627**	.535*	.634**	286

* : The correlation of coefficient is significant at the 0.05 level.

** : The correlation of coefficient is significant at the 0.01 level.

여름철 가로수 엽 손상도에 따른 토양 내 염화물계 치환성양이온과 식물체 내 흡수이행성을 평가한 결과, 토양과 식물체 모두 정(正)의 상관성을 보여 흡수이행가능성이 높음을 시사하였다. 특히 엽 손상도의 경우 토양 내에서는 칼륨양이온($r=0.902^{**}$), 마그네슘양이온($r=0.824^{**}$), 나트륨양이온($r=0.467^*$), 칼슘양이온($r=0.394$) 순인 반면, 식물체 내에서는 마그네슘양이온($r=0.800^{**}$), 칼슘양이온($r=0.774^{**}$), 칼륨양이온($r=0.731^{**}$), 나트륨양이온($r=0.617^{**}$) 순으로 연관성이 높았다 (Table 1). 초화류 중 엽 제거를 위한 깃쟁이와 애기부들을 수경재배한 결과 식물체 내 엽 농도는 처리 후 지속적으로 증가하다가 1주 후 최고조에 이른다고 보나(Bertrand et al., 2015), 실제 가로변 토양으로부터 제설제의 흡수이행도는 엽류의 이동성 및 유효도와 식물별 생리특성에 영향을 받을 수 있어 가로수별 엽류 허용한계치 (tolerance level)가 상이할 것으로 본다. 특히, 염화물계 제설제들에 함유된 염소이온은 염을 구성하는 양이온에 따라 $Mg > Ca > K > Na$ 순으로 확산 속도에 차이가 있을 뿐 아니라(Kim and Lee, 2014), 마그네슘이 엽록소 중심에 위치해, 광합성의 여러 반응에 관여한다고 볼 때(Frausto and Williams, 1991), 엽손상도와 관련성이 높았을 것으로 추정된다. 더불어 제설제 살포로 인해 토양 삼투압이 높아져 토양수분 흡수가 방해되어 잎의 황변 등의 피해가 일반적이라고 볼 때, 토양수분과의 연관성 또한 살펴볼 필요가 있다.

IV. 결 론

본 연구는 대표적인 제설제 피해지역이라고 할 수 있는 가로변 가로수의 엽 손상도를 기준으로 하부 토양 및 식물체 내 염화물계 치환성양이온의 농도를 조사함으로써 토양-식물체 간 흡수이행성을 살펴보고자 수행하였다. 이를 통해 제설제 피해지역의 관리방안에 있어 가로수의 황변정도로 가시적인 염해의 등급을 간접적으로

제시할 수 있는 근거자료를 마련하고자 한다.

대상지는 충주시에서 가장 교통량이 많은 충주 건대사거리에서 주덕사거리(총 5km)로 선정하였으며, 가로수인 은행나무의 여름철 전엽의 엽손상도를 기준으로 0~25%는 NY(Nothing yellowing), 26~50%는 SY(Slight yellowing), 51~75%는 CY(Considerable yellowing) 등 세 가지로 구분하여 각각 10주씩, 총 30주의 하부 토양 및 식물체 내 염화물계 치환성양이온의 농도를 계절별로 조사하였다. 계절별 가로수 하부 토양 내 4가지 염화물계 치환성양이온의 총 농도를 합산한 결과, 봄철 > 여름철 > 가을철 > 겨울철 순으로 봄철에 가장 높았다. 토양 내 염화물계 치환성양이온을 분석한 결과, 은행나무의 엽손상도가 높은 구역일수록 염화물계 치환성양이온의 농도가 증가하였으며 사계절 모두 칼슘양이온(Ca^{2+})이 가장 높아 제설제 중 염화칼슘($CaCl_2$)의 과다살포와 연관성이 높을 것으로 추정되었다. 여름철 토양 내 염화물계 치환성양이온의 식물체 간 흡수이행성을 평가한 결과, 토양과 식물체 모두 정(正)의 상관성을 보여 토양 내 엽류이온의 상대적 오염상태를 식물체의 엽손상도와 연관성이 높음을 시사하고 있다. 결론적으로 토양으로부터 뿌리, 줄기, 잎으로의 염화물계 치환성양이온의 흡수이행성은 계절별 제설제의 오염도에 따라 좌우될 수 있으나 다른 한편으로는 식물의 선택적 흡수와 부위별 이행특성에 크게 영향을 받을 것으로 본다. 또한 더불어 염소이온(Cl^-)의 과다현상으로 인한 엽류집적 또는 엽류스트레스도 배제할 수 없다. 추후 식물자체의 특성 및 토양의 이화학적 특성에 따른 염화물계 치환성양이온과 더불어 염소이온의 유효도를 좀 더 면밀하게 살펴보아야 할 것으로 본다.

References

- Bertrand, M. · T. B. Gaëlle · R Galvez and M. Louis. 2015. Nutrient and removal kinetics

- impacts on salt phytoremediation by *Atriplex patula* and *Typha angustifolia*. Journal of Environmental Engineering 141: 1.
- Cekstere, G. and A. Osvalde. 2013. A study of chemical characteristics of soil in relation to street trees status in Riga (Latvia). Urban For. Urban Green. 12(1) : 68-78.
- Choi, H. S. · J. S. Hong · T.G. Noh and L. H. Kim. 2017. Evaluation of an LID bioretention facilities caused by (CaCl₂). Journal of Korean Society of Water and Wastewater 2016(0) : 59-60. (in Korean with English summary)
- Choi, G. H · D. Y. Lee · J. Y. Bae · J. H. Rho · B. C. Moon and J. H. Kim. 2018. Bioconcentration factor of perfluorochemicals for each aerial part of rice. J. Appl. Biol. Chem. 61(2) : 191-194. (in Korean with English summary)
- Cunningham, M. A. · E. Snyder · D. Yonkin · M. Ross and T. Elsen. 2008. Accumulation of deicing salts in soils in an urban environment. Urban Ecosyst. 11 : 17-31.
- Frausto da Silva, J. J. R. and R. J. P. Williams. 1991. The biological chemistry of the elements: The inorganic chemistry of life. Oxford : Clarendon Press.
- Jacobi, W. R. · J. G. Hardin · B. A. Goodrich and C. M. Cleaver. 2012. Retail firewood can transport live tree pests. J. Econ. Entomol. 105(5) : 1645-1658.
- Je, S. M. and S. H. Kim. 2017. Growth and physiological responses of *Pinus strobus* to CaCl₂. J. KILA. 45(3) : 1-8. (in Korean with English summary)
- Je, S. M. and S. H. Kim. 2016. Effect of CaCl₂ on gas exchange and stomatal responses in the leaves of *Prunus serrulata*. J. Korean For. Soc. 105(3) : 303-308. (in Korean with English summary)
- Ju, J. H. · J. Y. Park · H. Xu · E. Y. Lee · K. H. Hyun · J. S. Jung · E. Y. Choi and Y. H. Yoon. 2016a. Growth and physiological response of three evergreen shrubs to de-icing salt (CaCl₂) at different concentrations in winter. J. KILA. 44(2) : 122-129. (in Korean with English summary)
- Ju, J. H. · X. Hui · J. Y. Park · E. Y. Choi and Y. H. Yoon. 2016b. Evaluation of salt tolerance of *Liriope plantyphylla* and *Pachysandra terminalis* to deicing salt (CaCl₂) concentration in winter. Korean J. Environ. Ecol. 30(4) : 651-657. (in Korean with English summary)
- Jung, G. B · W. I. Kim · J. S. Lee · J. D. Shin · J. H. Kim and J. T. Lee. 2006. Availability of heavy metals in soil and their translocation to water dropwort(*Oenanthe javanica* DC.) cultivated near industrial complex. Korean Journal of Environmental Agriculture 25(4) : 323-330. (in Korean with English summary)
- Kim, J. Y · J. Y. Park · Y. H. Yoon and J. H. Ju. 2017. The seasonal impacts of de-icing salts on soil and vegetation in Chung-ju city. Journal of Environmental Science International 26(8) : 993-998. (in Korean with English summary)
- Kim, L. S. and D. W. Lee. 2014. Effect of chloride-deicers on growth of wheat, barley and spinach. Korean J. Environ. Agric. 33(4) : 350-357. (in Korean with English summary)
- Kwon, H. B. and T. J. Kim. 2008. Evaluation of the coating liquid sprayed on landscape plants to prevent de-icing stresses. J. KILA. 35(6) : 29-36. (in Korean with English summary)
- Kwon, M. Y · S. H. Kim and J. H. Sung. 2014. The responses of growth of physiological

- traits of *Acer triflorum* on calcium chloride (CaCl_2) concentration. Korean J. Environ. Ecol. 28(5) : 500-509. (in Korean with English summary)
- Lee, J. G. · B. D. Lee and H. J. Kang. 2006. Characteristics of deicing agent concentrations in highway roadside soils. Korean Society Of Civil Engineers 10 : 1742-1745. (in Korean with English summary)
- Lee, S. Y. · W. T. Kim · J. H. Ju and Y. H. Yoon. 2013. Effect of calcium chloride concentration on roadside ground cover plant growth. J. KILA. 41(4) : 17-23. (in Korean with English summary)
- Li, F. · Y. Zhang · Z. Fan and K. Oh. 2015. Accumulation of de-icing salts and its short-term effect on metal mobility in urban roadside soils. Bull. Environ. Contm. Toxicol. 94 : 525-531.
- NIAST(National Institute of Agricultural Science and Technology). 2000. Method of soil and plant analysis. NIAST, Rural Development Administration, Korea. (in Korean)
- Patil, B. N. · S. G. Patil · M. Hebbara · M. V. Manjunatha · R. K. Gupta and P. S. Minhas. 2005. Bioameliorative role of tree species in salt-affected Vertisols of India. Journal of Tropical Forest Science 17(3) : 346-354.
- Ryu, S. K. 2012. A study on the decline and regeneration of urban center in Cjungju. Journal of the Korean Regional Development Association 24(4) : 77-94. (in Korean with English summary)
- 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. Korean Society of Environmental Engineers 32(5) : 487-496. (in Korean with English summary)
- Stephanie L. N. and D. B. David. 2005. Alleviation of salt-induced stress on seed emergence using soil additives in a greenhouse. Plant and Soil 268 : 303-307.
- Subbarao, G. V. · R. M. Wheeler · G. W. Stutte and L. H. Levine. 1999. How far can sodium substitute for pottassium in red beet?. Journal of Plant Nutrition 22 : 1745-1761.
- Sung, J. H. · S. M. Je · S. H. Kim and Y. K. Kim. 2010. Effect of calcium chloride(CaCl_2) on chlorophyll fluorescence image and photosynthetic apparatus in the leaves of *Prunus sargentii*. Jour. Korean For. Soc. 99(6) : 922-928. (in Korean with English summary)
- Willis, K.J. · G. Petrokofsky. 2017. The natural capital of city trees. Science 356(6336) : 374-376.
- Zhang, Y. · F. Li · T. Sun and J. Wang. 2012. Effect of deicing salts on urban soils and the health of roadside pines (*Pinus tabulaeformis*) in Northeast China. Appl. Mech. Mater. 178 : 353-356.