

고속도로 주변 토양의 나트륨흡착비(SAR)를 이용한 제설제 분포 추적

조성현¹ · 이동근¹ · 신건환¹ · 최천일¹ · 이군택^{1*} · 김도순² · 이병덕^{3*}¹서울대학교 농생과학공동기기원²서울대학교 농림생물자원학부³한국도로공사 도로교통연구원Tracing the Distribution of Deicer around Highway Areas
using Sodium Adsorption Ratio (SAR) of SoilSunghyen Cho¹ · Dongguen Lee¹ · Gunhwan Shin¹ · Cheonil Choi¹
Goontaek Lee^{1*} · Dosoon Kim² · Byeongduk Lee^{3*}¹National Instrumentation Center for Environmental Management, Seoul National University, Seoul 08826, Korea²College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 08826, Korea³Expressway & Transportation Research Institute, Korea Expressway Corporation, Kyeonggi 18489, Korea

ABSTRACT

The goal of this study was to estimate the possible scattering distance of deicer from the highway and the impact range of deicer on soil quality in terms of plant growth. Among the major elements (Ca^{2+} , Cl^- and Na^+) of deicer, Ca^{2+} and Cl^- are usually applied as fertilizer to soil. Therefore both elements (Ca^{2+} and Cl^-) were not appropriate for a tracer of deicer at the agricultural area. In this study, SAR (sodium adsorption ratio) of soil was proposed as an alternative tracer to confirm the distribution of the deicer around the highway areas. Because deicer is the main anthropogenic source of Na^+ around the highway areas and does harm to the physical properties of soil and plant growth through the destruction of soil aggregate, SAR would be a recommendable tracer to access the distribution of deicer as well as adverse effect on soil quality at highway areas. The influence range of deicer based on SAR of soil was estimated to be less than 20 m distance from the highway even though the possible flying distance of deicer was found to be more than 100 m from the highway. However the deicer seriously deposited within 10 m from the highway.

Key words : Highway, Deicer Elements, Tracer, SAR

1. 서 론

제설제(deicer)는 도로에 쌓이는 눈을 녹이는 물질이며, 그 종류는 염화물계와 비 염화물계로 나뉘는데 염화물계는 소금(NaCl), 염화칼슘(CaCl_2), 염화마그네슘(MgCl_2) 등이고 비염화물계는 복합유기산염 등이다. 우리나라는 2001년까지 염화칼슘(CaCl_2)과 모래를 혼합한 제설제를 살포

하였으나, 마찰제인 모래 사용으로 인한 모래의 채수거 작업 및 비용 문제와 폐모래 처리비용 등의 각종 폐해가 발생하였고 염화칼슘 수급의 불균형에 따른 공급 지연 및 가격상승 등 신속한 제설작업 수행에 여러 가지 어려움이 있어, 2002년부터 염화칼슘과 소금(NaCl)을 혼합한 용액 살포방식(습염방식)을 사용하고 있다(Jo, 2003).

제설제 성분은 식물의 발아 성장에 영향을 주어 고사에 이르게 하고, 겨울철에 최고농도를 보이며, 다른 계절에는 상대적으로 낮은 농도를 보인다(Daubenminre, 1974; Gibbs and Burdeki, 1983; Viskari and Karenlampi, 2000; Cunningham et al., 2008; Lee, et al., 2007; Kim and Hong, 2007; Shin et al., 2010; Kim et al., 2012; Kim and Lee, 2014; Lee, 2015; RDA, 2015). 그리고 제설제 성분 중 염소는 지표수에서 밀도구배, 염소이온증가,

주저자: 조성현, 책임연구원

공저자: 이동근, 선임연구원; 신건환, 선임연구원; 최천일, 선임연구원; 김도순, 교수

*교신저자: 이군택, 교수; 이병덕, 연구위원

E-mail : gtleee@snu.ac.kr, lbdhhy@ex.co.kr

Received : 2022. 03. 30 Reviewed : 2022. 04. 15

Accepted : 2022. 06. 07 Discussion until : 2022. 08. 31

충서 유도 및 조류(algal) 발생에 영향을 준다(Kaushal et al., 2005; Ramakrishna and Viraraghavan, 2005). 지하수에서 소금(NaCl)은 음용 목적의 물에 감각적인 특성을 변화시키는 작용도 한다(Watson et al., 2002). 제설제로서 소금은 경제적인 이유로 사용을 유지해야 한다는 의견도 있지만, 친환경 제설제로 대체해야 한다는 주장과 환경피해를 줄이기 위해 살포 방법을 바꿔야 한다는 주장도 있다(Shin et al., 2010; Lee, 2015).

비산 특성을 파악하기 위해 고속도로와 평행하게 일정 거리를 두고 높이가 다른 집진장치를 설치하여 비산제 영향을 파악하거나, 토양에 유입되는 제설제 성분을 평가하기 위해 표토와 심토로 구분해 시료를 채취하기도 하였다(Lundmark and Olofsson, 2007; Aljazzar and Kocher, 2016). 또한 비산 모델을 이용하여 제설제의 농도분포를 예측하기도 하였으며(McBratney and Webster, 1986; Pedersen et al., 2000; Blomqvist, 2001; Lax and Peterson, 2009; Pan and Miao, 2015; RDA, 2015). 전기비저항탐사 방법을 적용하여 도로 주변 제설제 분포 형태를 추정하기도 하였다(Brookes, 1995; Lundmark and Olofsson, 2007; Lundmark, 2008).

그런데 선행 연구의 대부분은 염소(Cl^-)의 부정적 역할에 집중하여 고속도로로부터 염소의 비산거리 산정연구였다(McBratney and Webster, 1986; Pedersen et al., 2000; Blomqvist, 2001; Kaushal et al., 2005; Lax and Peterson, 2009; Lundmark and Olofsson, 2007; Pan and Miao, 2015; Aljazzar and Kocher, 2016). 제설제 성분 중 염소(Cl^-)나 칼슘(Ca^{2+})은 인위적 활동, 특히 농업 활동에 식물 영양제 또는 토양개량제로도 투입될 수 있는 물질이어서 농업용지로 사용되는 지역에서의 제설제 추적 물질로서는 한계가 있다. 한편, 나트륨 흡착비(sodium adsorption ratio, 이하 SAR)는 토양 내에서 칼슘(Ca)이 나트륨(Na)으로 치환되는 경우 수용액 중에 나트륨의 높은 농도로 인한 위험도를 평가하는 간단한 지표이다(Wilcox, 1955; Petter, 1994). 나트륨은 다른 제설제 성분들(Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^-)과 구분되고 토양의 SAR 값이 13을 초과하는 경우 나트륨성 토양으로 분류되어 점토 입자들을 분산시키고 입단을 파괴하여 토양의 물리성을 악화시키므로 SAR를 이용한 평가지표는 나트륨에 의한 식생 영향평가에 이용되기도 하였다(Brady and Weil, 2014). 토양의 SAR은 제설제 주성분인 Na의 토양 유입으로 그 값이 증가하며 비료나 토양개량제 등의 성분과 중복되지 않기 때문에 제설제의 토양 유입 여부를 판단할 수 있는 유용한 지표가 될 것이다.

그러므로 본 연구의 주요 목적은 고속도로 주변 농경지에도 적용 가능한 토양의 SAR을 추적 지표로 선택하여 제설제 성분의 비산 가능 거리와 고속도로부터 이격거리에 따른 토양의 SAR 변화양상을 파악하여 제설제 유입에 따른 농업용지로서 토양의 질(SAR 13 초과 여부 확인) 저하로 인한 식물생육 피해 가능 영향범위를 파악하는 것이다.

2. 연구 방법

2.1. 연구지역

연구지역은 50번 고속도로의 대관령 IC로부터 진부 IC 방향으로 약 3.5 km(영동선 208.4k)에 위치하였다. 농경지는 고속도로로부터 약 50 m 정도 떨어져 있었다(Fig. 1a). 평균온도는 동절기(12월부터 다음해 3월까지) -4.0°C , 비동절기(3월부터 11월까지) 13.2°C 로 동절기에는 지속적으로 제설제를 살포하는 지역이었다(KMA, 2021). 고속도로를 기준으로 배수로는 남쪽 사면은 20 m, 북쪽 사면은 10 m 지점에 위치하여 사면의 경사도는 남쪽이 북쪽 보다 약 2배 정도 완만하였다(Fig. 1b). 강수량은 동절기 229 mm, 비동절기 2,432 mm로 비동절기에 10배 이상 집중되어 동절기에 살포된 제설제 성분이 비동절기 기간에 강우로 인해 희석되어 그 농도가 매우 낮을 것으로 예상되었다. 평균풍향은 동절기에 서서남(242.5°), 비동절기는 남남서(189.5°) 방향으로 연평균 풍향은 서남풍(207.3°)이었다(KMA, 2021). 최대 풍향풍속은 동절기는 16.5 m/s 이고 비동절기는 14.2 m/s 로 최대풍속의 풍향은 모두 서풍(270°)이었다(Fig. 1c, Fig. 1d). 고속도로의 방향이 동동북(북의 기준으로 시계방향으로 약 70°) 방향이므로 주풍향으로 인해 비산된 제설제는 도로의 남남동쪽(이하 남쪽)에 더 집적될 것으로 예상되었다.

시간당 평균 교통량과 속도는 동향(강릉 방향)으로는 각각 671대/h와 96 km/h 이었고 서향(인천 방향)으로는 662대/h와 95 km/h 이었다(KEC, 2021). 서향과 비교해 동향으로 시간당 평균 교통량과 속도가 각각 9대/h와 1 km/h 로 높았다(Fig. 2a). 교통량과 속도는 1월, 봄철(5월) 및 여름휴가(8월~9월) 기간 등에서 각각 정체와 저속이었지만, 2017년 4월 이후부터 정체는 있었으나 속도는 높았다. 차량의 바퀴는 제설제를 튀기거나 눈을 녹여 도로변에 집적시키므로, 교통량이 많고 속도가 높은 동향의 오른쪽(고속도로의 남쪽)에 제설제가 더 집적될 것으로 예측되었다. 제설제의 살포는 1차 시기(2016.11.2.~2017.4.1)와 2차 시기(2017.11.3.~2018.3.21)로 구분되며, 제설제의 살

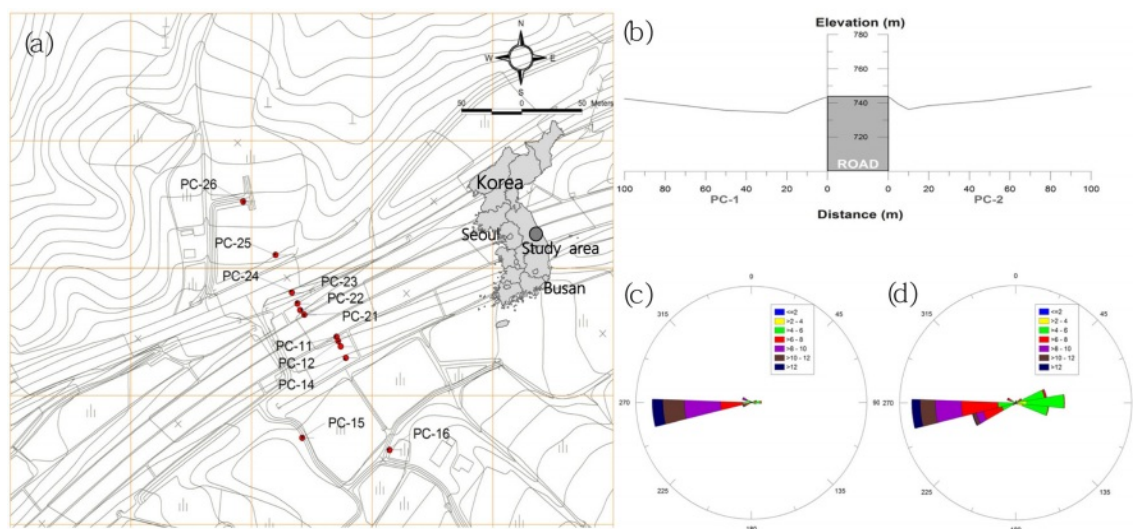


Fig. 1. The map showing sampling points (a), elevation (b), wind rose of winter season (c), wind rose of non-winter (d) at the study site.

포량은 1차에서 92.58 ton/km, 2차에서 129.63 ton/km로 2차에서 약 37 ton/km이 증가하였다(Fig. 2b). 살포량의 크기에 따른 제설제의 확산은 2차에서 더 클 것으로 예상되었다. 살포된 제설제는 모두 염화물계로 염화칼슘(CaCl_2)과 소금(NaCl)이었다. 제설제 살포 비율은 1차는 $\text{CaCl}_2 : \text{NaCl} = 0.13 : 0.87$ 이었고, 2차는 $\text{CaCl}_2 : \text{NaCl} = 0.14 : 0.86$ 으로 염화칼슘 대비 소금의 비율이 약 6.5배 높았다(KEC, 2021). 따라서 고속도로 주변 토양으로 유입되는 제설제의 주요 성분은 칼슘(Ca^{2+}), 나트륨(Na^+), 염소(Cl^-)였다.

2.2. 거즈 및 토양 시료 채취

시료 채취는 2016년 11월~2018년 10월까지 수행되었고, 1차와 2차로 나눠 채취하였다. 1차(1st)는 2016년 11월부터 2017년 10월까지였고, 2차(2nd)는 2017년 11월부터 2018년 10월까지 수행하였다. 고속도로에 살포된 제설제의 확산 범위를 평가하기 위하여 거즈(gauze) 4개를 제설제 흡착판(가로 0.8 m × 세로 0.3 m)에 부착해 지표면으로부터 1 m 상부에 설치하였다. 흡착판의 설치지점은 고속도로를 기준으로 남쪽(PC-1)에 1 m(PC-11지점), 5 m(PC-12지점), 10 m(PC-13지점), 20 m(PC-14지점), 50 m(PC-15지점), 100 m(PC-16지점) 간격으로 6개 지점 그리고 북쪽(PC-2)에 1 m(PC-21지점), 5 m(PC-22지점), 10 m(PC-23지점), 20 m(PC-24지점), 50 m(PC-25지점), 100 m(PC-26지점) 간격으로 6개 지점씩 총 12개 지점이었다(Fig. 1a).

거즈는 부착 전에 지퍼백에 넣고 소수점 셋째 자리까지 측정이 가능한 저울을 이용하여 무게를 달았고, 탈착 후

같은 지퍼백에 회수하였다. 거즈 채취는 동절기에 월 4회 이상으로 4개의 거즈를 강설 전, 강설 후 1일, 강설 후 3일 및 강설 후 7일에 수거하였고, 비동절기에 2개월 1회 주기로 4개를 수거하였다. 또한 토양에 유입된 제설제의 분포를 확인하기 위하여 거즈 흡착판 주변에서 고속도로와 평행한 방향으로 3개 지점 이상에서 표토(토심 0~15 cm)를 모종삽, 삽 및 공괘를 이용하여 채취하였다. 약 24개월간 채취된 거즈와 토양시료의 수는 각각 546개와 564개였다. 시기별과 남쪽(PC-1)과 북쪽(PC-2)으로 시료의 개수를 구분하면, 거즈시료 수는 1차 시료 채취 기간에는 남쪽(PC-1)과 북쪽(PC-2) 각각 168개와 174개였고 2차 시료 채취 기간에는 양측 모두 102개로 동일하였다. 토양시료 수는 1차 시료 채취 기간에 남쪽(PC-1)과 북쪽(PC-2) 각각 168개 채취하였고, 2차 시료 채취 기간에는 양측 모두 114개로 동일하였다.

2.3. 제설제 성분분석

거즈에서 제설제 성분은 지퍼백에 증류수 100 mL를 넣어 거즈를 포화시킨 후 약 3시간 정치함으로써 용출시켰다. pH, 전기전도도(EC), 양이온(Ca^{2+} 와 Na^+) 및 음이온(Cl^-)의 농도는 거즈 용출액을 여과지(pore size 0.45 μm)를 이용해 여과시킨 후 여과액에서 측정하였다. 거즈에서 측정된 EC 및 제설제 성분(Ca^{2+} , Na^+ 및 Cl^-)은 바탕(blank) 농도로 보정되었고, 바탕 값은 거즈가 흡착판에 부착되기 전(강설 전)의 거즈의 값이었다. 거즈의 EC, Ca^{2+} , Na^+ , Cl^- 의 평균적인 바탕 값은 각각 0.12 dS/m, 4.62 mg/L, 21.19 mg/L, 6.44 mg/L이었다. 채취된 토양은

풍건(風乾)하고 토양 입단을 고무망치로 파쇄한 후 2 mm 체거름 하여 공시토양으로 만들었다. 공시토양 200 g을 뚜껑이 있는 플라스틱 용기에 넣고 토양이 포화 될 때까지 증류수를 서서히 가하여 포화 반죽(saturation paste)을 완성 시킨 후 뚜껑을 닫고 약 16시간 동안 정치한 다음 진공여과 장치를 이용하여 포화 반죽 안의 토양용액을 추출하였고, 여과액은 여과지(pore size 0.45 μm)를 통과시켜 250 mL 삼각플라스크에 수집하였다. 토양 포화침출액에 대해서 수소이온농도(pH), 전기전도도(EC), 양이온(Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , K^+) 및 음이온(Cl^-)의 농도를 측정하였다. 거즈 및 토양에서 추출액과 포화침출액에 대한 pH는 pH meter(HM-42X/TOA-DKK), EC는 EC meter(ORINON STAR A329/Thermo), 양이온은 유도결합플라즈마-발광광도계(ICP-AES, ICP-730-ES/Agilent, ICP-7400/Thermo), 음이온은 이온크로마토그래프(IC, ICS-5000/Thermo)을 이용하여 측정하였다. 한편 토양의 pH는 포화침출액과 별개로 토양오염공정시험기준(NIER, 2017)의 ES07302.1a의 방법에 따라서 풍건 시료 5 g을 100 mL 플라스크에 취하여 증류수 25 mL를 가하고 유리봉으로 저어주면서 1시간 방치한 후 pH meter(HM-42X/TOA-DKK)로 측정하였다.

2.3. 제설제의 비산 범위와 토양 중 제설제 성분 분포 평가 방법

제설제의 비산 범위는 고속도로 주변에 거리별로 이격하여 설치된 거즈를 수거하여 평가하였다. 설치 전 거즈 중의 제설제 성분 농도를 미리 분석하고 수거된 거즈에서 검출된 제설제 성분의 농도가 설치 전의 농도를 초과하는 경우 해당 지점까지 제설제가 확산된 것으로 규정하였다. 고속도로에 살포된 제설제가 주변 토양에 유입되어 분포하는 양상을 확인하기 위하여 나트륨 흡착비(이하 SAR)를 평가하였다(Wilcox, 1955). 일반적인 토양에서는 칼슘의 함량이 나트륨 성분보다 높고 농업 활동에서 나트륨 성분을 추가로 토양에 처리하는 경우는 없기때문에 소금(염화나트륨) 기반의 제설제의 토양 유입을 평가함에 있어 SAR이 유용한 지표가 될 것으로 판단하였다.

$$SAR = \frac{(Na^+)}{\left[\frac{(Ca^{2+}) + (Mg^{2+})}{2} \right]^{0.5}} \quad (1)$$

SAR은 토양과 평형을 이루는 용액 중의 Ca^{2+} , Mg^{2+} 과 Na^+ 의 상대 농도 비율에 대한 정보를 제공하고 토양에 흡착된 Na^+ 의 양이온교환용량(CEC) 점유율을 추정할 수 있는 값이다. 2.2절에서 얻어진 토양 포화침출액 중의 Na^+ ,

Ca^{2+} , Mg^{2+} 의 농도를 유도결합플라즈마-발광광도계를 이용하여 정량한 후 식 (1)에 대입하여 산출하며 사용된 이온 농도의 단위는 meq/L이다. pH, EC_e 및 SAR 값을 이용하여 고속도로 주변 토양을 일반토양($\text{pH} < 8.5$, $\text{EC}_e < 4$, $\text{SAR} < 13$, normal soils), 염류토양($\text{pH} < 8.5$, $\text{EC}_e > 4$, $\text{SAR} < 13$, saline soils), 염류-나트륨성토양($\text{pH} < 8.5$, $\text{EC}_e < 4$, $\text{SAR} > 13$, saline-sodic soils), 나트륨성토양($\text{pH} > 8.5$, $\text{EC}_e < 4$, $\text{SAR} > 13$, sodic soils)으로 분류해 봄으로써 제설제 유입 후 토양 중 분포 특성을 평가하였다(Brady and Weil, 2002).

3. 결과 및 고찰

3.1. 거즈를 이용한 제설제 확산 평가

Table 1은 고속도로에서 일정 거리별로 이격된 지점에서의 거즈 시료의 pH, EC 및 제설제 성분(Ca^{2+} , Na^+ 및 Cl^-) 등 각 항목의 분석치에 대한 평균값을 고속도로를 중심으로 남쪽(PC-1)과 북쪽(PC-2)으로 구분해 시기별과 거리별로 나타낸 것이다. pH의 경우 6.2~6.9 범위로 약산성에서 중성으로 2차 조사와 비교해 1차 조사에서 조금 높았다. 바탕시료(blank)에 대한 거즈 시료의 농도 수준은 EC가 2~119배, Ca^{2+} 은 3~114배, Na^+ 은 1.6~164배, 그리고 Cl^- 은 5~913배로 높게 나타났다. 제설제 성분의 농도는 $\text{Cl}^- > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+$ 순으로 높게 나타났다. 고속도로로부터 100 m 떨어진 지점에서의 제설제 성분 농도가 바탕시료의 1.6~5배 수준으로 검출되는 것으로 보아, 비산범위가 고속도로로부터 100 m 이상일 것으로 판단되었다.

pH를 제외하고 각 항목의 평균 농도를 남쪽과 북쪽 지역으로 나눠 비교하면, 1차 조사의 경우 고속도로 남쪽에서 EC를 제외한 모든 항목의 농도가 북쪽보다 1.06~1.65배 높게 나타났으며 이는 제설제 성분의 비산이 남쪽으로 더 우세했음을 의미한다고 볼 수 있다. pH를 제외하고 각 항목의 평균 농도를 1차 조사와 2차 조사로 나눠 비교하면, 모든 항목의 농도가 2차 조사에서 2.17~3.42배 높아져 2차 조사 시기에서 풍속과 제설제 살포량이 더 높거나 많았던 것으로 유추되었다. 실제로 제설제 살포량은 1차에 비해 2차에서 1.4배(약 37 ton/km) 증가했었다(Fig. 2). 고속도로 양옆의 1 m 이격 지점에서 수거된 거즈의 각 항목 분석값을 100%로 가정했을 때, 2차 조사의 남쪽 지역을 제외하고 5 m 지점의 각 항목의 분석값은 1 m 지점의 약 23~63% 수준이었다. 2차 조사의 남쪽 지역은 10 m 지점까지 동일 거리를 갖는 다른 모든 지점과 비교할 때 각 항목의 분석값이 가장 높았지만, 5 m 지점에서

Table 1. Average concentration of pH, EC, and deicer elements in gauze according to distance from highway during two seasons

Season	Distance from highway	PC-1 (south direction)					PC-2 (north direction)				
		pH	EC (dS/cm)	Ca ²⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	pH	EC (dS/cm)	Ca ²⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)
1 st	Blank	-	0.12	4.62	21.19	6.4	-	0.12	4.62	21.19	6.4
	1 m	6.9	3.56	121.75	879.46	1,852.4	6.8	3.88	94.55	846.81	1,373.1
	5 m	6.8	2.07	77.36	407.23	563.7	6.9	1.13	44.52	197.34	380.9
	10 m	6.9	0.49	20.11	74.65	93.9	6.8	0.44	18.18	61.11	88.8
	20 m	6.9	0.34	16.58	38.60	43.0	6.9	0.52	21.75	76.56	113.9
	50 m	6.9	0.42	20.28	54.29	71.7	6.9	0.81	29.22	131.78	209.3
	100 m	6.7	0.28	14.38	34.17	32.0	6.9	0.42	22.06	51.36	65.3
	Average	6.8	1.17	44.44	243.03	432.0	6.9	1.20	38.38	227.49	371.9
2 nd	1 m	6.2	14.28	528.58	3,475.67	5884.4	6.3	8.79	306.40	1,863.84	3,308.9
	5 m	6.2	2.54	72.68	454.88	892.7	6.4	4.23	125.19	813.49	1,563.9
	10 m	6.4	0.90	31.99	138.01	264.8	6.4	1.22	43.86	197.05	372.7
	20 m	6.2	1.24	43.46	203.14	314.0	6.6	0.54	23.62	71.41	150.3
	50 m	6.2	2.74	68.66	502.94	731.7	6.6	0.35	19.70	38.06	145.1
	100 m	6.3	1.31	48.46	212.91	271.9	6.3	0.45	25.21	45.77	94.3
	Average	6.3	3.84	132.30	831.26	1348.8	6.4	2.60	90.67	504.93	939.2

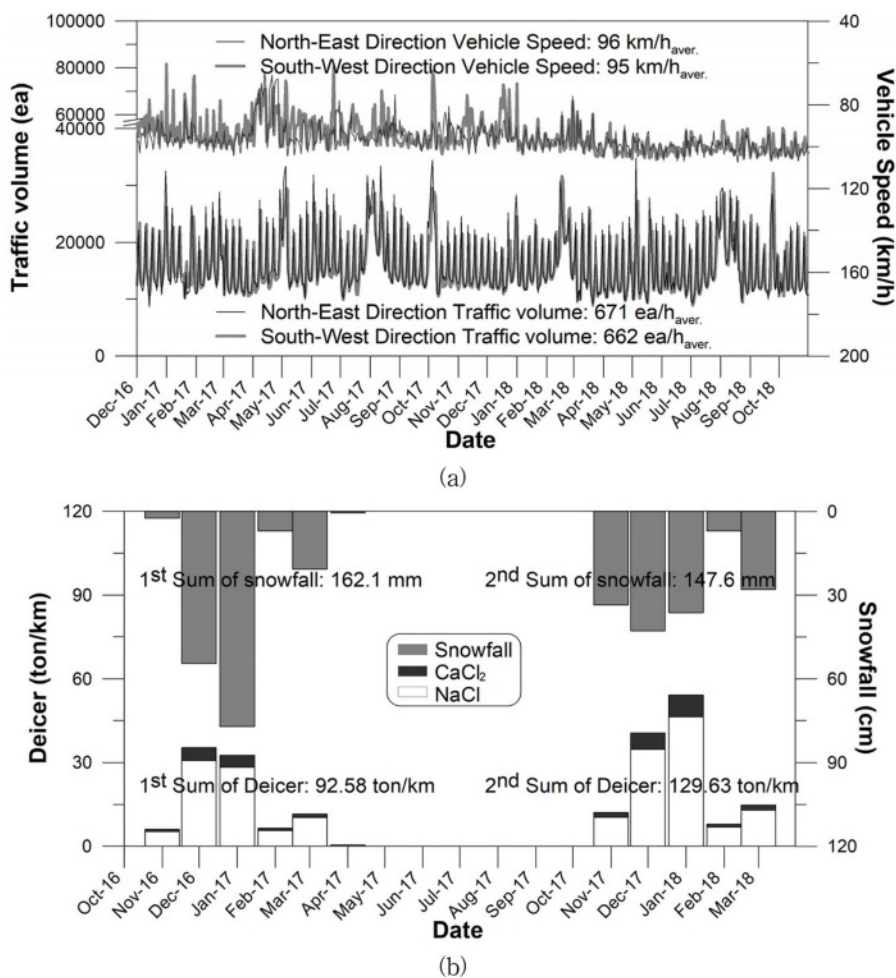
**Fig. 2.** The graph showing traffic volume and vehicle speed (a), amount of snowfall and applied deicer (b) during the study periods.

Table 2. Average concentration of pH, EC, and deicer elements in soil according to distance from highway during two seasons

Season	Distance from highway	PC-1 (south direction)					PC-2 (north direction)				
		pH	EC (dS/cm)	Ca ²⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	pH	EC (dS/cm)	Ca ²⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)
1 st	1 m	6.8	13.65	287.73	3,723.28	6,212.7	6.9	15.63	283.57	4,375.45	6,166.9
	5 m	5.5	5.01	139.42	1,165.55	1,922.7	6.5	3.03	134.56	417.18	1,002.5
	10 m	5.3	1.87	139.52	298.88	528.1	6.6	2.43	161.06	142.44	321.3
	20 m	5.6	1.14	151.50	125.30	290.3	6.5	3.47	277.52	844.75	1547.6
	50 m	5.7	1.54	255.17	33.66	52.0	4.7	1.69	176.23	69.08	224.0
	100 m	6.4	1.71	133.82	16.66	38.0	5.8	1.31	180.59	18.16	61.4
	Average	5.9	4.15	184.53	893.89	1507.3	6.2	4.59	202.26	977.84	1554.0
2 nd	1 m	6.9	5.41	251.62	1,012.01	1,876.0	6.6	4.66	69.61	1,072.13	1,558.6
	5 m	6.6	3.89	204.29	689.94	1,218.5	5.9	3.63	74.61	748.44	1,124.4
	10 m	6.7	0.94	115.33	89.72	131.0	5.3	1.10	63.89	158.70	235.2
	20 m	6.8	1.38	173.52	132.52	320.4	5.8	1.05	127.02	94.49	98.6
	50 m	6.2	2.29	351.57	138.44	325.3	5.8	0.84	137.02	35.53	41.7
	100 m	5.4	1.19	184.65	24.64	57.4	5.4	1.02	151.40	27.50	37.5
	Average	6.4	2.52	213.50	347.88	654.8	5.8	10.58	103.93	356.13	516.0

각 항목의 분석값은 1 m 지점의 12~19% 농도 수준이었다(Table 2). 이것은 2차 조사 기간에 남쪽으로의 비산이 보다 우세했기 때문일 것으로 생각된다. 그리고 남북의 50 m 지점에서 각 항목의 분석값이 5 m 지점보다 낮았으나 10 m, 20 m 지점을 거치면서 감소 되는 경향과는 다르게 다시 증가하는 경향을 보였다(Table 2). 고속도로 남북의 50 m 지점은 밭으로 사용되는 지역이며 건조한 휴경기에 토양에 남아 있었던 비료 성분이 비산 되어 반영된 결과로 추정된다.

Fig. 3은 거즈 시료의 pH, EC 및 제설제 성분(Ca²⁺, Na⁺, Cl⁻) 등의 각 항목의 농도에 대해 고속도로를 중심으로 남쪽(PC-1)과 북쪽(PC-2)으로 구분하고 시기별과 거리별로 나타낸 것이다. 거즈의 시료 채취의 시기를 강설 전(○), 강설 후 1일(□), 3일(◇), 7일(△), 그리고 비동결기(▽)로 구분하고 이들의 평균 농도(●)를 나타낸 것이다. 거즈에서 각 항목농도는 고속도로로부터 1 m 지점에서 가장 높았고 5 m 지점을 벗어나며 급격히 감소하는 경향을 나타내었다. 고속도로 남쪽은 강설 후 1일에 각 항목의 분석값이 최고치를 보였지만, 북쪽은 강설 후 3일과 7일에서 최고 높은 것으로 나타났다.

이런 결과는 주로 3 m 이내에 제설제의 염소 성분이 집적하고 5 m를 넘어서는 농도가 낮게 유지된다는 기존의 연구와도 유사한 결과였다(Kang et al., 2008). 제설작업으로 인하여 고속도로 주변에 적재된 눈에는 염소 이온이 3,851~12,005 mg/L 수준으로 포함되어 있는 것으로 알려져 있다(Colbeck, 1981; Novotny et al., 1999). 강

설 후 거즈에서 검출된 제설제 성분의 최고값이 나타나는 시점이 1일, 3일, 7일로 각기 다른 것은 고속도로에 쌓인 눈을 작업 차량을 이용하여 물리적으로 걷어내는 과정에서 제설제 성분이 포함된 눈의 추가 비산으로 나타난 현상으로 판단되지만 구체적 인과성은 규명할 수 없었다.

3.2. 토양의 제설제 유입 및 분포 평가

Table 2는 토양시료의 pH, EC 및 제설제 성분(Ca²⁺, Na⁺, Cl⁻) 등의 각 항목의 분석값의 평균을 고속도로를 중심으로 남쪽(PC-1)과 북쪽(PC-2)으로 구분해 거리별로 나타낸 것이다. 각 항목의 평균 분석값을 남쪽 및 북쪽으로 나뉘 비교하면, 1차 조사에서는 북쪽에서의 분석값이 남쪽의 1.03~1.11배로 유사하였고 2차 조사에서는 Na⁺만 제외하면 남쪽에서의 분석값이 북쪽보다 1.01~2.05배 높았다.

제설제 성분의 토양으로의 이동은 주로 눈이 녹는 과정을 통하여 발생한다(USDOT, 2001). Oberta(1994)에 의하면 고속도로에 쌓인 눈은 1단계로 화학적인 과정과 태양의 복사선에 의하여 포장도로 위에 있는 것들이 우선 녹으면서(pavement melt) 고농도의 제설제 성분이 함유된 소량의 유체를 형성하고 2단계로 도로 주변에 적치된 눈이 점진적으로 녹으면서(roadside melt) 상대적으로 제설제 성분의 농도가 낮은 그러나 다량의 유체를 형성한다고 보고하였다. 따라서 본 연구지역에서는 북쪽보다 상대적으로 태양 복사선에 노출될 가능성이 높은 남쪽에서 pavement melt와 roadside melt 현상이 우세하여 주변

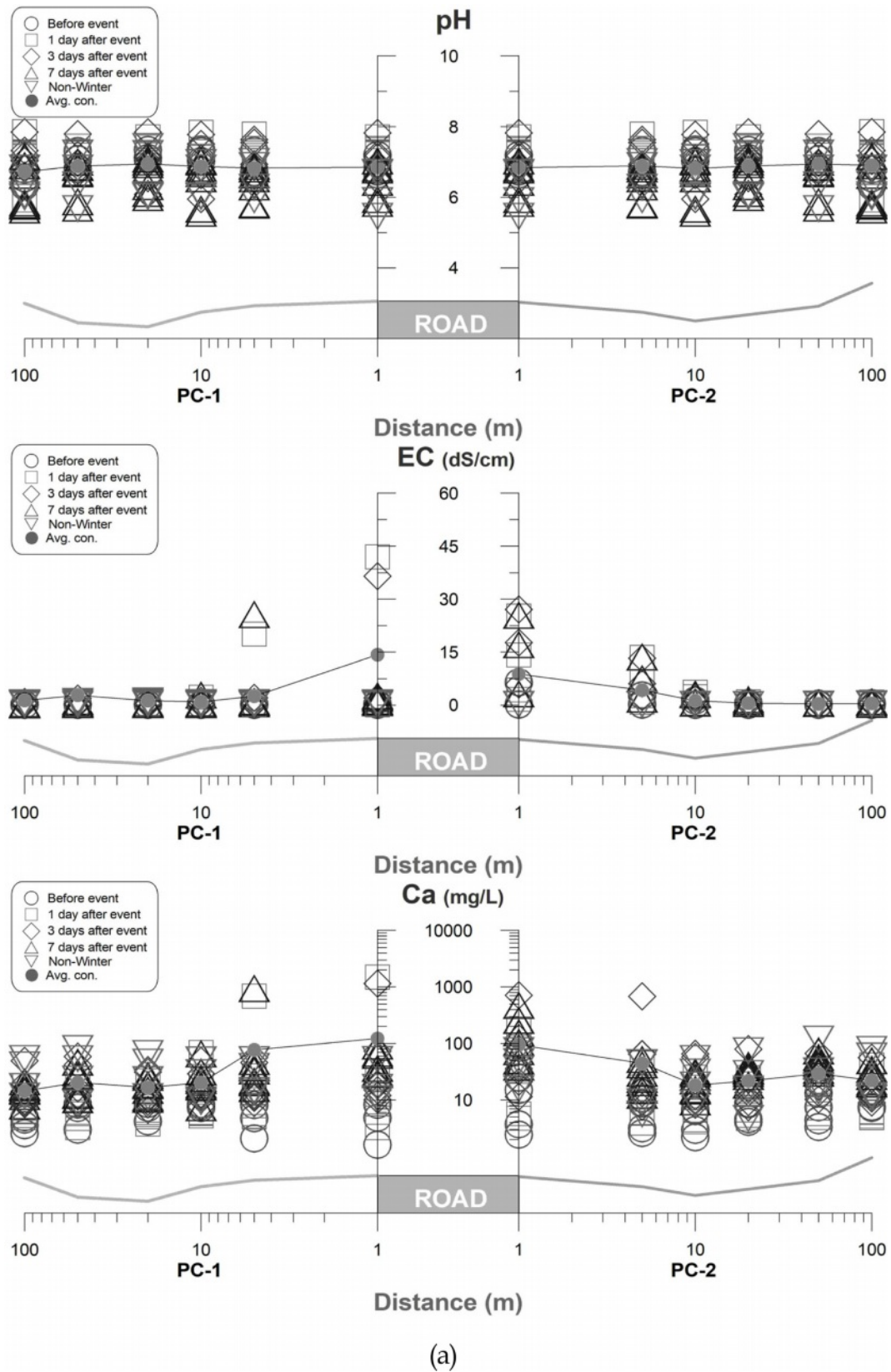


Fig. 3. pH, EC and concentration of deicer elements in gauze during 1st season (a) and 2nd season (b).

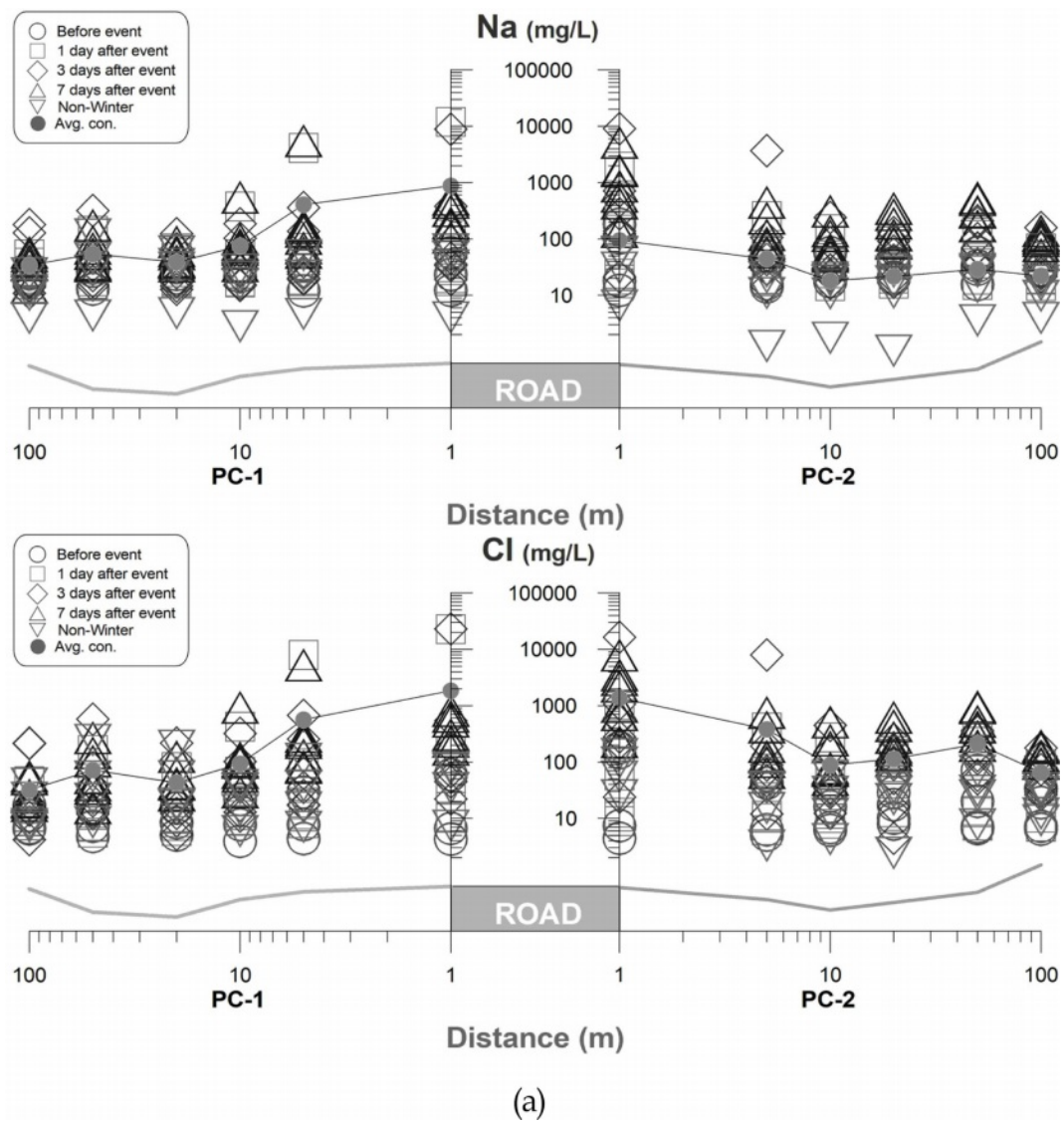


Fig. 3. continued.

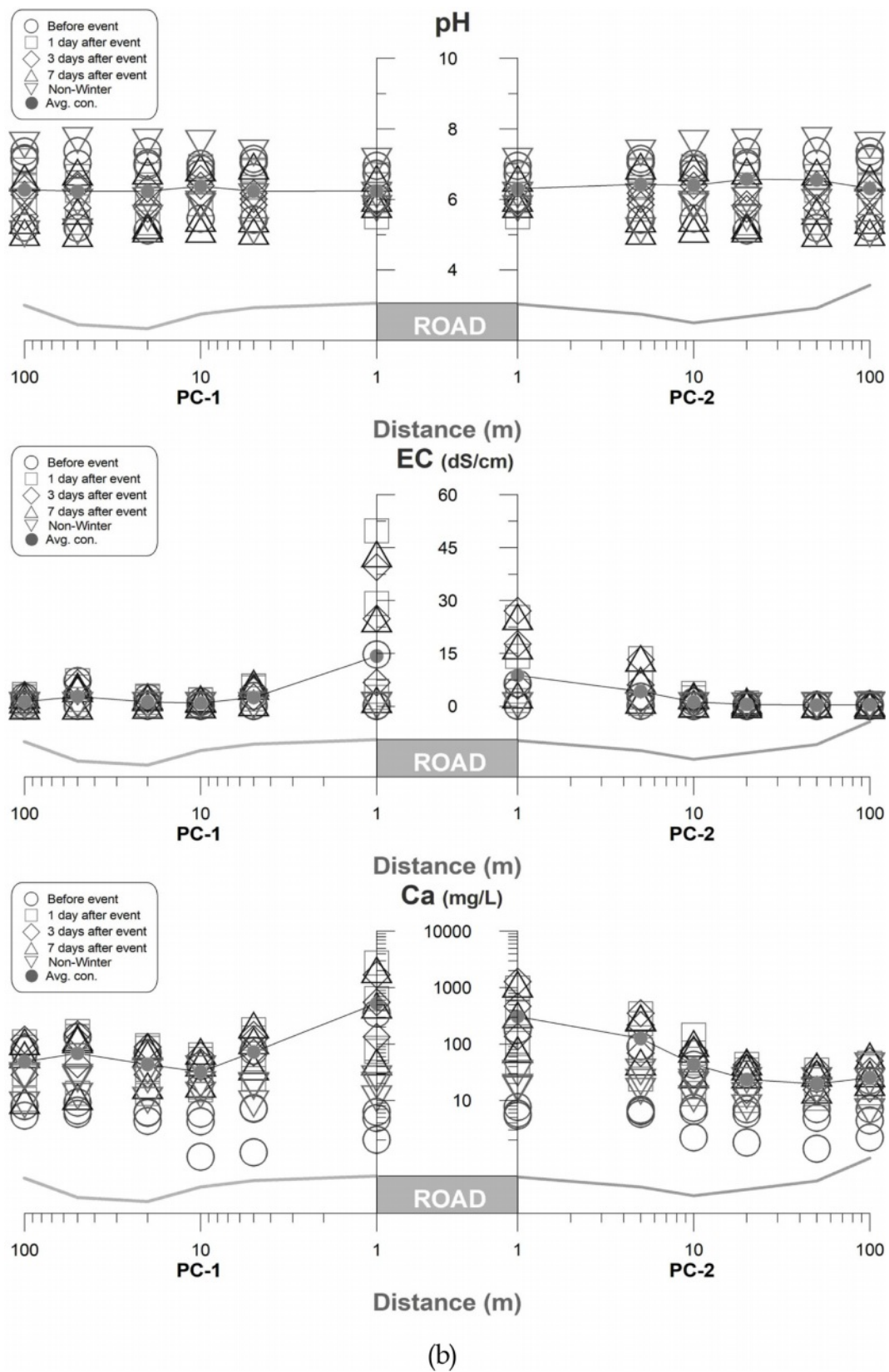


Fig. 3. continued.

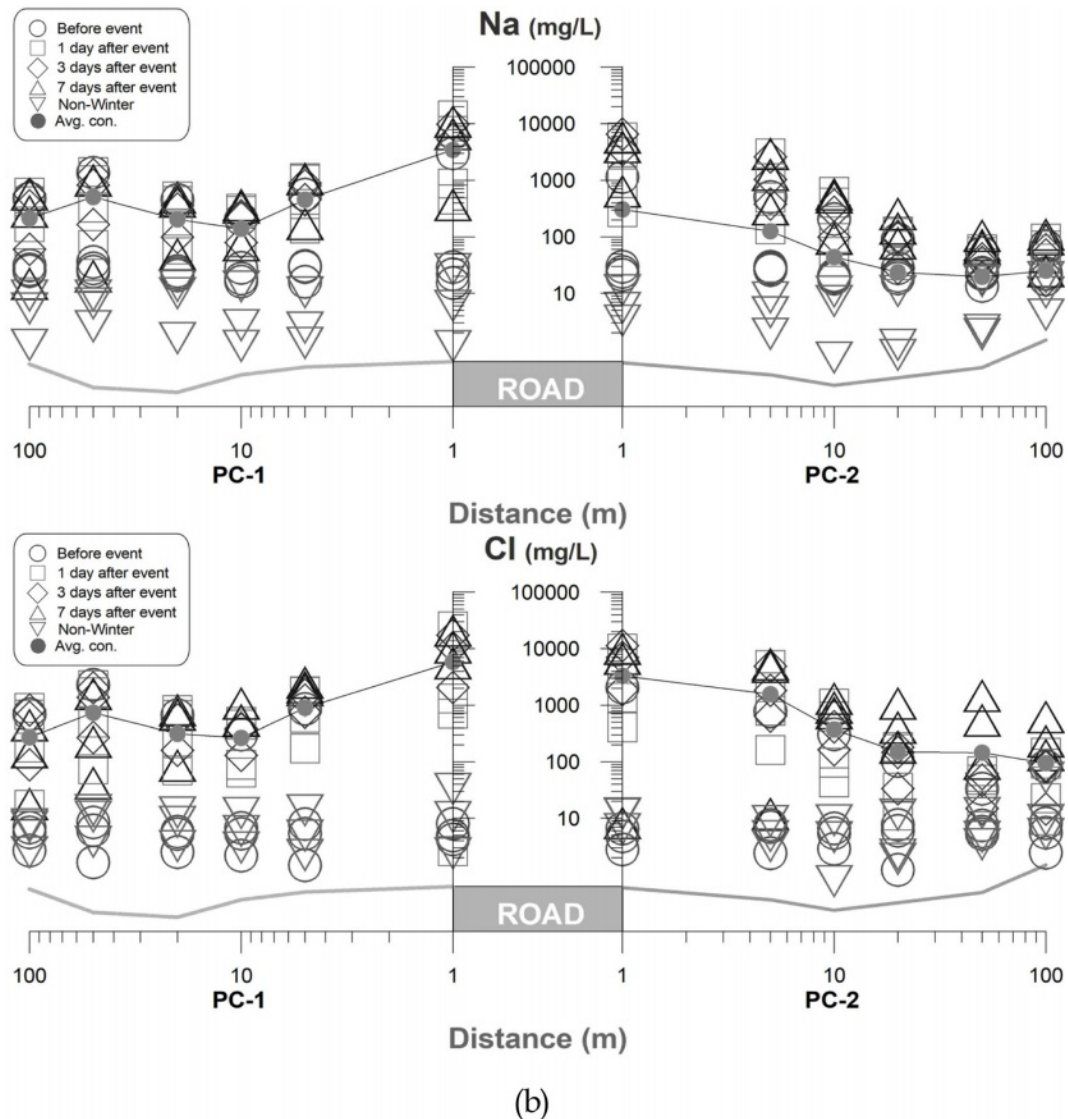


Fig. 3. continued.

토양으로 제설제 성분이 보다 많이 유입되었기 때문에 남쪽 지역이 북쪽 지역보다 제설제 성분의 농도가 높았던 것으로 보인다. 한편 1차 조사 시기와 비교할 때 2차 조사 시기에 적설량은 14.5 mm 적었지만 제설제 살포량은 오히려 약 37 ton/km 많아져 제설제 성분의 토양 유입이 상대적으로 많았을 것으로 판단된다.

Table 2, Fig. 4에 나타난 바와 같이 토양 중 Na^+ 및 Cl^- 의 농도는 고속도로로부터 1 m 지점에서 가장 높았고 5 m 지점을 벗어나며 급격히 감소하는 경향을 보여서 다른 연구 결과(Bryson and Barker, 2002; Lundmark and Olofsson, 2007)와 유사하였다. Na^+ 및 Cl^- 의 농도는 1차의 북쪽을 제외하고 5 m 지점에서 1 m 지점의 약 31~

81% 수준이었고 10 m 지점부터 100 m까지 0.4~17% 수준이었으나, 1차의 북쪽에서 농도는 5 m 지점부터 100 m 지점까지 0.4~25%로 다른 지점들과 비교해 낮았다. Ca^{2+} 의 농도는 고속도로 양옆의 1 m 지점에서 토양의 각 항목의 농도를 100%로 가정했을 때, 모든 지점에서 46~217% 범위를 보였고, 20 m와 50 m 지점에서 56~182% 범위를 보였다. 특히, 2차 조사의 북쪽에서 모든 지점의 Ca^{2+} 의 농도는 1 m 지점의 92~217% 범위를 보였으며 고속도로에서 멀어질수록 높았다. 토양 중 EC와 제설제 성분의 농도가 높은 지점은 1차 조사의 경우 북쪽 20 m 지점 있었고, EC와 Ca^{2+} 의 농도가 높은 지점은 2차 조사의 남쪽 50 m 지점이었다. 북쪽의 20 m 지점에서 EC와

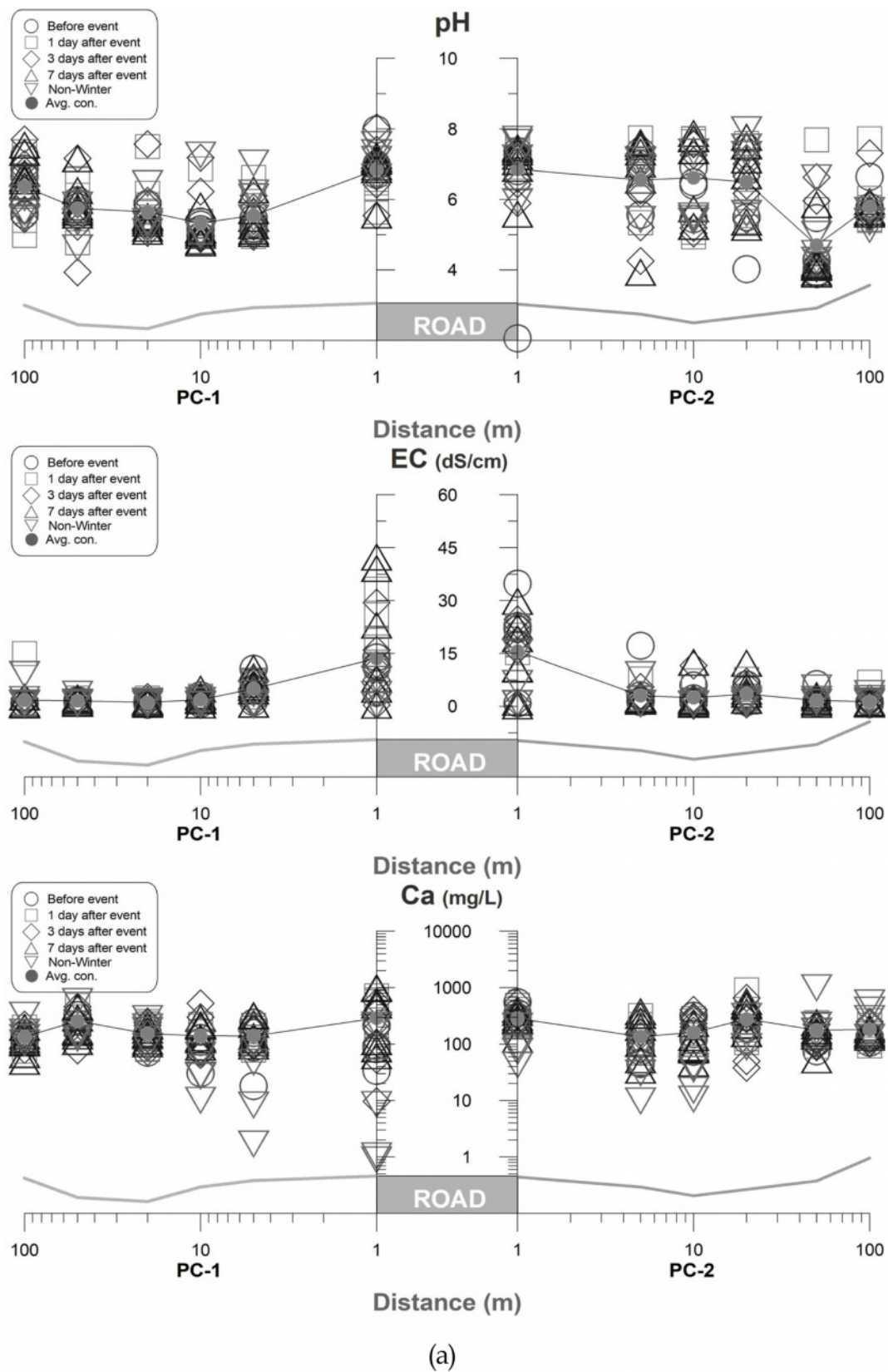


Fig. 4. pH, EC and concentration of deicer elements in soil during 1st season (a) and 2nd season (b).

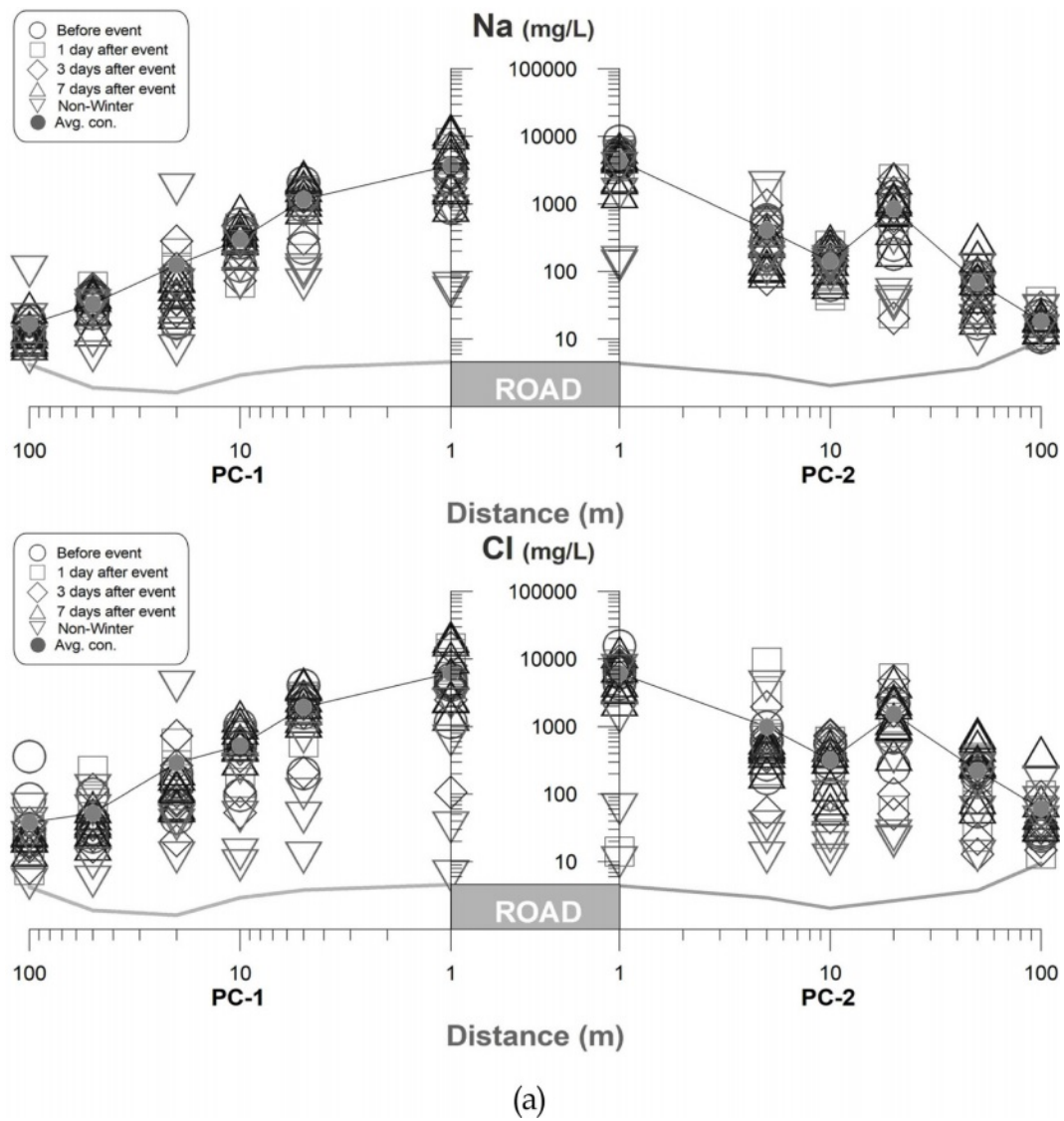


Fig. 4. continued.

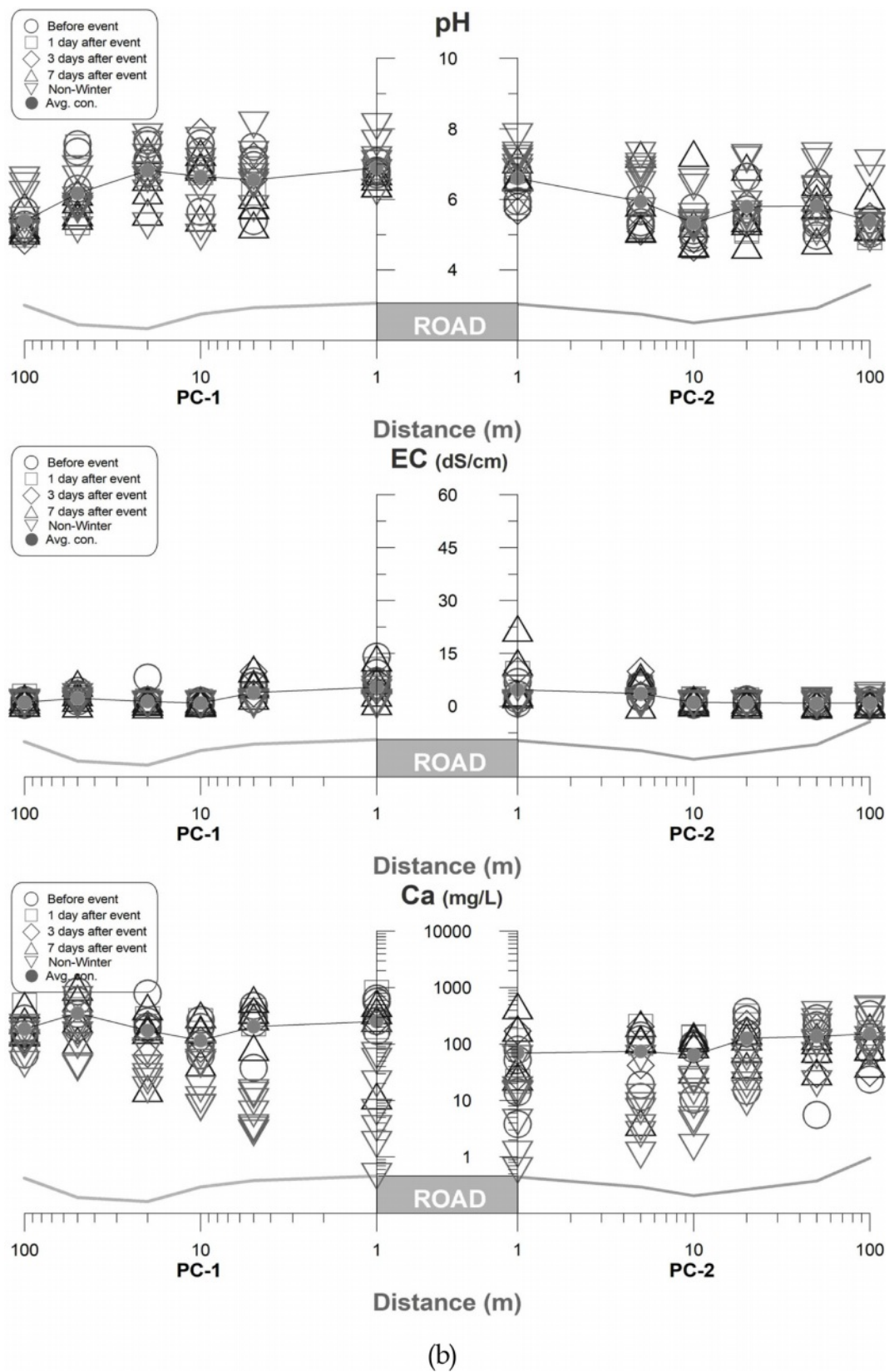


Fig. 4. continued.

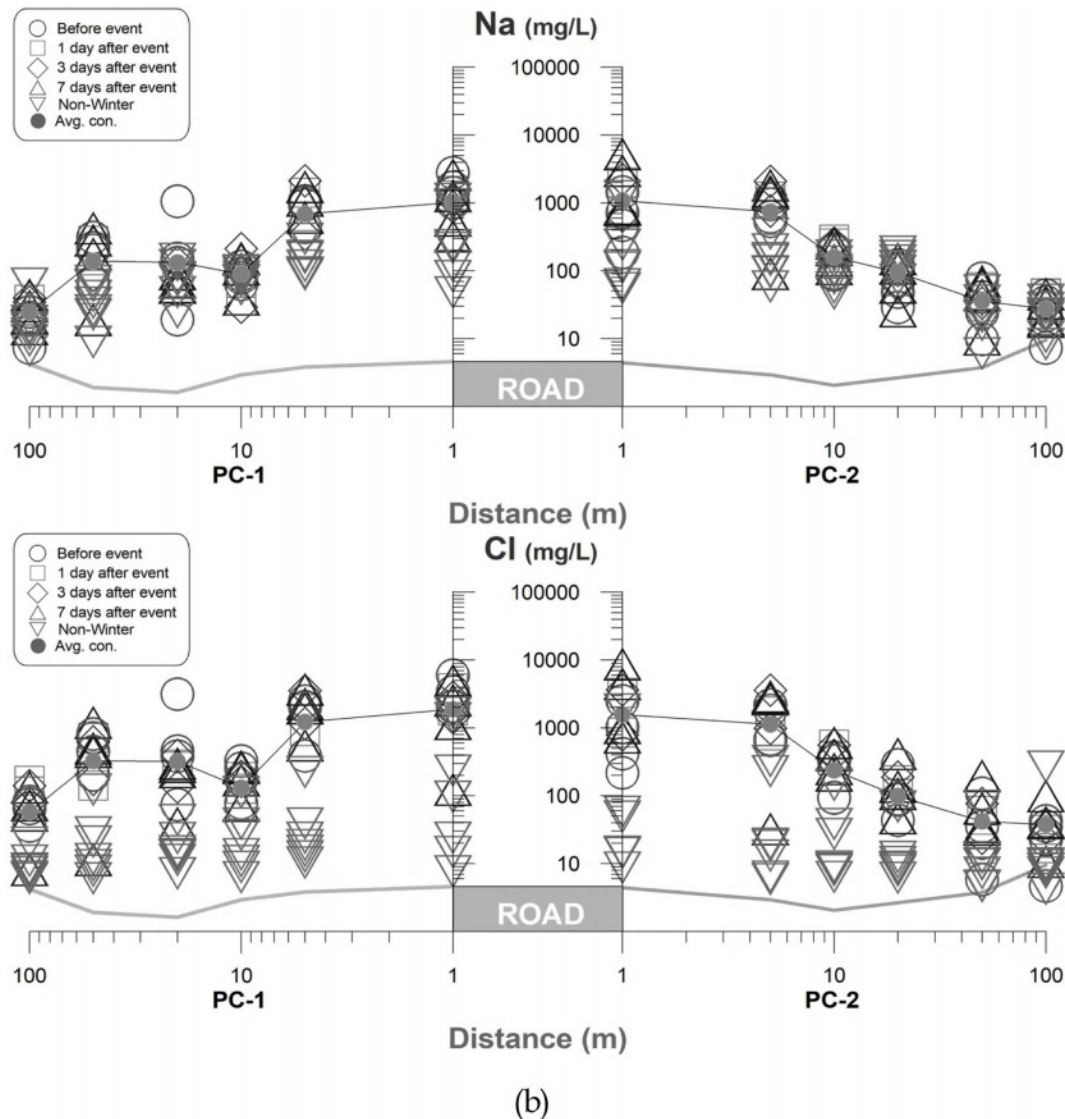


Fig. 4. continued.

제설제 성분의 농도가 높은 이유를 고속도로와 나란히 놓은 일반국도의 제설작업으로 비롯된 것으로, 남쪽 50 m 지점에서 농도가 높은 이유를 토양 개량을 위한 석회 성분의 투입 등 제설제 외 Ca^{2+} 의 추가적인 유입으로 나타난 현상으로 추정하였다.

Fig. 4는 토양의 시료 채취의 시기를 강설 전(○), 강설 후 1일(□), 3일(◇), 7일(△), 그리고 비동절기(▽)로 구분하고 이들의 평균 농도(●)를 나타낸 것이다. 각 항목의 농도가 가장 높은 시기는 1차 조사의 남쪽에서 강설 후 7일 시점이었고 북쪽은 강설 전이었다. 그러나 2차 조사의 경우는 반대로 남쪽은 강설 전이었고 북쪽은 강설 후 7일이 가장 평균 농도가 높은 시점이었다. 앞서 언급한 바

와 같이 고속도로 주변에 적치된 눈은 pavement melt와 roadside melt 현상으로 인하여 제설제 성분이 포함된 유체를 형성하고 특히 roadside melt 현상은 점진적으로 시간을 두고 일어나는 현상이므로 강설 후 7일 정도의 시점에서 토양으로 유입된 유체 및 제설제 성분의 양이 가장 높은 것으로 나타난 것으로 해석된다(Oberts, 1994). 또한 이와 같이 눈이 녹아서 흐르는 유체 중의 제설제 성분의 농도는 기존의 눈이 함유한 농도와 대비하여 상대적으로 농축되는 과정(snowmelt enrichment)을 거치므로 강설 후 직전 시점 보다는 7일 후의 시점에 토양 중 제설제의 농도가 최대가 된 것으로 판단된다(Morris and Thomas, 1985; Brimblecombe et al., 1987).

토양에서의 pH와 EC의 변화 폭은 고속도로와 가까운 사면이나 농경지에서 컸었다. 특히, 남쪽의 50 m 지점인 밭에서 Ca^{2+} 의 농도변화가 다른 제설제 성분과 비교해 매우 컸다. 이러한 농도변화는 농업 활동의 영향을 배제할 수 없으므로 Ca^{2+} 의 농도로 제설제 확산이나 피해 범위의 평가는 부절한 것으로 판단되었다. 고속도로 남쪽의 20 m 지점과 북쪽의 10 m 지점은 수로가 있는 지점으로, 남쪽의 20 m 지점의 토양에서 고농도 제설제 성분이 검출되었다. 일반적으로 눈이 녹아서 생성된 유체는 투수 지역에서 토양으로 침투하고 그렇지 못한 부분은 유거수로 주변으로 확산된다(Oberts, 1994). 눈이 녹은 유체는 눈과 토양 경계면에서 토양이 포화될 때까지 침투되며 결빙기 토양의 포화정도에 따라서 침투율은 크게 변화한다. 토양의 결빙으로 토양-눈 경계면에서 불투수층이 만들어지면 사실상 모든 유체가 주변으로 이동하게 된다(Colbeck, 1981; Oberts, 1994). 이 과정에서 고속도로 주변 지형 구배에 따라 설치된 인공 수로를 통한 이동 및 넘침 현상으로 이들 지점에서 토양 중 제설제 성분의 재상승이 이루어진 것으로 판단된다.

Table 3은 pH, EC 및 SAR 측정값을 이용하여 염류집적토양을 일반토양(normal soils, NMS), 염류토양(saline soils, SAS), 염류-나트륨성토양(saline-sodic soils, SSS), 나트륨성토양(sodic soils, SOS) 등 4가지 형태로 분류(Brady and Weil, 2014) 하고 고속도로를 중심으로 남쪽

(PC-1)과 북쪽(PC-2) 방향에 위치한 토양의 제설제에 의한 염류집적 형태를 구분한 것이다. SAS는 교환복합체로 Na^+ 이 아닌 Ca^{2+} 나 Mg^{2+} 이 지배적이므로, SAS에서 식물의 성장 저해는 높은 농도의 염류에 의한 것이지 배수성, 통기성, 입단 형성 제한성 등 토양물리성에 의한 것은 아니다. SSS에서 식물생육은 높은 농도의 염류와 과량의 Na^+ 으로 인한 토양 물리성의 악화에 의하여 저해된다. SOS는 주로 Na^+ 이 Ca^{2+} 나 Mg^{2+} 보다 지배적으로 토양에 흡착되고 용해되는 토양으로 식물생육은 불량한 토양의 물리적 조건에 의하여 저해된다. Na^+ 은 토양 토양입자 분산 및 입단 파괴, 미세 공극 메우는 효과 등으로 토양의 배수 특성과 통기성을 불량하게 한다. 본 연구지역에 사용된 제설제의 비율이 1차 조사 기간에는 $\text{CaCl}_2 : \text{NaCl} = 0.13 : 0.87$ 이었고, 2차 조사 기간에는 $\text{CaCl}_2 : \text{NaCl} = 0.14 : 0.86$ 으로 염화칼슘 대비 염화나트륨의 비율이 약 6.5배 높았으므로(KEC, 2021), 제설제의 주성분이고 농업 활동 등 여타 행위로 토양에 유입될 가능성이 낮은 Na^+ 에 주목하여 이를 기반으로 하는 SAR 13을 제설제의 토양 유입 및 분포를 판단하는 지표로 사용하였다.

1차 조사 기간의 경우 고속도로로부터 5 m 이내 이격된 지역에서 발견되는 SAR 13 이상의 토양(SSS와 SOS)은 1차 조사 기간 총 시료의 약 25%(84점/총 336점) 수준이었고 2차 조사 기간의 경우는 총 시료의 약 27%(61점/총 228점) 수준이었다. 이는 SAR 13을 초과하는 1차 및 2

Table 3. Number of soil samples by salinity-accumulating soil classification (Brady and Weil, 2002)

Season	Distance from highway	Number of samples	PC-1 (south direction)				PC-2 (north direction)			
			NMA (ea)	SAS (ea)	SSS (ea)	SOS (ea)	NMA (ea)	SAS (ea)	SSS (ea)	SOS (ea)
1 st	1 m	56	2	-	21	5	2	-	22	4
	5 m	56	5	-	19	4	19	-	4	5
	10 m	56	27	1	-	-	24	4	-	-
	20 m	56	27	-	-	1 ¹⁾	12	1	9 ²⁾	6 ²⁾
	50 m	56	28	-	-	-	26	2	-	-
	100 m	56	26	2	-	-	27	1	-	-
	Total	336	115	3	40	10	110	8	35	15
2 nd	1 m	38	4	1	10	4	1	-	6	12
	5 m	38	5	1	7	6	3	-	8	8
	10 m	38	19	-	-	-	19	-	-	-
	20 m	38	18	1	-	-	18	-	-	1 ²⁾
	50 m	38	17	2	-	-	19	-	-	-
	100 m	38	19	-	-	-	19	-	-	-
	Total	228	82	5	17	10	79	-	14	21

Note: NMS (normal soils)-pH < 8.5, EC < 4.0 dS/m, SAR < 13, SAS (saline soils)-pH < 8.5, EC > 4.0 dS/m, SAR < 13, SSS (saline-sodic soils)-pH < 8.5, EC > 4.0 dS/m, SAR > 13, SOS (sodic soils)-pH > 8.5, EC < 4.0 dS/m, SAR > 13, 1) Around the drain, 2) the road parallel to the highway.

차 조사 시료 전체를 기준으로 각각 약 84%, 약 98%에 해당하는 것으로 제설제의 토양 유입은 주로 고속도로 남쪽, 북쪽 구분 없이 약 5 m 이내에 집중되어 있음을 의미한다. 5 m 이내를 제외하고 SAR 13을 초과하는 토양 시료는 20 m 이격 지점에 분포(17점/총 564점)하였으며 10 m 이격 지점과 20 m를 초과한 이격 거리에서는 SAR 13 이상의 토양시료는 발견되지 않았다. 이는 남쪽의 10 m 이격 지점은 나무가 많았고, 북쪽의 10 m 이격 지점은 급격한 사면의 끝으로 움푹 들어간 수로 부근이기 때문에 제설제 성분이 집적될 수 있는 조건이 형성되지 못한 이유인 것으로 판단된다. 이와 같은 결과는 고속도로 주변에서 전기비저항 측정으로 제설제의 영향범위를 10 m 이내로 추정한 연구(Lundmark and Olofsson, 2007)의 결과와도 유사하였다.

3.3. 제설제의 확산범위와 토양 유입 후 분포 예측

Table 4는 거즈와 토양에서 분석한 pH, EC, Ca^{2+} , Na^+ , Cl^- 및 Mg^{2+} 의 상관관계수(correlation coefficient)를 산정한 것이다. 거즈의 경우에는 pH를 제외한 여타 항목들의 상관관계수 범위는 0.788~0.991로 양의 상관성이 매우 높았다. EC와 제설제 성분(Ca^{2+} , Na^+ , 및 Cl^-)의 상관관계수 범위는 0.909~0.991로 EC 측정값만으로 제설제 성분의 영향 검토가 가능하였다. 그러므로 비산으로 인한 제설제의 확산범위 추적자로 EC가 적절할 것으로 평가되었다. 그런데 토양은 거즈와 달리 EC, Na^+ 및 Cl^- 에서 상관성이 높았고 이들의 상관관계수는 0.869~0.955로 양의 상관성을 보였다. 토양에서 EC와 상관성이 가장 높은 물질은 Na^+ 이었고 상관관계수가 0.898이었으며, Na^+ 와 상관성이 가장 높은 물질은 Cl^- 로 상관관계수는 0.955이었다. 토양에서 Ca^{2+} 는 Cl^- 및 Mg^{2+} 와 상관관계수가 각각 0.519 및

0.634였다. 그리고 Ca^{2+} 와 Na^+ 의 상관관계수가 0.473으로 Ca^{2+} 와 EC의 상관관계수 0.494와 유사하였다. 결국, 토양에서의 EC는 제설제 성분의 추적자로서 거즈와 같은 신뢰를 주지 못하는 것으로 평가되었다(Pajak et al., 2015). 따라서 제설제 성분의 토양 유입과 이들의 토양 내 분포를 평가하기 위한 지표로서 EC와도 상관성이 높고 제설제 특이적 성분이기도 한 Na^+ 을 활용하는 것이 적절해 보이며 이를 위하여 토양에 유입되어 흡착된 Na^+ 의 양이 온교환용량 점유 정도를 의미하는 나트륨흡착비(SAR)를 활용하는 것은 적절했다고 판단된다.

Fig. 5a는 거즈의 EC 값과 비산에 의한 제설제의 확산 거리 간의 관계를 도출한 것이고 Fig. 5b는 토양의 SAR 값과 제설제의 토양 유입 및 분포 간의 관계를 도출한 것이다. 거즈의 EC 값을 이용한 회귀식의 확산모델은 남쪽과 북쪽에서 각각 $Y=5.0492X^{-0.458}$ 과 $Y=5.2988X^{-0.458}$ 였고, 모델에 의한 확산 가능성은 각각 3,500 m와 507 m까지로 설득력은 각각 0.78 ($R^2=0.6041$)과 0.94($R^2=0.8824$)이었다(Fig. 5a). 확산모델에 의하면 비산의 영향은 남쪽이 약 7배 가까이 큰 것으로 나타났다. 일부 연구는 도로에 살포된 소금의 45%는 도로로부터 100 m 내에 퇴적되거나, 부정적인 영향은 50 m에 제한되며 최대 172 m까지 이동하는 것으로 추정(Lundmark and Olofsson, 2007; Karraker et al., 2008) 하였지만, 본 연구에서의 비산에 의한 확산 거리는 더욱 증가할 수 있음을 보였다.

한편 토양의 SAR 값을 이용한 회귀식의 확산모델은 남쪽과 북쪽에서 각각 $Y=58.1036X^{-1.0197}$ 과 $Y=68.1526X^{-0.9928}$ 였고, 토양에 유입된 제설제의 분포 범위는 각각 4.3 m와 5.3 m까지로 나타났으며 설득력은 각각 0.98($R^2=0.9640$)과 0.96($R^2=0.9122$)이었다(Fig. 5b). 이는 제설제의 비산에 의한 최대 확산 거리 모델링 결과가 남쪽 및 북쪽 각

Table 4. Correlation coefficients of pH, EC, Ca^{2+} , Na^+ , Cl^- , and Mg^{2+} in gauze and soil

Contents		pH	EC	Ca^{2+}	Na^+	Cl^-
Gauze	pH	1				
	EC	-0.258	1			
	Ca^{2+}	-0.237	0.944	1		
	Na^+	-0.217	0.991	0.952	1	
	Cl^-	-0.172	0.909	0.886	0.920	1
	Mg^{2+}	-0.310	0.910	0.917	0.889	0.788
Soil	pH	1				
	EC	0.195	1			
	Ca^{2+}	0.083	0.494	1		
	Na^+	0.192	0.898	0.473	1	
	Cl^-	0.172	0.869	0.519	0.955	1
	Mg^{2+}	-0.185	-0.012	0.634	-0.103	-0.070

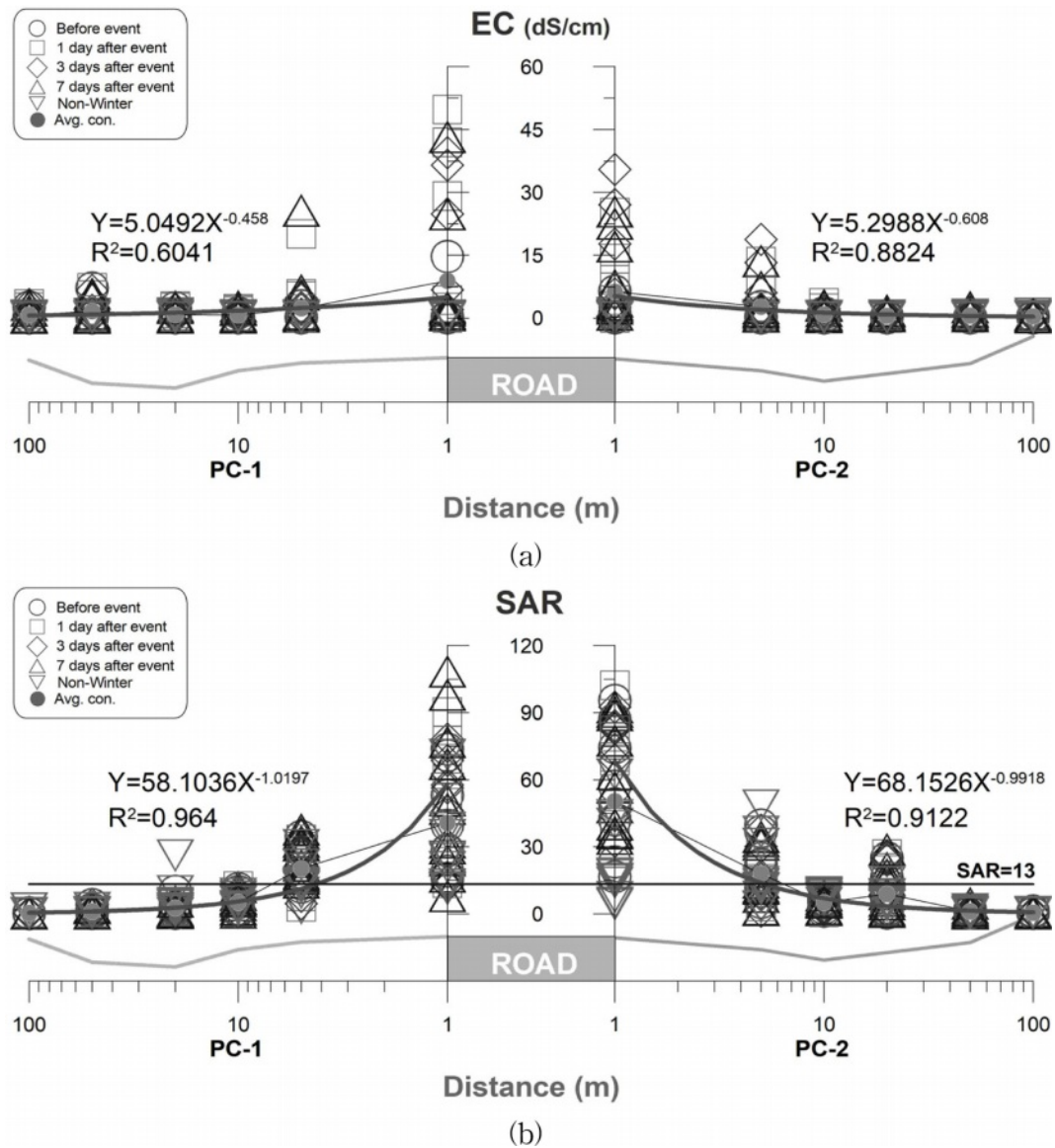


Fig. 5. The estimation of affected range of deicer at the study area. (a) The diffusion distance of deicer through scattering according to EC (electrical conductivity) in gauze and (b) the distribution of deicer elements according to SAR (sodium adsorption ratio) of soil samples.

각 최대 3,500 m와 507 m 인 것과는 다르게 토양에 유입된 제설제 성분은 5.3 m 이내에 주로 집적된다는 것을 보여준다. 이는 토양에 대한 실측값과도 매우 유사한 결과였다.

4. 결 론

비산에 의한 제설제의 확산범위는 고속도로로부터의 제설제 성분이 검출되는 최대거리로 정의하였고, 고속도로의 수직 방향으로 일정 거리를 두고 설치한 거즈에서 제

설제 성분을 확인한 결과, 고속도로로부터 100 m가 떨어진 거리에서 제설제 성분(Ca^{2+} , Na^+ , Cl^-)들이 검출되었다. 그러므로 제설제의 확산범위는 100 m 이상으로 평가하였다. 다만, 거즈에서 검출된 제설제 성분의 농도는 고속도로의 양쪽으로 10 m 지점을 벗어나며 급격히 낮아졌다. 토양에 유입된 제설제 성분의 분포 양상을 확인하고자 제설제 성분 중 Na^+ 의 Ca^{2+} 및 Mg^{2+} 대비 양이온교환용량 점유 정도를 의미하는 나트륨흡착비(SAR)가 13 이상 되는 지역을 토양에 대한 제설제 영향범위로 정의하였다. SAR가 13 이상인 토양시료는 전체시료의 약 29%(162점/

총 564점)이었으며 이들 시료 중에 약 90%(145점/162점)가 고속도로 5 m 이격 거리 이내에 집중되어 있었고 나머지 약 10%(17점/162점) 시료가 20 m 이격 지점에서 발견되었다.

고속도로에 살포된 제설제의 비산에 의한 확산 가능 거리는 100 m 이상으로 나타났지만 토양의 SAR 13 이상으로 제설제 성분 중 Na^+ 이 토양에 유입되어 토양의 물리성을 악화시킬 수 있는 범위는 최대 20 m로 나타났다. 고속도로에 살포된 제설제 성분의 토양 유입에 미치는 요인은 Ca^{2+} , Na^+ , Cl^- 등 성분 자체의 토양 중 거동 특성 외에도 풍향 및 풍속에 의한 비산, 수계나 수로에 영향을 주는 지형 경사, 자동차의 속도 및 교통량, 제설작업, 배수 정도, 영농활동, 이면도로 등 입지 여건에도 많은 영향을 받는 것으로 판단된다. 특히 영농활동 등 갈습이나 염소가 토양개량제나 비료로 투입될 가능성이 있는 지역에서 제설제(염화나트륨) 성분의 분포 및 영향범위를 확인하기 위해서 나트륨흡착비(SAR)를 추적자로 사용하는 방법은 매우 효과적이라고 판단된다.

References

- Aljazzar, T. and Kocher, B., 2016, Monitoring of contaminant input into roadside soil from road runoff and airborne deposition, *Transp. Res. Proc.*, **14**, 2714-2723.
- Blomqvist, G., 2001, De-icing salt and the roadside environment : Air-borne exposure, damage to Norway spruce and system monitoring, *Swedish National Road and Transport Research Institute*, Sweden.
- Brady, N.C. and Weil, R.R., 2014, Elements of the Nature and Properties of Soils, 3rd, Pearson, London, UK.
- Brimblecombe, P., Clegg, S.L., Davies, T.D., Shooter, D., and Tranter, M., 1987, Observations of preferential loss of major ions from melting snow and laboratory ice, *Water Research*, **21**(10), 1279-1286.
- Brookes, P.C., 1995, The use of microbial parameters in monitoring soil pollution by heavy metals, *Biol. Fertil. Soils*, **19**(4), 269-279.
- Bryson, G.M. and Barker, A., 2002, Sodium accumulation in soils and plants along Massachusetts roadsides, *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, **33**(1-2), 67-78.
- Colbeck, S.C., 1981, A simulation of the enrichment of atmospheric pollutants in snow cover runoff, *Water Resources Research*, **17**(5), 1383-1388.
- Cunningham, M.A., Snyder, E., Yonkin, D., Ross, M., and Elsen, T., 2008, Accumulation of deicing salts in soils in an urban environment, *Urban. Ecosyst.*, **11**(1), 17-31.
- Daubenmire, R.F., 1974, Plants and Environment, 3rd, John Wiley and Sons, New York, 47-56 p.
- Gibbs, J.N. and Burdekin, D.A., 1983, De-icing salt and crown damage to London plane, *Arboric. J.*, **7**(3), 227-237.
- Jo, S.Y., 2003, Pre-wetted Salt Spreading, *KSCE J. Civ. Eng.*, **51**(5), 16-19.
- Kang, H.J., Lee, B.D., Lee, J.K., Kang, H.M., and Jang, T.S., 2008, A study on range of effect on roadside with scattering of deicing agent, *Korean society of Environmental Engineers*, KSEE, Ulsan University, 1264-1269.
- KEC (Korean Expressway Corporation), 2021, Korean expressway corporation website <http://www.ex.co.kr>.
- KMA (Korea Meteorological Administration), 2021, KMA weather data service: open MET data portal <https://data.kma.go.kr/resources/html/en/aowdp.html> (Dec. 3th 2021)
- Karraker, N.E., Gibbs, J.P., and Vonesh, J.R., 2008, Impacts of road deicing salt on the demography of vernal pool-breeding amphibians, *Eco. Applic.*, **18**(3), 724-734.
- Kaushal, S.S., Groffman, P.M., Likens, G.E., Belt, K.T., Stack, W.P., Kelly, V.R., Band, L.E., and Fisher, G.T., 2005, Increased salinization of fresh water in the northeastern United States, *PNAS*, **102**(38), 13517-13520.
- Kim, S.H. and Hong, Y.S., 2007, A study on roadside tree vitality by location type: targeting the central park road in Incheon, *Proceedings of the Korean Institute of Landscape Architecture Conference*, Korean Institute of Landscape Architecture, Korea, 9-12.
- Kim, S.H., Sung, J.H., and Cho, J.H., 2012, Growth and Physiological Responses of Ginkgo biloba and Zelkova serrata to Calcium Chloride Treatment. *Proceeding of the Forest Science Conference*, Korean Society of Forest Science, Korea, 236-237.
- Kim, S.-I. and Lee, D.-W., 2014, Effect of chloride-deicers on growth of wheat, barley and spinach. *Korean J. Environ. Agric.*, **33**(4), 350-357.
- Lax, S. and Peterson, E.W., 2009, Characterization of chloride transport in the unsaturated zone near salted road, *Environ. Geol.*, **58**(5), 1041-1049.
- Lee, B.D., Lee, J.K., Kang, H.J., and Lee, M.S., 2007, Effect and Control of Chloride Salt on Concrete Structures and Environment with Different Type of Deicing Agent, ME-07-21, Expressway and Transportation Research Institute, Korea, 471 P.
- Lee, D.-W., 2015, Effect of EFD-1 and PC-10 deicers on growth of wheat, barley and spinach, *Korean J. Environ. Agric.*, **34**(1), 30-37.
- Lundmark, A. and Olofsson, B., 2007, Chloride deposition and

- distribution in soils along a deiced highway – Assessment using different methods of measurement, *Water Air Soil Pollut.*, **182**, 173-185.
- McBratney, A.B. and Webster, R., 1986, Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates, *J. Soil Sci.*, **37**(4), 617-639.
- Morris, E.M. and Thomas, A.G., 1985, Preferential discharge of pollutants during snowmelt in Scotland, *Journal of Glaciology*, **31**(108), 190-193.
- NIER (National Institute of Environmental Research), 2017, Soil Pollution Process Test Standards (National Institute of Environmental Research Notice No. 2017-22, Aug. 11th, 2017 enacted)
- Norrström A.C. and Jacks, G., 1998, Concentration and fractionation of heavy metals in roadside soils receiving de-icing salts, *The Sci. of the Total Environ.*, **218**(2-3), 161-174.
- Novotny, V., 1999, Urban Highway Snowmelt: Minimizing the Impact on Receiving Water, Project 94-IRM-2, Water Environment Research Foundation.
- Oberts, G.L., 1994, Influence of snowmelt dynamics on storm-water runoff quality, *Water Protection Techniques*, **1**(2), 55-61.
- Pan, T., and Miao, T., 2015, Contamination of roadside soils by runoff pollutants: a numerical study, *Transp. Geotech.*, **2**, 1-9.
- Pajak, M., Krzaklewski, W., Duda, K., and Gruba, P., 2015, Spatial and temporal variation in soil salinity as a result of chemical de-icing of road in Krakow, Poland, *Fresenius Environ. Bulletin*, **24**(10a), 3363-3370.
- Pedersen, L.B., Randrup, T.B., and Ingerslev, M., 2000, Effects of road distance and protective measures on deicing NaCl deposition and soil solution chemistry in planted median strips, *J. Arboric.*, **26**(5), 238-245.
- Petter, C.W., 1994, Applied hydrogeology, 3rd, Prentice Hall, New Jersey, 691 p.
- Ramakrishna, D.M. and Viraraghavan, T., 2005, Environmental impact of chemical deicers-a review, *Water, Air, and Soil Pollut.*, **166**, 49-63.
- RDA (Rural Development Administration), 2015, Study on the effects of soil and crop plants by de-icers. Rural Development Administration, 131 p.
- Shin, S.S., Park, S.D., Kim, H.S., and Lee, K.S., 2010, Effects of calcium chloride and eco-friendly deicer on the plant growth, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **32**(5), 487-498.
- USDOT, An evaluation of the impact of highway deicer on Peshastin creek, <https://www.wsdot.wa.gov/research/reports/fullreports/500.1.pdf>, 07/06/2022.
- Viskari, E.-L. and Kärenlampi, L., 2000, Road Scots pine as an indicator of deicing salt use-a comparative study from two consecutive winters, *Water Air Soil Pollut.*, **122**, 405-419.
- Watson, B.L., Bayless, E.R., Buszka, P.M., and Wilson, J.T., 2002, Effects of highway-deicer application on ground-water quality in a part of the calumet aquifer, Northwestern Indiana, *U.S. Geological Survey*, 153 p.
- Wilcox, L.V., 1955, Classification and use of irrigation waters, Circular No. 969, United States Department of Agriculture, Washington, D.C., 21 p.