

# 기상특성에 따른 제설제 사용이 지하수 보존성 이온의 농도변화에 미치는 영향 연구: 공공데이터의 활용과 제언

최한나<sup>1,2</sup> · 한종규<sup>3</sup> · 한수연<sup>3\*</sup><sup>1</sup> 한국지질자원연구원 기후변화대응연구본부<sup>2</sup> 과학기술연합대학원대학교 지질과학<sup>3</sup> 한국지질자원연구원 국토우주지질연구본부

## Influences of Deicing Agent Usage on the Variation of Conservative Ion Concentrations in Groundwater According to Meteorological Characteristics: Suggestions for Public Data Availability

Hanna Choi<sup>1,2</sup>, JongGyu Han<sup>3</sup>, Sooyeon Han<sup>3\*</sup><sup>1</sup>Climate Change Response Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Korea<sup>2</sup>Geological Science, University of Science and Technology, Daejeon 34113, Korea<sup>3</sup>Geology and Space Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Korea

### ABSTRACT

Calcium chloride (CaCl<sub>2</sub>) and industrial sodium chloride (NaCl) are commonly used as deicing agents in Korea, which are expected to release dissolved chloride ions into the road surfaces following their application. This study aimed to comprehensively assess the usage of deicing agents and variations in groundwater quality between 2016 and 2022 by analyzing public data provided by various domestic institutions. Additionally, the study sought to identify factors contributing to deteriorating road conditions by comparing the amount of CaCl<sub>2</sub> applied and the incidence of potholes. Pothole occurrences during the study period were primarily reported during heavy rainfall periods without application of deicing agents. In 2022, chloride ion concentrations in groundwater in the southeastern Korean Peninsula were significantly higher than in previous years, coinciding with severe cold waves and heavy snowfall that resulted in increased deicing agent use. However, further data collection and verification are needed to distinguish between the effects of seawater intrusion and deicing agents. Despite limitations in the completeness and consistency of public data, the research highlighted the urgent need for improved data quality and further field verification to fully understand and mitigate the environmental impacts of deicing agents.

**Key words:** Deicing Agent, Groundwater, Conservative Ion, Pothole, Public Data

### 1. 서 론

전 세계적 기후변화와 함께 장마와 홍수, 가뭄 등 극단적 기상현상의 발생 빈도가 증가하고 있다. 국내에서도 1973년 기상관측망이 전국적으로 확충된 이후부터 현재까지 연평균 기온, 최고 및 최저기온이 꾸준히 증가하며 온난화가 진행되는

것으로 보고되고 있다(NIMS, 2018; KMA, 2024). 기상청의 발표에 의하면, 1991년~2020년 사이 30년의 누년평균값을 사용해 제시되는 기후평년값은 2000년대에 들어서며 약 40 mm 이상의 연 강수량 상승이 관측되었다(KMA, 2024). 국내 강수량은 연 강수량의 50% 이상이 집중되는 여름철(6월~8월) 강우 일수 및 강도에 의해 결정된다. 기온 및 강수량에서 상승 추세를 보이는 기상 특성에 비해, 겨울철 강수량은 연도별 및 지역별로 크게 차이를 보여 기상 예측이 어려워지고 있다(Kim, 2021).

겨울철(12월~2월) 연평균 기온은 기상관측망 확충 이후부터 꾸준히 상승하고 있으나, 북극 대기순환 이상 변동의 영향으로

주저자: 최한나, 선임연구원

공저자: 한종규, 책임연구원

\*교신저자: 한수연, 선임연구원

Email: syhan@kigam.re.kr

Received : 2024. 07. 25 Reviewed : 2024. 08. 05

Accepted : 2024. 08. 19 Discussion until : 2024. 10. 31

온난 시기와 한랭 시기 기온변동이 불규칙하게 나타나고 있다(Lim and Kim, 2016; Park and Ahn, 2016). 그 가운데, 평년보다 이른 추위와 오랜 한파는 북극진동(arctic oscillation 또는 polar vortex)과 우랄블로킹(ural blocking)으로 설명된다(Lim and Kim, 2016; He et al., 2017). 북극진동은 대기의 온도변화에 따라 차가운 공기 소용돌이가 강약을 되풀이하며 중위도와 고위도 사이를 이동하는 현상으로, 한국에서는 삼한사온(三寒四溫)으로 나타난다. 온난화로 북극의 공기가 따뜻해지면 북극 대기와 중위도 대기의 온도 차가 작아지고 제트기류의 힘이 약해져 한파가 남하하게 된다. 기상학적으로 특정 지역에 발생한 고기압의 영향에 의해 저기압의 진행경로가 방해받거나 역행되는 것이 일주일 이상 지속되는 경우 블로킹(blocking)이라 한다(He et al., 2017). 러시아 우랄산맥 인근에서 형성된 상층고기압(우랄 블로킹)에 의해 찬 공기가 계속 주입되거나, 혹은 오토츠크해 고기압에 가로막혀 한반도에 장기간 머무르는 것(오토츠크 블로킹)이 최근 관측되는 강한 한파의 원인으로 지목되고 있다(Lim and Kim, 2016).

북극의 한랭한 공기가 한반도 상공에 머무르는 동안, 저층 편서풍 대로부터 온난 습윤한 공기가 공급되면 폭설과 한파가 번갈아 발생하여 겨울철 교통정체를 일으키기도 한다. 2020년 연간 누적 강수량은 1629.9 mm로 전년도에 비해 445.5 mm 증가하였으며, 제설제인 염화칼슘 사용량은 2019년 총 6만 1,500 톤에서, 2020년 폭설 등으로 인해 15만 7,800 톤으로 급증한 것으로 보고되었다(KEC, 2024; KMA, 2024). 기상청 관측자료에 따르면 겨울철 강수량은 1973년 이후부터 현재까지 감소하는 추세를 보이지만, 2010년 들어서는 서리일수와 한랭일수가 증가하는 등 계절에 따른 온도 및 강수량의 차이가 커지고 있다(NIMS, 2018). 한랭시기 강설에 대비한 도로안전을 위해 국내에서 주로 사용되는 제설제(용빙제)는 염화칼슘( $\text{CaCl}_2$ ), 공업용 염화나트륨( $\text{NaCl}$ ), 친환경제설제(저염화물 제설제로 분류되는 CMA, Calcium Magnesium Acetate; CMO, Calcium Magnesium Salt of Organic Acids; 유기산 제설제로 분류되는 EFD, Eco-Friendly Deicer)가 있다(Seo and Park, 2016). 2010년 들어 친환경제설제의 사용이 증가하고 있지만, 높은 비용과 제설 성능의 감소, 물량확보의 어려움 등을 이유로, 여전히 많은 지역에서  $\text{CaCl}_2$ 과  $\text{NaCl}$ 을 혼합하여 사용하고 있다. 그에 비해, 미국이나 일본에서는 공업용  $\text{NaCl}$ 이 주성분으로 쓰이는데 해당 제설제는 모두 염화물계에 해당한다(Heo and Lee, 2017). 용존 염소이온은 토양 및 지하수 환경에서 산화·환원반응에 기여하지 않으며 용질복합체를 형성하지 않는 보존성(비반응성) 특성을 가져, 다른 수체와의 혼합 추적 혹은 오염도 판별에

유용하게 활용된다(Mullaney et al., 2009). 자연계에서 염소이온은 대체로 증발암과 같은 퇴적암으로부터 유입되며, 일부는 소달라이트( $\text{Na}_8(\text{Cl}_2(\text{AlSiO}_4)_6)$ )나 인회석( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{F}, \text{Cl})$ )과 같은 변성암으로부터 용탈되어 수체로 유입되는 것으로 알려져 있다(Hem, 1985). 따라서, 해안지역 혹은 증발암이 다수 존재하는 지역을 제외하고 자연수체에 용존하는 염소이온은 황산염 혹은 탄산염보다 낮은 농도로 존재하는 것으로 알려져 있다(Hem, 1985). 따라서 이 연구에서는 겨울철 제설제의 사용이 지하수 수질에 미치는 영향을 이해하기 위해 공공데이터를 수집하여 제설제의 주요 성분인 염소이온의 연도별, 지역별 농도변화를 관찰하였다. 겨울철 기온 강하, 폭설의 예보 및 발생은 제설제 사용량을 증가시키고, 제설제 성분은 도로 포트홀 발생을 촉진(Lee et al., 2005; Lee and Lee, 2007; Seo and Park, 2016)하며, 장기적으로는 지하수 수질 변화를 일으킬 수 있다. 이에 근거해 다양한 외부적 요인을 고려하여 현행 제설제의 활용과 연계한 연도별 지하수 수질 변화 특성을 해석하고자 한다. 또한, 이 연구에서 시범적으로 시도한 공공데이터를 활용한 연구가 가지는 의미와 한계에 대하여 토의하고자 한다.

## 2. 자료수집 방법 및 특성

공공데이터 활용은 공공기관이 보유하고 있는 방대한 양의 일부 데이터를 디지털 시대의 변화에 맞추어 대중에게 개방하고 데이터를 관리·분석하여 편의성을 높이고자 시작되었다. 우리나라는 공공데이터법(공공데이터의 제공 및 이용 활성화에 관한 법률)의 제정과 정보공개법(공공기관의 정보공개에 관한 법률)을 개정하여 공공부문 데이터 개방의 제도적 토대를 마련하고 공공부문의 디지털 변화와 혁신을 도모하고자 하였다(Kim, 2017). 2020년부터 데이터 댐 사업을 통해 디지털 전환을 선도하고자 하는 노력이 국가적 차원에서 기울여지고 있으나, 개방된 데이터의 표현 방식, 데이터 간 일관성, 데이터의 완전성이 미흡하여 데이터 품질 향상에 대한 요구가 지속적으로 제기되고 있다(Kim, 2020). 국내의 공공데이터는 가용성 측면에서 제공량이 꾸준히 증가하고 있으나, 국가중점데이터는 제공 기관 수와 제공 분야가 매우 한정되어 있어 적극적인 개방과 함께 데이터 활용 및 품질관리에 방안이 필요하다(Kim, 2017; Yun and Hyun, 2019; Kim, 2020).

이 연구는 국내 여러 공공기관에서 제공하는 공공데이터를 활용하여 2016년부터 2022년 사이 제설제의 사용과 지하수 수질 변화 특성을 종합적으로 판단하고자 하였다. 연구기간을 2016년부터 설정한 이유는 2010년대 중반부터 연간 서리일수

증가, 이례적 한파와 폭설, 겨울철 가뭄이 관찰되는 등 기후변화 특성이 점차 뚜렷하게 관찰되기 때문이다(NIMS, 2018; KMA, 2024). 이를 위해 연구기간의 기상자료, 지하수 이용량과 수질 측정자료, 인구밀도, 도로 유형별 제설제 사용량, 포트홀 발생 건수 등의 공공데이터를 기상청, 한국도로공사, 국가통계포털, 공공데이터포털 사이트 등에서 수집하였다. 이에 추가하여, 공공기관 정보공개청구 절차를 거쳐 국토교통부와 행정안전부의 협조를 통해 제설제 살포량과 포트홀 발생 건수 자료를 획득하였다.

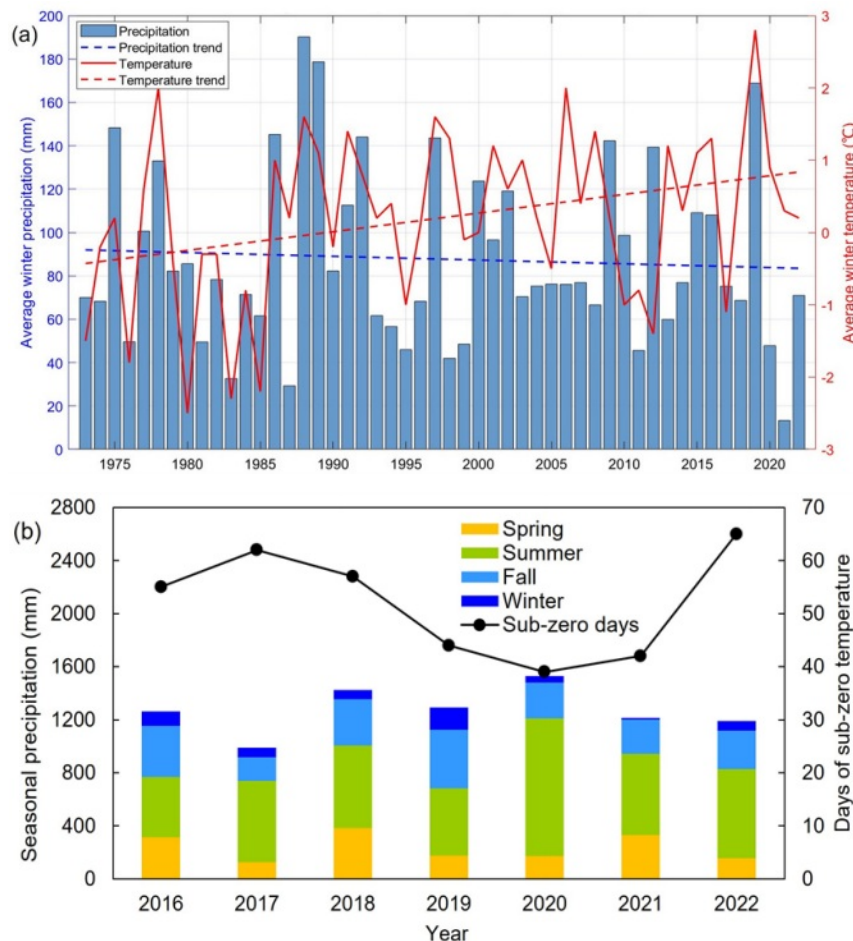
### 3. 결과 및 토의

#### 3.1. 국내 겨울철 기후 특성

기상청 날씨누리에서 제공되는 과거관측 공공데이터를 활용하여 국내 겨울철 기상자료 특성을 분석한 결과, 기상관측망이 확충된 1973년부터 2022년의 강수량은 지속적으로

감소하는 추세를 보이나, 강수량 변동 폭은 연도별로 큰 차이를 보였다(Fig. 1(a)). 예를 들어, 2019년 겨울철 강수량은 168.8 mm로 2000년대 들어 가장 높게 관측되었으나, 바로 다음 해인 2020년은 47.8 mm로 강수량이 크게 감소하였다. 2021년의 겨울철 강수량은 평년강수량(1991년~2020년)의 14.7%인 13.3 mm로 기상관측망 확충 이후 최저치로 기록되었다(Fig. 1(a)). Fig. 1(b)는 서울 관측소에서 보고된 2016년부터 2022년 사이 연간 강수량 및 해당연도 영하일수 그래프이다. 강수량은 계절별로 나누어 도시하였으며, 서울 관측소와 국내 겨울철 강수량의 증감은 동일한 추세를 보인다. 그에 비해, 연간 강수량은 겨울철 강수량 증감과 유의미한 관계를 보이지 않으며, 오히려 여름철 강수량에 의해 총량이 결정되는 것으로 판단된다. 서울 관측소에서 보고된 영하일수는 2019년~2021년 사이 40일 내외였으나, 2022년에는 영하일수가 65일로 크게 상승한 것으로 관측되었다(Fig. 1(b)).

Table 1은 국내 행정구역별 한파일수와 강설(눈)일수를



**Fig. 1.** Winter precipitation and temperature trends from 1973 to 2022 with dotted trend lines for each factor (a). Seasonal precipitation and the number of sub-zero days at the Seoul observatory from 2016 to 2022 (b).

보여주고 있다. 관측소의 위치는 한파 및 강설을 함께 관측하는 지점을 중심으로 선정하였으며, 공통지점이 있는 경우 인구가 더 많은 지점의 관측값을 제시하였다. 강설일수는 눈을 포함한 진눈깨비, 눈보라 등 강설과 강수가 섞여 내리는 것까지 포함한 기상현상을 목측관찰(目測觀察)하여 제공되며, 한파일수는 아침(오전3시~9시) 최저기온이 영하 12°C 이하인 날의 수를 의미한다. Table 1의 괄호 안 숫자는 한파일수를 의미한다. 기상관측망의 전국적 추세를 비교하면, 2018년은 한파가 가장 많이 관측되었으며, 뒤이어 2021년의 한파일수가 많은 것으로 나타났다. 그에 비해, 제설제 살포량과 직접적으로 연관이 있는 강설 관측일수는 2022년 가장 많았으며, 2018년 중남부 지역을 중심으로 다수의 강설일수가 기록되었다. 앞서 서술한 바와 같이, 기후변화로 인해 겨울철 평균기온은 상승하고 있으나, 주변 대기 흐름을 막는 고기압의 블로킹과 강수량의 편차는 국지적 한파 및 폭설을 발생시키는 것으로 보고되고 있다(Lim and Kim, 2016; Park and Ahn, 2016). 한파와 폭설이 이어지면 제설제의 살포 역시 증가하게 되며, 이는 물리·화학적으로 도로의 포장상태에 영향을 미칠 수 있다.

### 3.2. 지역 및 연도별 제설제 사용량 변화

제설제(deicer)는 도로에 쌓이는 눈의 어는점을 낮춰

녹이는 물질로 그 종류는 염화물계와 비염화물계로 나뉘는데, 염화물계는 NaCl, CaCl<sub>2</sub>, MgCl<sub>2</sub>(염화마그네슘) 등이 대표적으로 쓰이고, 비염화물계는 복합유기산염 등이 있다(Cho et al., 2022). 한국에서는 1969년부터 CaCl<sub>2</sub> 제설제를 쓰기 시작했으며, 결빙 억제와 제설 효과 상생을 위해 2001년까지 CaCl<sub>2</sub>와 모래를 혼합한 제설제를 사용하였다(KMA, 2024). 마찰제로써 모래의 사용은 도로 손상 문제 이외에도, 모래의 수거 및 폐모래 처리 비용 등의 단점이 있어, 2002년부터는 CaCl<sub>2</sub>와 NaCl을 혼합한 용액 살포방식(습염방식)이 전국 고속도로에 사용되고 있다(Jo, 2003). 고체형태 제설제는 차량의 고속주행이 이뤄질수록 도로 밖으로 많은 양이 유출되어 제설 효과를 감소시킨다. 그에 비해, 습염방식 제설제 살포는 CaCl<sub>2</sub>만을 살포하는 것보다 용빙속도가 느리지만 제설제의 유출이 거의 없어 지속성이 높다는 강점이 있다(Sin et al., 2010). 이런 이유로, 고속도로에 선제적으로 적용하던 습염식 제설제 살포 방식이 2005년 서울시를 시작으로 전국 지자체에 확산 및 적용되고 있다.

Fig. 2는 2016년 11월부터 2022년 3월 사이 고속도로와 일반국도의 제설제 살포량을 보여주는 그래프다. 제설제는 도로 안전을 위해 기온 강하가 관찰되는 시기부터 살포되므로, 국내에서 겨울(12월~2월, 기상청 날씨누리 참고)로 구분되는

**Table 1.** Number of snowfall days and freezing days which indicated in parentheses by administrative regions in Korea. Minus mark denotes missing data

	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Seoul	21 (5)	29 (3)	24 (11)	24 (0)	21 (2)	24 (8)	31 (4)
Busan	3 (0)	2 (0)	4 (0)	2 (0)	1 (0)	2 (1)	2 (0)
Daegu	9 (3)	9 (0)	15 (7)	3 (0)	5 (0)	11 (5)	11 (3)
Incheon	20 (3)	32 (0)	21 (7)	20 (0)	20 (0)	26 (5)	29 (3)
Gwangju	25 (0)	28 (0)	31 (0)	14 (0)	15 (0)	23 (1)	27 (0)
Daejeon	27 (3)	29 (0)	29 (9)	15 (0)	21 (1)	34 (6)	33 (1)
Ulsan	2 (0)	3 (0)	11 (1)	3 (0)	3 (0)	6 (1)	4 (0)
Gyeonggi (Suwon)	28 (4)	30 (2)	21 (11)	23 (0)	20 (1)	25 (9)	32 (6)
Gangwon (Buk-Gangneung)	15 (2)	8 (0)	17 (6)	7 (0)	10 (0)	15 (6)	11 (0)
Chungbuk (Cheongju)	24 (4)	31 (0)	30 (6)	22 (0)	21 (1)	30 (5)	32 (1)
Chungnam (Hongseong)	- (0)	- (0)	30 (16)	20 (0)	28 (1)	31 (5)	39 (5)
Jeonbuk (Jeonju)	25 (2)	31 (0)	25 (5)	14 (0)	21 (0)	26 (3)	30 (0)
Jeonnam (Yeosu)	12 (-)	9 (-)	8 (-)	1 (-)	7 (-)	14 (-)	13 (-)
Gyeongbuk (Pohang)	5 (1)	5 (0)	8 (4)	2 (0)	4 (0)	6 (1)	4 (0)
Gyeongnam (Changwon)	4 (1)	3 (0)	3 (1)	1 (0)	3 (0)	3 (2)	4 (0)



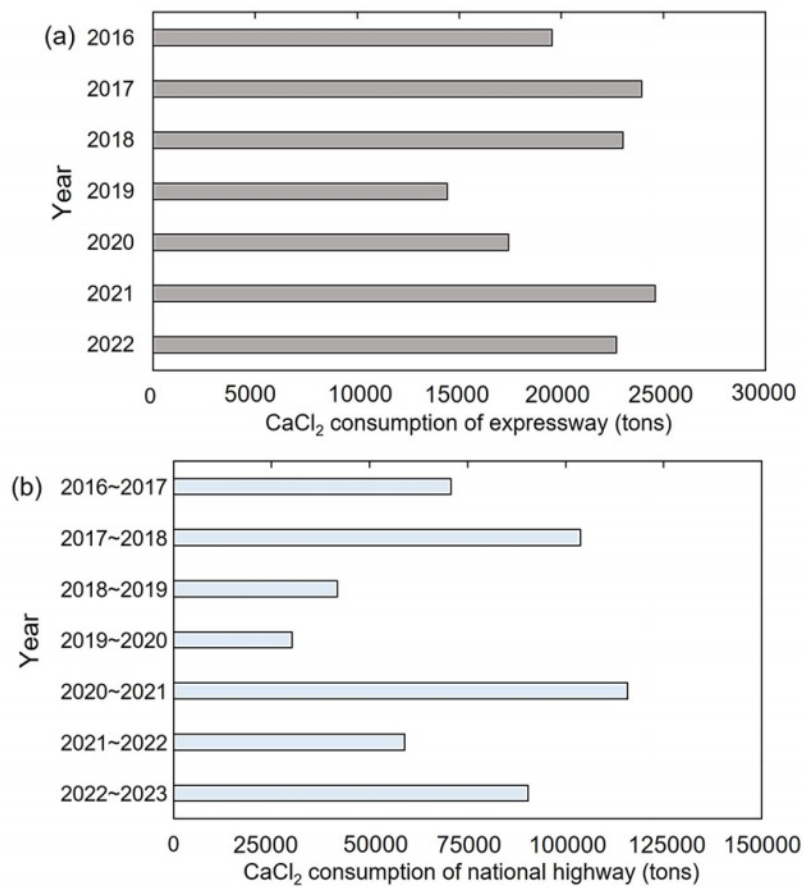


Fig. 2. Amount of calcium chloride (CaCl<sub>2</sub>) consumption on expressways (a) and national highways (b).

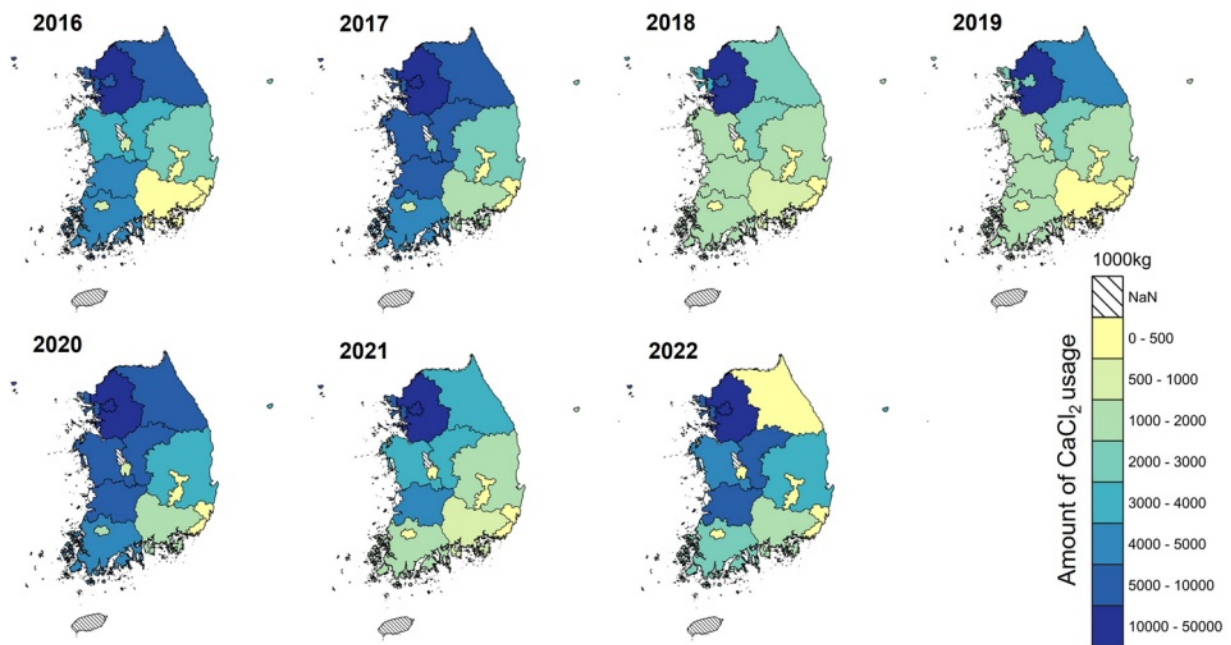


Fig. 3. Amount of CaCl<sub>2</sub> usage by administrative region from 2016 to 2022.

시기의 앞뒤로 한 달씩 더하여 11월부터 이듬해 3월 사이에 걸쳐 살포된 자료가 사용되었다. 이 외의 시기에는 한국도로공사 교통센터 모니터링을 통해 필요한 경우에 한하여 고속도로 제설이 이뤄진다. 2021년 기준 국내 도로 총연장은 113,405 km이며, 그 가운데 시도·군도·구도의 비중은 62.5%, 일반국도·특별광역시도·지방도가 33.2%를 차지한다. 지역별 도로 연장을 비교하면, 경기지역이 14,813 km로 가장 길었으며, 뒤를 이어 경북(13,645 km), 경남(12,847 km)인 것으로 조사되었다. 고속도로의 비율은 국내 총 도로비중의 약 4.3%로 매우 작은 면적을 가지고 있다 (KOSIS, 2024). 그러나 고속주행이 이뤄지는 관계로 안전을 위해  $\text{CaCl}_2$ 를 꾸준히 살포하기 때문에, 연구기간 동안 약 14,000 톤~25,000 톤에 달하는  $\text{CaCl}_2$ 를 살포한 것으로 조사되었다(Fig. 2(a)). 이는 전국의 도로 대부분을 관할하고 있는 지방자치 단체의  $\text{CaCl}_2$  사용량 보고자료와 비교하였을 때(Fig. 2(b)), 지방도로 전체  $\text{CaCl}_2$  사용량의 15%~55%에 해당하는 양이다. 다만, 한국도로공사에서 제공되는  $\text{CaCl}_2$  사용량은 연도별로 구분되어 있는 것에 비해, 행정안전부에서 제공한 행정구역별 사용량은 동절기로 조사되어 11월~3월이 걸쳐있는 두 개 연도 자료가 제공된다. 이와 같이 겨울철 구분 시기,  $\text{CaCl}_2$  사용 시기 등 공공기관별로 제공되는 자료의 형태가 달라, 공공데이터의 활용 다양성을 높이기 위해서는 장기적으로 데이터 제공 형식의 통일성이 필요하다고 판단된다.

Fig. 3은 행정안전부의 정보공개청구 자료를 활용하여 2016년부터 2022년 사이 행정구역별로 살포한  $\text{CaCl}_2$  총량을 제시한 그림으로, 살포량이 많을수록 진한 파란색으로 표시하였다. 국토 최남부의 제주도는 온난한 해양지역으로 내륙과 기후 및 제설제 살포 특성이 구별되고, 행정도시로 활발히 개발 중인 세종시는 장기적 변화 해석을 위해 자료의 축적이 더 필요하다는 점에서 연구에서 제외하였다. 연구기간 전체에 걸쳐 경기도의  $\text{CaCl}_2$  살포량은 최대 수준으로 나타났다. 이는, 국내에서 가장 많은 인구가 거주하는 지역이기 때문에 다수의 차량 이용과 도로 이용자들의 도로안전 민원에 의한 것으로 판단된다(KOSIS, 2024). 한편, 한파 및 폭설이 다수 보고된 2018년을 비롯하여, 2019년, 2021년의 행정구역별  $\text{CaCl}_2$  사용량은 전국적으로 다소 낮은 편으로 조사되었다. 기상청 날씨 이슈별 데이터와 행정안전부의 제설제 사용량이 일치하지 않는 이유는,  $\text{CaCl}_2$  이외에도 습염식 제설작업에 함께 활용한  $\text{NaCl}$ 과 모래, 친환경제설제의 비율이 미반영되었기 때문으로 여겨진다. 이와 동일하게, 행정안전부에서 제공한 제설제( $\text{CaCl}_2$ ) 통계에서 2022년 강원도의 겨울철  $\text{CaCl}_2$  사용량은 0 톤으로 보고되어 시도별 정확한 사용량이

집계되지 않은 것으로 판단된다. 즉, 현재 국내 공공기관에서 제공되고 있는 데이터를 활용하기 위해서는 행정구역별 수집자료에 대한 재검증이 필요하다는 한계가 존재하였다. 반면, 공공데이터포털에서 제공하는 시군구별 제설제 사용량 현황을 살펴보면 연구기간 동안 경기도에서 살포한  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{NaCl}$ , 친환경제설제의 사용량이 대체로 비슷한 것으로 조사되었다(PDP, 2024). 강원도의 경우, 원주본소, 강릉지소, 태백지소, 북부지소 4개 구역의 전체 제설제 사용량의 약 85% 이상이  $\text{NaCl}$ 이었으며, 원주본소에서는 약 97% 이상의 제설제로  $\text{NaCl}$ 을 사용하였다. 또한, 최근 들어 제설제 사용량이 급증하여 2018년 약 12,600 톤, 2019년 약 25,800 톤, 2020년 약 42,400 톤의 제설제를 살포한 것으로 조사되었다. 강설의 증가와 제설제 살포량의 증가추세는 염소이온의 방출량 증가로 도로 상태와 지하수 수질에 상당한 영향을 미칠 것으로 판단되며, 인구가 많을수록 제설제 살포량이 증가한 것으로 여겨진다.

### 3.3. 포트홀 발생 기작과 계절별 발생량

포트홀은 도로나 교량의 표층 및 기층에서 발생한 균열 부위에 물의 침투와 결빙작용, 혹은 차량의 움직임에 의해 손상이 진행되어 나타나는 구멍으로, 외부 생성 요인이 제거되지 않으면 균열을 따라 커질 수 있다. 포트홀의 발생원인은 크게 아스팔트 품질(배합설계, 숙련도, 온도관리, 보수재 품질 등), 시공상 문제(아스콘 두께, 이물질 혼입, 부실시공 등), 유지관리 문제(재파손, 보수시기 초과, 도로수명 한계 등), 기후변화(집중호우, 폭설,  $\text{CaCl}_2$  사용 등), 제도의 미비(KS 품질기준 미흡제품 사용, 하자기간 및 감리의 미흡 등)가 주요 원인으로 논의되고 있다(Choi et al., 2014). 도로포장에 많이 쓰이는 아스콘(아스팔트 콘크리트, Hot Mix Asphalt)의 아스팔트 성분이 수분에 취약하기 때문에, 집중호우 혹은 장마 시기 아스콘의 접착력이 감소하고 자갈과 모래 등의 골재들이 떨어져 구멍이 생긴다(Choi et al., 2014). 교통량에 따른 피로균열과 전단응력(shear stress)이 아스콘 표층 및 하부에 가해지며 형성된 균열 사이로 눈과 비가 들어가 포트홀이 발생하는데, 그보다 많이 발생하는 것이 재시공 위치의 포트홀이다(Park et al., 2014). 콘크리트 구조물 위에 아스콘을 덧씌우거나, 노후포장 위에 아스콘 보수공사를 한 경우 내구성이 부족하여 재탈락이 일어나고 파손범위가 더 커지는 문제가 제기되고 있다(Park et al., 2014).

염화물계 제설제를 살포하면 반복적으로 동결융해가 발생하여 아스콘과 콘크리트 포장재의 박리가 발생할 수 있고, 도로 내장재의 부식과 알칼리 골재반응 등의 열화손상이 일어날 수 있다(이병덕 외, 2005; Lee and Lee, 2007). 염화물계 제설제에

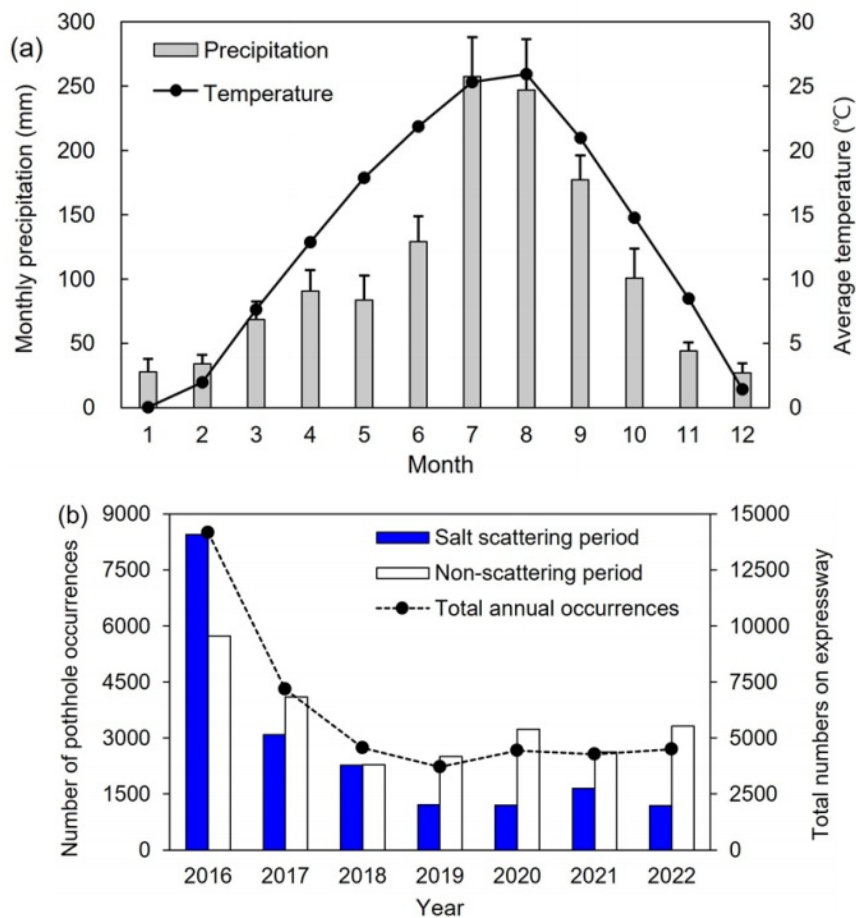
의해 화학적으로 도로표면 박리가 일어나는 대표적 메커니즘은 다음 식 (1)과 같다.



매년 동절기에 살포되는 제설제의 염화물이 콘크리트 부재 속에 축적되다가 임계치를 넘어서면 열화가 가속될 수 있으며, 이러한 염해는 콘크리트 조직의 변형뿐 아니라 구조물 내 강재의 부식을 유발한다는 중요한 문제가 있다(KEC, 2002; Lee et al., 2005).



철근의 부식반응에 따라 산화반응(anodic reaction)에 해당하는 식 (2)와 환원반응(cathodic reaction)에 해당하는 식 (3)이 조합되어, 식 (4)와 같은 수산화 제1철이 철 표면에 석출된다. 이는 용존산소와 반응하여 수산화 제2철로 산화하고, 이후에는 물을 잃어  $\text{FeOOH}$  또는  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 의 붉은 녹이 되거나, 산화불충분 상태로  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 가 되어 철근 표면에 녹 층을 형성한다. 콘크리트 내 철근이 부식하여 생성된 녹(rust)은 원래 체적의 3배에서 8배까지 팽창하고, 팽창압에 의해 피복 콘크리트의 균열이 발생한다. 균열을 따라 산소와 수분의 공급이 용이해져 철근의 부식이 촉진되고 균열이 점차 커져, 콘크리트와 철근의 부착성이 저하되며 구조물의 성능이 떨어지게 된다. 이런 이유로 강설사건 전후로 살포되는 제설제의 양이 증가하면 도로파손의 증가 및 구조물의 안전성이 저하되고, 균열을 따라 침투한 염화물과 콘크리트 용출성분이 토양 및 지하수에 유입되어 토양 배수능 및 지하수 수질저하 등의 영향을 미칠 가능성이 높아진다(Choi et al., 2024).



**Fig. 4.** Average monthly precipitation with error bars and average monthly temperature from 2016 to 2022 (a). Reported pothole occurrences during periods of deicing agent application versus non-application periods. The annual total numbers on the expressway are presented by dotted line (b).

겨울철 고속도로는 강설 및 노면결빙 관리를 위해 제설제가 지속적으로 살포되며, 한국도로공사에서 일원적인 관리가 이루어지기 때문에 제설제 살포량과 포트홀 발생건수를 비교하기에 적합하다고 판단되었다. Fig. 4(a)는 연구기간의 국내 평균 월강수량과 월평균기온을 나타낸 것으로, 국내 강수의 절반 이상은 6월에서 9월 사이에 집중되어 있다. 해당 시기의 기상청 자료를 참고하면, 이상기후로 인해 국지성 폭우가 상당히 빈번하게 발생하는 것으로 보고되고 있다. 12월부터 다음 해 2월까지의 5도 이하의 온도가 평균적으로 유지되는 경도추위가 이어지며 강수에 의한 도로의 결빙이 발생할 가능성이 높다. Fig. 4(b)는 고속도로의 연도별 포트홀 발생건수를 제설제 살포시기(11월~3월)와 비살포시기(2월~10월)로 나누어 표시한 그래프다. 제설제 살포 시기별 포트홀 발생건수를 비교하면, 2016년을 제외하고는 제설제 비살포 시기에 포트홀이 더 많이 발생하는 것으로 보고되었다. 이에 대해서는, 제설제 비살포 기간이 살포기간에 비해 더 길고, 연차가 증가할수록 도로의 노후화가 진행된다는 것을 고려해야 할 것이다. 해당 시기의 시기 포트홀 발생은 강수집중 시기인 6월~9월 사이 다수 발생해, 수분에 약한 아스콘의 자재 결합력 저하가 원인으로 작용할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 전체 연구시기를 비교해 보면 포트홀 발생량의 감소가 뚜렷하게 관찰되며, 이는 2013년부터 국토교통부에서 도로포장 개선 및 품질관리를 적극적으로 시행하는 것과 관련이 있다고 판단된다(Choi et al., 2014). 다수의 연구자들이 제시한 제설제와 도로포장의 상관성에 근거하였을 때(KEC, 2002; Lee et al., 2005; Lee and Lee, 2007), 가장 많은 포트홀 발생이 보고되었던 2016년은 제설제 살포 시기인 12월~3월 사이에 약 1,000건이 넘는 포트홀이 발생하였으며, 이에 근거해 제설제의 염성분과 도로포장재 성능저하 사이에 상관성이 있다고 판단된다(Table 2).

### 3.4. 제설제의 사용과 지하수 수질 비교

#### 3.4.1. 생활 인프라와 지하수의 사용량 비교

지역별 인구(전체인구 및 인구밀도)는 생활 인프라 유지에 위한 제설제 살포, 지하수 이용량 차이 등에 영향을 미쳐 토양·지하수 환경에 유입되는 염소이온 농도와 연관성이 있을 것으로 판단하였다. Fig. 5(a)에 도시된 것과 같이 지역별 인구밀도를 살펴보면, 2022년 한국의 인구밀도는 서울에서 가장 높고(15,560 명/km<sup>2</sup>), 그 다음으로 부산이 높게 나타났다(4,273 명/km<sup>2</sup>). 행정구역별 거주 인구수는 경기도가 가장 높게 나타나지만, 지역 면적이 넓고 상주인구의 지역별 편차가 커 인구밀도는 타 행정구역에 비하면 낮은 편에 속한다(KOSIS,

2024).

Fig. 5(b)는 2016년에 대비한 2022년 전국 지하수 이용량 변동추이를 나타낸 것으로, 인천을 제외한 모든 지역의 지하수 이용량이 감소한 것으로 조사되었다. 절대적인 사용량의 감소는 전남, 경북, 전북, 경기의 순으로 나타났으나, 그림에 나타난 상대적 사용량의 감소는 울산이 약 44%로 가장 높게 나타났다. 울산은 2014년 기준 약 75%의 활용도로 생활용수로써 지하수를 가장 많이 활용하였는데 상수도 공급망이 확충됨에 따라 지하수 이용량이 감소한 것으로 사료된다(MyWater, 2024). 그 뒤를 이어, 전남 40%, 경북과 전북이 각각 37%로 지하수 이용량이 감소한 것으로 나타났다. 이들 지역에서는 상수도 공급망 확충, 인구감소, 농업시설의 고도화에 따른 지하수 이용량 감소 등이 반영된 것으로 판단된다.

한편, 인천은 다른 행정구역과 마찬가지로 지하수 이용량이 감소하였으나, 2019년 이후 사용량이 매우 크게 상승하여 2022년 기준으로 서울의 3배 이상, 부산의 약 2배에 달하는 지하수를 사용한 것으로 보고되었다. Fig. 5(b)의 오른쪽 막대그래프에 나타난 것처럼, 인천의 용도별 지하수는 생활용, 공업용, 기타용수의 사용량이 거의 일정하게 유지되는 것에 비해, 농·어업용수 이용량이 2016년에 비해 약 74% 증가한 것으로 조사되었다. 이는 인천에서 적극적으로 도입하고 있는 도서지역 지하담 건설, 유출 지하수 재활용, 레저 및 어업용 지하수 이용량 증가 등(MyWater, 2024) 지하수 활용의 다양화와 연관되어 있다고 판단된다. 인구밀도와 지하수 이용량은 직접적 관계가 보이지 않으나, 인구가 많을수록 필요 수자원의 증가와 겨울철 제설제 살포량이 높아지는 것으로 여겨지며, 이는 지하수 수질 영향인자로써 작용할 가능성이 있다고 판단된다.

#### 3.4.2. 연도별 염소이온 분포 특성

국내 다수의 행정구역에서는 겨울철 살포한 제설제 잔류물을 제거하기 위해 2월부터 3월 사이 도로의 물청소를 수행하고 있다. 물에 용해된 CaCl<sub>2</sub> 및 NaCl과 반응한 퇴적물은 응집력이 약화되어 염화이온의 토양 및 대수층 침투가 더욱 쉽게 발생할 수 있다(Lee et al., 2004; Choi et al., 2024). 용존 염소이온은 퇴적물로부터 용탈된 중금속과 반응하여 화합물을 형성하고, 중금속의 이동성(mobility)을 상승시켜 수질을 크게 악화시킬 수 있다. 해외사례에서도 프랑스의 A11 고속도로 인근 지표수는 겨울철 염소이온 농도가 약 1,000 mg/L까지 상승하였으며, 캐나다 토론토 지역 겨울철 지하수의 염소이온 농도는 1,390 mg/L로 높게 나타난 것이 조사되었다(Lee et al., 2004).

칼슘과 염소의 화합물인 CaCl<sub>2</sub>는 고체에서 액체로 변화하며



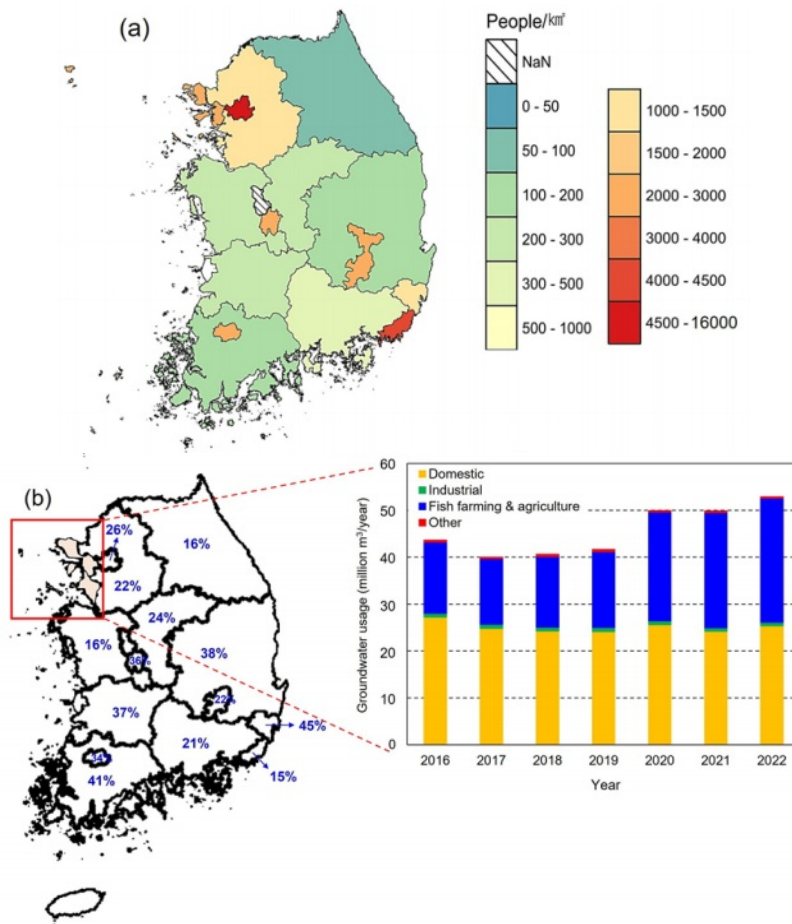
**Table 2.** Monthly pothole occurrences on highways from 2016 to 2022. This modified data was originally provided by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport

	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
January	2,462	603	639	172	274	367	194
February	2,344	945	438	140	266	338	263
March	1,572	1,015	957	196	396	577	344
April	893	803	552	158	219	388	325
May	843	716	449	155	317	403	236
June	691	603	389	209	449	356	352
July	905	564	264	525	884	452	460
August	893	818	282	400	939	435	1389
September	714	364	197	569	326	368	343
October	791	233	147	487	106	230	212
November	997	297	122	385	140	208	193
December	1,074	228	117	321	124	163	198

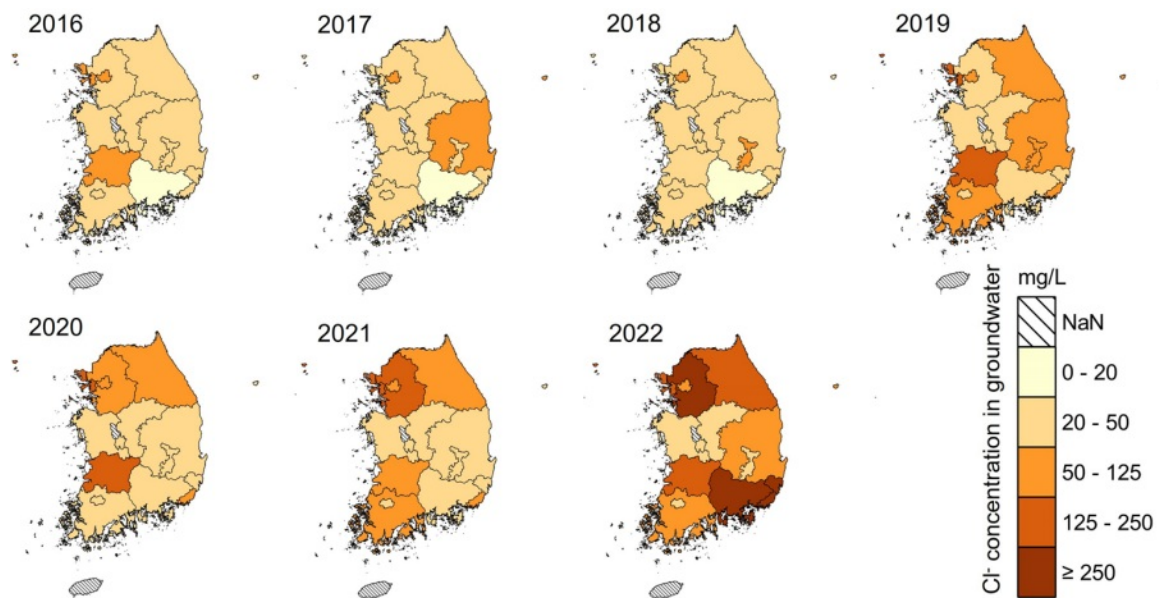
용 해열을 발산하므로 눈이 쌓이기 전에 살포하는 것이 효과적이며, 결빙 이후  $\text{CaCl}_2$ 를 살포하면 결빙 전보다 약 10배 이상 많이 소요되는 것으로 알려졌다(Kim et al., 2017). 이런 이유로 극단적 기상현상과 함께 제설제의 사용량이 폭발적으로 증가하였으며, 그로 인한 환경오염 보고 건수 역시 크게 증가하고 있다.  $\text{CaCl}_2$ 는  $\text{NaCl}$ 에 비해 단위중량 당 염소를 상대적으로 많이 함유하고 있어 환경에 더 많은 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(Lee et al., 2013). 국내에서도 2010년 폭설이 발생한 시기에 제설제 과용으로 인한 도로변 과수농가의 피해보상 소송이 있었으며, 제설제 살포에 대한 도로공사의 배상 결정이 대법원에 의해 판결된 바 있다. 또한, 2015년 하천에 유입된  $\text{CaCl}_2$ 로 대전 유성천의 물고기가 폐죽을 당했다는 사실이 알려지자, 제설제의 적정량 살포 필요성에 대한 논의가 지속되고 있다(Sin et al., 2010; Kim et al., 2017). 식물은 토양 중 염분을 흡수하고 저장하는 생물 펌프(biological pump)의 특성을 가져, 제설제의 영향을 받은 가로변 토양의 전기전도도 값을 감소시키지만, 제설제 성분은 식물의 발아 및 성장에 영향을 미쳐 장기노출 시 식물을 고사상태에 이르게 한다(Lee et al., 2007). 또한, 염(salt) 스트레스는 식물체의 엽록소를 감소시켜, 광인산화 반응의 저하로 광합성이 억제되고, 광합성에 활용되지 못한 전자는 산소분자로 전달되어 유해 활성산소 생성에 기여한다(Mehta et al., 2010).

Fig. 6은 국가통계포털에서 수집한 국내 지하수 염소이온의 수질분석 결과를 연도 및 행정구역별로 도시한 자료이다(KOISIS, 2024). 연도별 변화추이를 살펴보면 경남

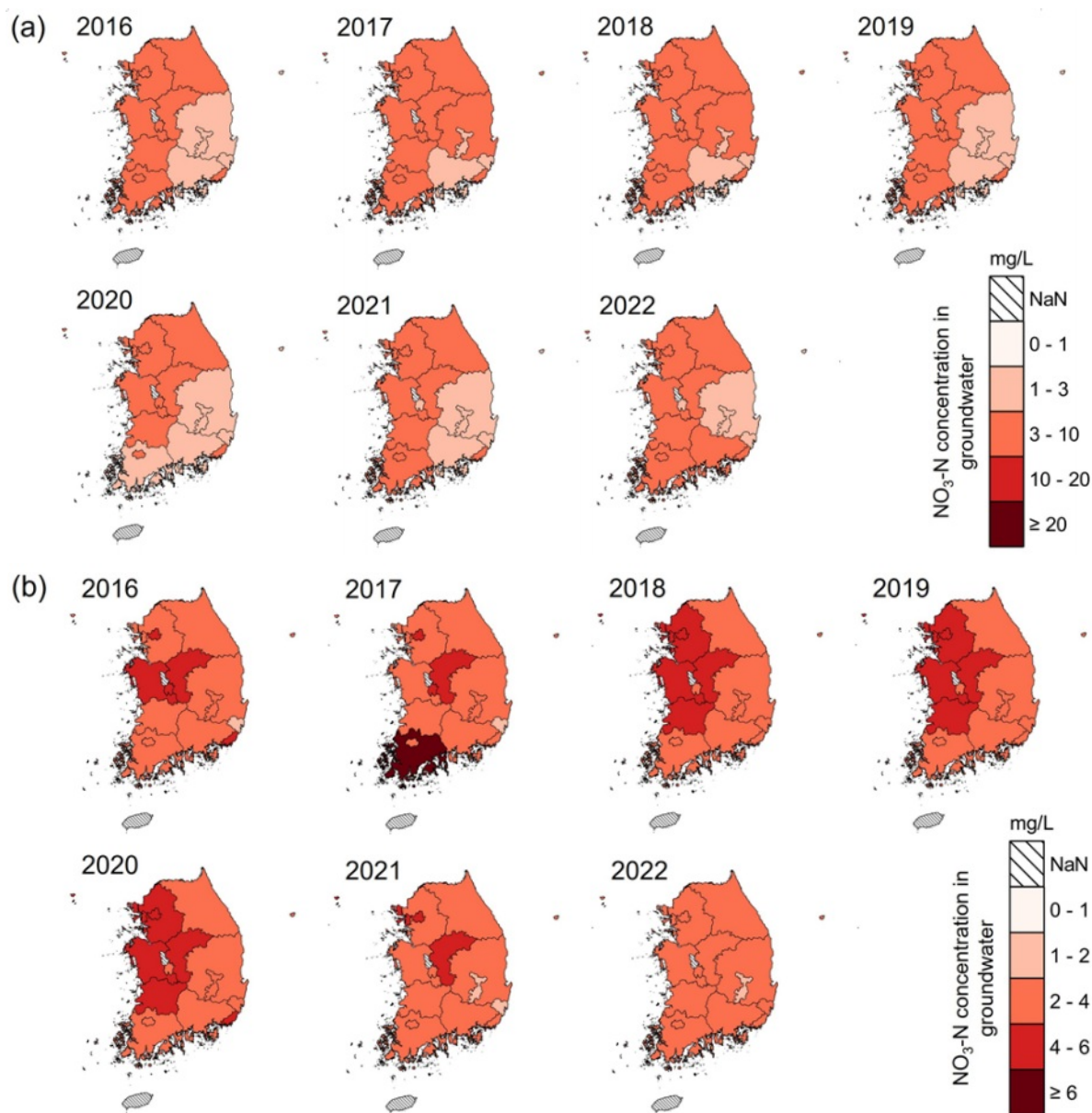
및 부산지역 지하수에서 염소이온의 점진적 농도상승이 관찰되는데, 해안지역임에도 2016년부터 2018년 사이 염소이온이 크게 높지 않아 내륙과 비슷한 수준으로 관측된다. 2019년부터 2021년 사이에는 이전에 비해 농도가 상승하였으며, 2022년에 들어서는 전국에서 가장 높은 염소이온 농도를 보이는 지역 중 하나로 분류되었다. 이는 지하수에서 꾸준히 높은 염소이온 농도를 보이는 인천과 비교하였을 때, 지하수 수질에 영향을 미치는 인자가 구별되기 때문으로 여겨진다. 인천은 주거지역에서도 지하수 양수량이 많은 것으로 보고되고, 해수혼합에 의한 염소이온 및 전기전도도가 꾸준히 높게 나타나는 것으로 알려져 있다(Yun et al., 2014). 그에 비해, 부산과 경남은 2021년에 비해 2022년의 강설일수가 더 증가하였으며, 당해연도에는 국지적 한파와 폭설이 특히 강하게 관측되었다는 것을 감안하면(KMA, 2024), 제설제의 사용량이 크게 증가하였을 것으로 판단된다. 행정안전부에서 정보공개청구를 통해 제공한 2021년부터 2022년 사이의 제설제 사용현황을 비교하면 부산은 약 72%, 경남은 약 151% 증가한 것으로 조사되었다(Fig. 3). 지하수 중 염소이온 농도가 크게 상승한 경기 역시 2022년 겨울철 동안 약 78%의 제설제 사용량 증가를 보였다. 그러나, 앞서 다룬 바와 같이 행정안전부에서 제공한  $\text{CaCl}_2$  통계에서 연차 및 지역별로 살포량이 누락된 것으로 여겨지는 부분이 있음을 감안한다면, 더 많은 제설제가 살포되었을 수 있으며, 이후 정보의 보완을 요청하거나 행정구역별 자료에 대한 재검증을 통해 제설제 사용량과 염소이온 농도를 직접 비교하는 작업이 추가적으로 수행되어야



**Fig. 5.** Population density in 2022 (a) and variation ratio of groundwater usage by administrative region from 2016 to 2022 (b). The region indicated by the red rectangle is Incheon, and the graph shows groundwater usage by purpose.



**Fig. 6.** Distribution of annual average Cl<sup>-</sup> concentration in groundwater by administrative region and its yearly changes from 2016 to 2022.



**Fig. 7.** Distribution of annual changes in average  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentration in groundwater by administrative region from 2016 to 2022 (a), and reclassified  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentration in groundwater with lower concentration ranges (b).

할 것이다.

2022년 지하수의 연평균 염소이온 농도는 부산 1,730 mg/L, 경남 327 mg/L, 경기 300 mg/L, 인천 249 mg/L로 측정되었다. 해당연도 상반기 부산의 지하수 염소이온 농도는 1,643 mg/L, 하반기에는 1,818 mg/L로 꾸준히 높은 농도를 보여, 염수화(brine)된 지하수 특성을 보이는 것으로 판단된다. 이는 Lee et al. (2004)이 보고한 도로 제설제 살포 영향을 받은 수체의 염소이온 농도범위와 일치하는 것으로 보인다. 그러나

해안도시인 부산의 지하수 염수화는 제설제 사용량의 증가와 해수혼합의 영향이 복합적으로 작용하여 나타났을 가능성이 더 높을 것으로 여겨진다. 좀 더 명확하게 원인을 밝히기 위해서는, 지하수 중의  $\text{Cl}^-/\text{Br}^-$  혹은  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ 와 같은 이온 성분비를 계산하거나(Re et al., 2013; Choi et al., 2018), 동위원소 분석 등의 추가 연구를 수행하여야 할 것으로 판단한다.

### 3.4.3. 연도별 질산성질소 분포 특성



국가통계포털(KOSIS)에서 제공되는 용도지역 현황 자료에 의하면, 국내 농림지역은 전체 토지의 약 46% 이상을 차지하며, 관리지역(준도시 및 준농림지역)을 함께 계산하면 약 71%의 토지가 농축산업과 관련이 있다. 따라서, 지표에서 유입 가능한 오염물질 가운데 대표적인 인자로 질산성질소와 염소이온 농도를 비교하여 제설제(혹은 해수침투)와 그 외 인자에 의한 지하수 수질 저하 가능성을 고려하고자 하였다. 단, 앞서 지속적으로 서술한 바와 같이 이 자료는 공공데이터를 수집 및 가공하여 해석한 자료이므로 올바른 해석을 위해서는 공공데이터의 정확성이 가장 중요하며, 이후 실제 현장측정을 통한 검증이 필요함을 밝히는 바이다.

Fig. 7(a)는 2016년부터 2022년 사이 지하수의 지역별 질산성질소 이온농도로서, 제공된 연평균 질산성질소 농도 값이 국내 먹는물 수질기준인 10 mg/L를 초과한 지역은 보이지 않는다. 연구기간 전체에 걸쳐 질산성질소 오염도는 대체로 낮은 편으로 나타나며 경남 및 경북지역은 특히 지하수의 질산성질소 오염도가 낮게 유지되었다. 다만, Fig 7(b)에서 제시한 것처럼 좀 더 낮은 농도기준을 활용하여 연도별 질산성질소 농도변화를 비교한다면, 대체로 충북의 질산성질소가 다른 지역에 비해 높게 나타나는 것이 보이며, 2018년 전남에서 7.2 mg/L로 가장 높은 농도로 관측되었다. 국가가축방역통합시스템의 법정가축전염병 발생 통계를 참고하면, 2018년 전국적인 법정가축전염병 발생량은 전년도에 비해 4배 이상 증가하였으며 해당 추세는 2021년까지 이어지는 것으로 조사되었다(KAHIS, 2024). 이에 근거하여 지하수의 질산성질소는 염소이온과 유입 기원이 구별되며, 염소이온에 의한 지하수 수질저하는 겨울철 제설제의 활용과 해안지역의 해수침투를 주요 원인으로 제시하는 것이 타당할 것으로 사료된다. 한편, 서울의 염소와 질산성질소는 모두 상대적으로 높은 농도로 유지되며, 이는 오수 및 생활하수 등의 인위적 요인에 의한 오염이 반영되었기 때문으로 사료된다.

공공 데이터는 그 특성상 공공 데이터 생성기관 및 지방자치단체에 따라 보유량의 차이가 크고, 수집 연도도 제각각이어서 표준화된 틀을 이용하여 가공하고 분석하여야 하는 어려움이 상당히 큰 편이다. 이 논문에서도 공공데이터의 이러한 편중성 및 완결성 부족 등의 이유로, 공공데이터 간의 상관관계(제설제-포트홀-지하수 염소이온 증가)를 규명하는 점에서 정량적인 결과를 도출하지 못한 한계가 있다. 이는 대한민국 전체를 연구지역으로 상정하고, 광역·시·도 단위로 분석이 이루어졌기 때문으로 판단된다. 향후 수행할 추가 연구에서는 도로가 밀집되어 있는 수도권의 주요 시·군 또는 최근 지하수 내 염소이온 농도 증가가 높은 부산-울산-경남지역의 시·군을 선택하여 집중적으로 다루어보고자

한다. 현장 조사와 공공데이터의 종합적인 활용을 통해 추가 연구에서는 좀 더 명확한 상관관계를 분석할 수 있을 것으로 기대한다.

#### 4. 결 론

이 연구는 국내 공공기관에서 제공되는 공공데이터를 활용하여 지하수 수질의 연도별 변화 특성을 제설제의 살포 및 기후변화와 연계하여 해석하고자 하였다. 겨울철 국지적 한파와 폭설의 증가에 따라 염화물계 제설제 살포량이 늘어나면 염소이온이 도로와 주변 환경에 영향을 미칠 것으로 판단하였다. 기후변화 특성이 본격적으로 보고되기 시작한 2016년부터 2022년 사이 지하수 수질의 공간적 특성과 기상요소, 지하수 이용량, 제설제 살포량, 인구밀도 등 수질에 영향을 미칠 수 있는 외부적 요소를 조사 및 상관관계를 비교하였다.

국내 전체 도로면적과 대비하여 고속도로의 비율은 약 4.3%로 매우 적은 편이나, 고속주행이 이뤄지는 관계로  $\text{CaCl}_2$ 가 꾸준히 살포되는 등 적극적 도로관리가 이뤄진다. 연구기간 동안 지방자치단체에서 사용한  $\text{CaCl}_2$  자료와 비교하였을 때, 고속도로에서는 지방도로 전체의 15%~55%에 달하는  $\text{CaCl}_2$ 가 살포된 것으로 조사되었다. 제설제 살포량의 증가추세는 도로상태와 지하수 수질에 상당한 영향을 미친 것으로 판단되며, 인구가 많을수록 겨울철 도로의 유지 및 관리를 위해 제설제 살포량이 증가한 것으로 여겨진다.

도로포장 방법이 개선되어 포트홀 발생량 자체는 꾸준히 감소하는 것으로 나타났으나, 2016년 이전에는 제설제 살포 시기에 포트홀이 발생 보고 건수가 많았다. 현대의 포트홀 발생은 제설제를 비살포한 강우집중 시기에 더 많이 발생해, 수분에 약한 아스콘의 자재 결합력 저하가 원인으로 작용한 것으로 판단된다. 2022년 부산과 경남 등 한반도 동남부의 지하수 염소이온은 이전 연도에 비해 매우 높게 나타났으며, 이는 해당 연도에 보고된 강한 한파와 국지적 폭설로 유발된 제설제의 과다한 사용과 연관이 있다고 여겨진다. 그러나 이들 지역에서 지하수 염소이온 증가 요인으로 추정되는 해수의 영향과 제설제의 영향을 구분하기 위해서는, 추가자료의 확보와 검증이 필요하다고 판단된다.

연구에서 활용한 공공데이터는 자료의 완전성이 부족하여 인자들 간의 상관관계가 뚜렷하게 보이지는 않았다. 자료의 완전성과 신뢰성은 활용도 상승과 사회적 방향성 제시를 위해 앞으로의 공공데이터가 갖춰야 할 항목이라고 판단한다. 또한, 공공데이터는 통계적 자료에 가깝다는 점을 감안하여, 정확한 해석을 위해서는 실제 현장측정을 통한 검증이 필요함을 밝히는



바이다. 아직 공공데이터가 불완전하기에 본 논문의 결과에 나타난 지하수 수질 저하 요소에 대하여 일부 인과관계만을 밝혔으나, 공공데이터의 활용을 통해 사회적으로 필요한 연구를 제안하는 단계까지 끌어올린 유의미한 시도라고 판단한다. 결과에 대한 객관성을 확보하고 정량적 평가를 수행하기 위해, 향후 수행할 추가 연구에서는 도로가 밀집한 수도권의 주요 시·군 또는 최근 지하수 내 염소이온 농도 증가가 높은 부산-울산-경남지역의 시·군을 선택하여 집중적으로 다루어보고자 한다. 앞으로 데이터 품질의 성능향상과 현장값에 대한 검증까지 이루어진다면, 공공데이터는 분명 더욱 유용하고 값진 정보를 제공하며 연구자들에게도 유의미한 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단한다.

## 사 사

이 논문은 한국지질자원연구원에서 수행하고 있는 주요사업 “지오빅데이터 오픈플랫폼 개발을 통한 국가지질자원 데이터센터(NGDC) 기반 구축(24-3118)”의 지원을 받아 수행되었습니다.

## 참고문헌

- Cho, S.H., Lee, D.G., Shin, G.H., Choi, C.I., Lee, K.T., Kim, D.S., and Lee, B.D. (2022). Tracking the distribution of deicing agents using the sodium adsorption ratio (SAR) of soils near highways. *J. Soil Groundw. Environ.*, **27**(3), 22-40.
- Choi, J.S., Jin, J.H., and No, S.H. (2014). Review of domestic standards on pothole reduction improvement methods. *J. Korean Soc. Road Eng.*, **16**(3), 64-69.
- Hem J.D. (1985). Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water (Vol. 2254). Department of the Interior, US Geological Survey (USGS), Virginia, 263 p.
- Heo, H.S., and Lee, B.J. (2017). Evaluation of the properties of an environment-friendly de-icing agent based on industrial by-products. *J. Korea Inst. Struct. Maint. Insp.*, **21**(6), 132-139.
- KAHIS (Korea Animal Health Integrated System). (2024). Live-stock disease information. <https://home.kahis.go.kr> [Accessed 12 May 2024]
- KEC (Korea Expressway Corporation). (2002). Establishment of management and maintenance of concrete structures for durability. KEC, Gyeonggi-do, 142 p.
- KEC (Korea Expressway Corporation). (2024). Expressway public data portal. <https://data.ex.co.kr> [Accessed 15 April 2024]
- Kim, G. (2017). An evaluation of public data opening policy: Focused on public data portal. *Public Policy Rev.*, **31**(2), 57-82.
- Kim, G., Park, W., Kim, H., Kim, S., Joo, H., and Kim, M. (2017). The establishment of tailored snow removal correspondence system considering regional characteristics. Ministry of the Interior and Safety (MOIS), Sejong, 863 p.
- Kim, H. (2020). Quality evaluation of the open standard data. *J. Korea Content. Assoc.*, **20**(9), 439-447.
- Kim, K., Lee, H., Jung, C., Kang, J., Park, S., and Kim, K. (2002). Investigation of soil contamination of some major roadsides in Seoul II. Major roadsides in Gangdong-, Gwangjin-, Nowon-, Seodaemun- and Seongdong-gu. *J. Korean Soc. Appl. Biol. Chem.*, **45**(2), 92-96.
- Kim, S.H. (2021). Development and application of climate-informed spatial downscaling method assessment for climate change impacts Asian water resources. Doctoral thesis. Sejong University. Seoul.
- KMA (Korea Meteorological Administration). (2024). Regional specific monitoring data. <https://www.kma.go.kr> [Accessed 20 April 2024]
- KOSIS (Korean Statistical Information Service). (2024). Average concentration of water quality standard factors by region (city/province) and population status by city, county and district. <https://kosis.kr> [Accessed 13 April 2024]
- Lee, B.D., Yoon, B.S., Lee, J.K., and Jung, Y.H. (2005). Evaluation of the deicing performance and concrete structure effect with various deicing chemicals. *Int. J. Highway. Eng.*, **7**(4), 113-123.
- 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.
- Lee, K.B., Kang, J.K., Li, J., Lee, D.B., Park, C.W., and Kim, J.D. (2007). Evaluation of the utilization of salt-tolerant plants for soil improvement in reclaimed land. *Korean Soc. Soil Sci. Fert.*, **40**(3), 173-180.
- Lee, K.B., and Lee, S.W. (2007). Effects of deicer on concrete pavement distress. *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, **27**(1D), 73-80.
- Lee, P., Yu, Y., Yun, S.T. (2004). Effect of calcium chloride and sodium chloride on the leaching behavior of heavy metals in roadside sediments. *J. Soil Groundw. Environ.*, **9**(4), 15-23.
- Lee, S.Y., Kim, W.T., Joo, J.H., and Yoon, Y.H. (2013). Effect of calcium chloride treatment concentration on the growth of roadside ground cover plants. *J. Korean Inst. Landsc. Archit.*, **41**(4), 17-23.
- Mullaney, J.R., Lorenz, D.L., and Arntson, A.D. (2009). Chloride in groundwater and surface water in areas underlain by the gla-

- cial aquifer system, northern United States (No. 2009-5086). US Geological Survey (USGS), Virginia, 41 p.
- MyWater (Korean public water information portal). (2024). Regional groundwater. <https://www.water.or.kr> [Accessed 10 May 2024]
- NIMS (National Institute of Meteorological Sciences). (2018). Climate change over the past 100 years in Korea. NIMS, Jeju, 42p.
- Park, H.J., and Ahn, J.B. (2016). Combined effect of the Arctic oscillation and the Western Pacific pattern on East Asia winter temperature. *Clim. Dyn.*, **46**, 3205-3221.
- Park, S.W., Eom, I.S., Seo, H.K., and Gang, D.W. (2014). Development of implant repair methods using cement materials for pothole repair in asphalt pavements. *J. Korean Soc. Road Eng.*, **16**(4), 41-49.
- PDP (Public Data Portal). (2024). Amount of Deicer Consumption by region (city/province). <https://www.data.go.kr> [Accessed 15 April 2024]
- Seo, H.S., and Park, B.H. (2016). Current Status of Eco-Friendly Deicing Material Development. *J. Inst. Conver. Technol.*, **6**(2), 25-28. <https://doi.org/10.22710/JICT.2016.6.2.025>
- 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.
- Sin, S.P., Yang, C.H., Ha, D.S., Baek, B.G., and Cha, J.S. (2010). Estimation of the appropriate amount of additional de-icer stockpiling. *J. Korean Soc. Road Eng.*, **12**(4), 51-54.
- Yun, S.O., and Hyun, J.W. (2019). Analysis of the current status and improvement measures of public data open policy: Focusing on the national key data opening case of the public data portal. *J. Korean Public Manag.*, **33**(1), 219-247.
- Yun, S.W., Choi, H.M., and Lee, J.Y. (2014). Comparison of groundwater levels and groundwater qualities in six megacities of Korea. *J. Geol. Soc. Korea.*, **50**(4), 517-528.