

# 제설제에 노출된 서울시내 도로 시설물의 열화 환경 분석

윤인석<sup>1\*</sup>

## Evaluation on De-Icing Salts Laden Environment of Road in Seoul

In-Seok Yoon<sup>1\*</sup>

**Abstract:** De-icing salts have been used commonly in areas where snow or ice is a seasonal safety hazard for roadway, however, the salts is one of main causes on serious deterioration of road infrastructures in crowded urban city like Seoul. In order to establish maintenance strategy of road infrastructures under de-icing salts laden environment, it is necessary to examine environmental characteristics and its response to the existing facilities. The purpose of this study is to evaluate the deterioration environment of road infrastructures. Additional purpose is to develop a design model and details for durability design of infrastructures under de-icing salts laden environment, considering mainly a build-up rate of surface chlorides. Concentration of external chloride solution and surface chloride content were calculated at the level of average de-icing salts for 5 years, ratio of auxiliary road of 17.5 to 30%, and effective exposure area to snow 50 to 80%. The chloride build-up rate was 0.073 ~ 0.077% / year and the maximum surface chloride content was calculated to be 2.2 ~ 2.31% by concrete wt. This study is expected to be used for establishing integrated strategy of road infrastructures, such as predicting chloride profiles or degree of chemical corrosion to exposure concrete.

**Keywords:** De-icing salts, External chloride solution, Surface chloride content, Deterioration, Chloride build-up rate

### 1. 서 론

2019년 서울시 도로율은 22.9%로서, 차량 왕복통행이 가능한 12m 이상의 유효 도로율은 다소 낮지만 전체 도로율은 꾸준히 증가하였다. 이와 비례하게 동절기 노면 위의 얼음을 녹이기 위한 제설제의 사용도 증가하였다. 제설제에 의한 피해는 꾸준히 보고되고 있는데, 도로 주변의 식생을 방해하거나 하천 및 지하수 오염 등, 환경 생태학적으로 큰 위협을 줄 뿐 아니라, 차량의 기능도 떨어트릴 수 있다. 특히, 사회기반 시설물의 견지에서는 심각한 열화를 유발시켜 기대수명을 현저히 단축시키는 등, 대단한 피해를 초래할 수 있다. Fig. 1과 같이 제설제는 도로 시설물 구조를 화학적으로 손상시키고 (Valenza and Schere, 2006), 교좌 장치 뿐만 아니라 철근의 부식을 위협하는 주요 요인이다(Vu and Stewart, 2000)

염화물계 제설제가 시멘트계 재료의 침투 특성에 미치는 영향을 살펴보면, 수용액의 점성, 표면장력, 밀도 등 물성을 변화시키거나(Villani et al., 2014a), 습도의 평형상태가 증가하여 공극내 포화도를 증가시키며(Greenspan, 1997), 침전 및 결정화되어 공극을 차단하거나(Villani et al., 2014b), 시멘트

수화물과 반응하여 새로운 화합물이 생성되어 공극을 감소 또는 차단할 수 있다(Bu 2014). 각 메커니즘과 효과는 수용액 내 염화물량에 전적으로 의존된다. 또한, 염화물량의 종류에 따라서도 영향이 다른데, 양이온( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ )이 침투 속도에 큰 영향을 미칠 수 있다(Peterson et al., 2013).

염화물과 수화물의 화학적 반응을 살펴보면, 염화나트륨보다 염화칼슘 또는 염화마그네슘이 침투 특성에 큰 영향을 미칠 수 있는데, 프리델염(Friedel's salt), 쿠젤염(Kuzel's salt), 옥시 클로라이드 칼슘(calcium oxychloride), 옥시 클로라이드 마그네슘(magnesium oxychloride), 부루사이트(brucite), 또는 규산 마그네슘 수화물(magnesium silicate hydrate) 등을

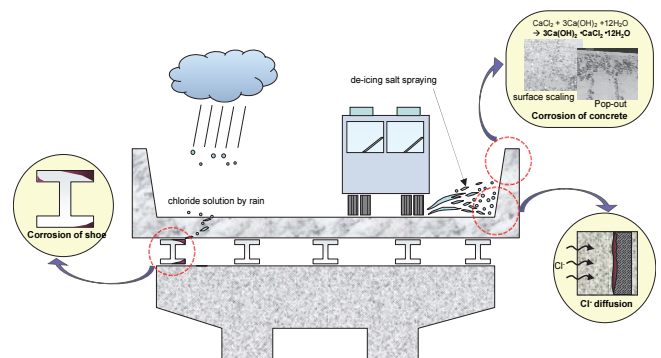


Fig. 1 Various types of deterioration of road infrastructures due to de-icing salts

<sup>1</sup>정회원, 인덕대학교 교수

\*Corresponding author: isyoon@induk.ac.kr

Civil Engineering, Induk University, Seoul 01878, Republic of Korea

•본 논문에 대한 토의를 2022년3월 31일까지 학회로 보내주시면 2022년 4월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

형성한다(Farnam et al., 2015a). 그런데, 옥시 클로라이드 칼슘의 존재는 오랫동안 간과되어 왔으나, 최근 연구에 의하면 제설제 살포로 인한 시멘트계 재료의 조직구조를 팽창 붕괴 시켜서 도로 시설물의 화학적 부식을 시작으로 표면 스케일링 및 박리 등의 물리적 열화로 연쇄시키는 원인으로 나타났다(Suraneni et al., 2016). Fig. 1의 화학식처럼, 수분과 염화물량이 다양한 환경에서 옥시 클로라이드 칼슘의 생성량은 많아진다. 특히, 제설제 살포량이 많고 어는점 이하의 낮은 온도 조건에서 물리적 피해는 더욱 심각해진다(Taylor et al., 2012).

Fig. 2는 옥시 클로라이드, 수산화칼슘, 물 등이 혼입된 상변이도로서, 평온에서 옥시 클로라이드 칼슘은 12% 염화칼슘 수용액에서 형성되며, 옥시 클로라이드 칼슘의 생성량은 제설제의 살포량과 매우 연관된다(Farnam et al., 2015b).

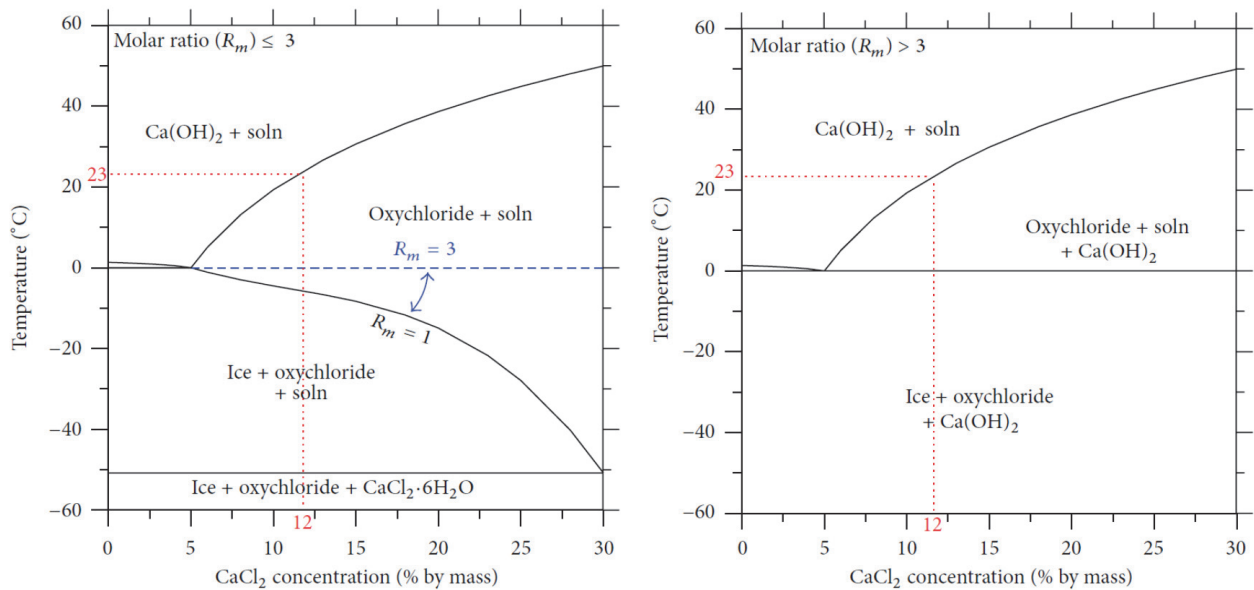
한편, 제설제와 동해가 동반 작용시, 염화물의 존재로 모세관 내 수분 전체가 얼지는 않는다. 그래서, 순수한 얼음이 석출되고 잔존 용액의 염소이온 농도가 높아져 작은 세공 수용액과의 농도차로 간극 수압이 발생한다. 이러한 영향 인자는 침투압 증가 및 수압과의 복합작용, 공극내 포화도 증가 및 압력 차에 의한 수분이동, 염의 결정 성장 등과 같은 미세적 요인과, 열충격 발생, 층간 동결에 의한 응력차 발생 등의 거시적 요인으로 분류된다. 침투한 염화물은 시멘트 수화물인 수산화칼슘을 염화칼슘으로 변화시키고 미세구조의 연화를 유도하면서 공극수의 알칼리도가 저하시키고 강도발현을 담당하는 칼슘실리케이트 수화물의 분해를 촉진시켜서 수화조직이 느슨하게 된다(Jain et al., 2012). 따라서, 화학적 부식 정도와 속도는 제설제의 살포량에 따른 염화물 농도와 콘크리트내 수분량에 의존된다.

제설제로 인한 열화를 묘사한 기존 실내 실험규격의 염소농도 조건을 정리한 것이 Table 1이다. 최소 3%에서 최대 25%의 염소농도가 규정되었는데, 스케일링 현상을 묘사할 때는 3~4% 수준, 박리를 고려할 때는 이보다 높은 14% 이상으로 조성하여 열화 형태 및 촉진기간에 따라 농도를 결정하고 있다. 농축된 염소농도는 콘크리트 물성에 다양한 방식으로 영향을 미친다(Yoon et al., 2014).

이상의 기술적 배경을 살펴볼 때, 제설제 살포로 인한 외래 염소농도량을 추정하는 것은 도로 시설물의 열화 환경을 정의하고 향후 열화 속도를 추정하는데 대단히 중요하다. 그래서 본 연구는 서울시내 적설량 대비 최근 5년간 살포된 제설

**Table 1** Experimental program for simulating deterioration of concrete due to de-icing chemicals

Code / Research	Chloride solution	Cause of deterioration
ASTM C 672 (2012)	CaCl <sub>2</sub> 4%	Scaling
MTO LS-412 (1997)	NaCl 3%	Scaling
RILEM TC 117-FDC/CDF (1996)	NaCl 3%	Scaling
Svensk Standard SS 13 72 44 (2005)	NaCl 3%	Scaling
Jain et al. (2012)	NaCl 23% MgCl <sub>2</sub> 25% CaCl <sub>2</sub> 28%	Spalling under wetting and drying
	NaCl 14% MgCl <sub>2</sub> 15% CaCl <sub>2</sub> 17%	Spalling under freezing and thawing



**Fig. 2** CaCl<sub>2</sub>-Ca(OH)<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O phase diagram for different Ca(OH)<sub>2</sub> / CaCl<sub>2</sub> molar ratios (R<sub>m</sub>) developed from Farnametal.(2015b)

제 사용량을 토대로 서울시내 도로의 열화 환경을 해석하였다. 적설량에 혼입된 제설제의 염소이온 액상 농도를 추정하여, 노면의 표면 염소이온량을 산정하였다. 이는 향후, 서울시내 도로 시설물의 내구수명 예측을 위한 염소이온 프로파일을 추정하는데 초기치로 사용 가능하며, 화학적 부식에 의한 열화 환경을 정의하여 향후 종합적 유지관리 전략의 수립에 활용될 수 있다.

## 2. 열화환경 해석

### 2.1 서울시 제설제 사용현황

Fig. 3은 최근 2015년부터 2020년 초까지 최근 5년간 서울의 적설량 및 제설제 사용량이다(Seoul Safety General Office 2020). 5년간 평균적인 적설량은 16.8cm, 평균적인 제설제 사용량은  $21 \times 10^3$  ton이었다. 가장 제설제 사용량이 많았던 시기는 2017년~2018년 겨울로서 적설량은 26.5cm, 제설제 사용량은  $35 \times 10^3$  ton이다. 대체적으로 적설량( $h_{snow}$ )이 많을수록 제설제 사용량( $Q_{d-s}$ )도 많은 추이였는데, 상관관계는 다음과 같다.

$$Q_{d-s} = 1.39 \cdot h_{snow} - 2.48 \quad (1)$$

염화칼슘계 제설제의 가격은 중국산이 약 480원/kg, 국내산이 약 700원/kg 수준으로서 중국산 대비 1.5배 정도 더 고가이다. 서울시내 제설제 사용량은 매년 평균 약 100억~146억의 재료비에 상응하며, 인건비를 포함한 제반시설 등 전반의 비용은 이보다 훨씬 높을 것으로 사료된다.

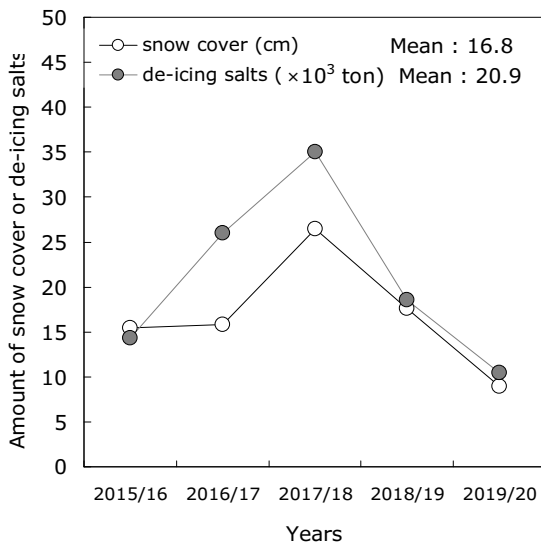


Fig. 3 Amount of snow cover vs. amount of de-icing salts sprayed to roads in Seoul for 5 years

### 2.2 제설제로 인하여 녹은 적설량의 액체 부피량

적설량은 일정상태의 체적에서 고체상태의 높이이며, 강수량은 내린 비의 높이로서, 도로에 적설이 녹아서 액체로 환산하려면 눈과 비의 밀도 차이가 고려되어야 한다. 이를 적설상당물량이라 하는데 적설을 녹인 물의 높이 즉 적설의 질량과 같은 질량을 갖은 수평면적 위의 수용액 높이이다.

$$V_{water} = A \cdot \frac{\rho_{snow}}{\rho_{water}} \quad (2)$$

강수량과 적설량의 부피는 다음과 같다.

$$V_{water} = A \cdot h_{water} \quad (3)$$

$$V_{snow} = A \cdot h_{snow} \quad (4)$$

여기서,  $h_{snow}$  : 적설높이,  $h_{water}$  : 강수높이,  $\rho_{snow}$  : 눈의 밀도,  $\rho_{water}$  : 물의 밀도, A : 적설 또는 강수에 노출된 도로 면적이다. 따라서, 위 식 (2)는 최종적으로 다음과 같다.

$$h_{water} = h_{snow} \cdot \frac{\rho_{snow}}{\rho_{water}} \quad (5)$$

적설의 밀도는 대략  $0.1 \sim 0.15g/cm^3$ 이며, 하부에 있는 적설의 경우에는 압축되어  $0.3 \sim 0.5g/cm^3$ 가 될 수 있다. 더욱이, 이는 건성 눈 또는 습성 눈 등의 눈의 특성에 따라 차이가 있으며, 눈이 계속해서 내리는 상황에서 적설량은 낮아질 수도 있다. 시간이 지남에 따라 다져지거나 적설의 아랫부분이 점차 녹는 경우, 바람에 의해 깎이는 경우에 적설량의 측정치는 낮아지게 된다. 위 식에 의하면, 눈 10cm를 녹였을 경우에 액체 10mm와 등가로 상응한다.

### 2.3 도로면에 접촉된 염소이온 농도량

2019년 서울시내 도로 총연장은 8,310km, 도로면적은  $86.86km^2$ 이다(Seoul metropolitan government 2020). 도로 구조상 양측에 제방, 보조기층, 기층, 갓길, 차도가 존재하기 때문에 도로 전면적이 제설제 살포의 영향을 받지 않는다. 제설제 살포는 대단히 불규칙적인 수밖에 없는데, 중앙선 인근은 살포하지 않고 차륜 접지 면적에 집중적으로 살포하려는 경향이 강하다. 또한, 서울시내 소로까지도 제설제를 살포한다고 간주하는 것은 불합리하다. 그래서, 제설제 살포는 주간선 도로와 보조간선 도로에 국한하였다. 대체적으로 주간선 도로율은 7.5~10% 수준, 보조간선 도로율은 10~20% 수준

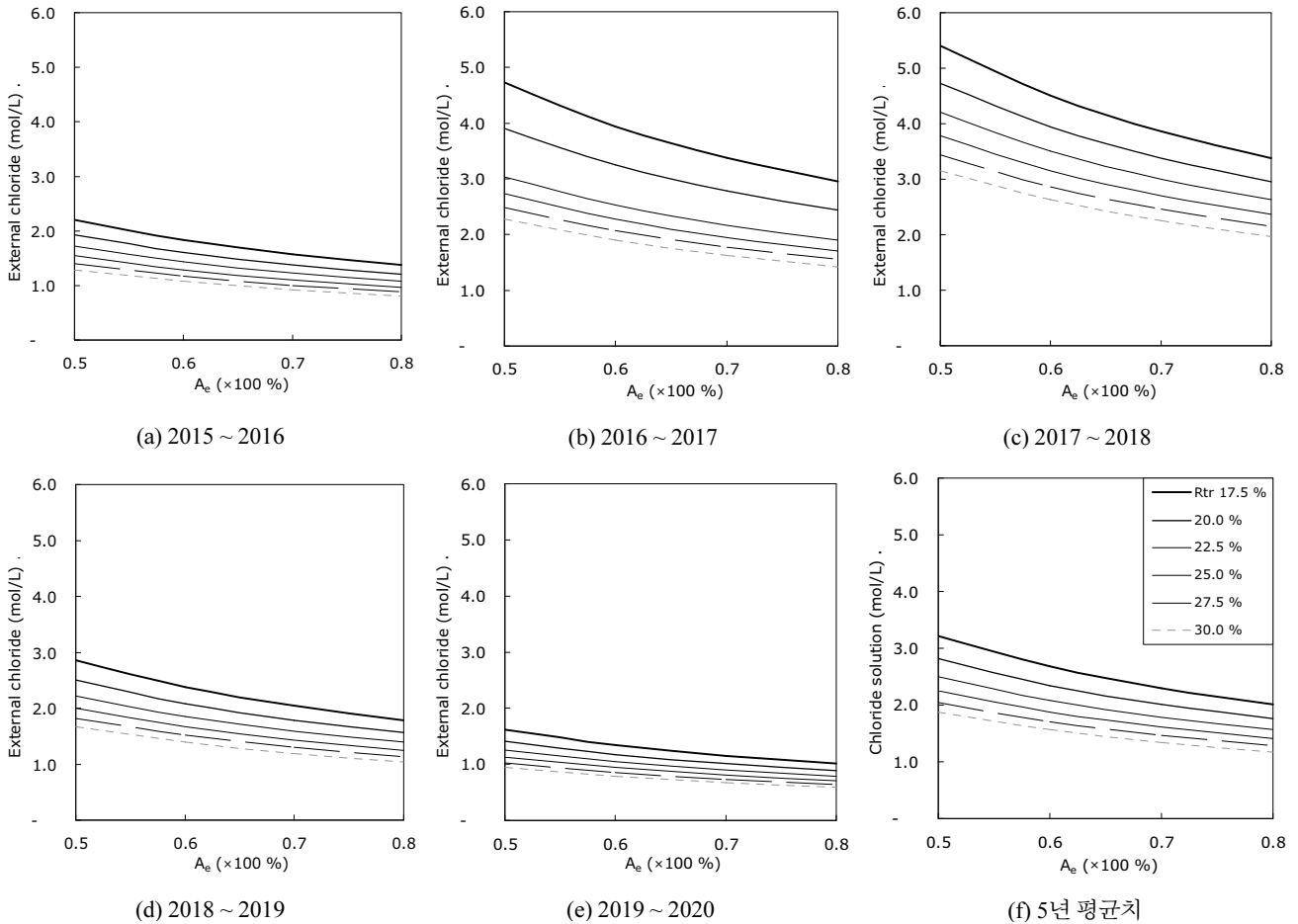


Fig. 4 Concentration of external chloride solution melted from de-icing salt on the road with exposure area  $A_{ex}$  and ratio of arterial road  $A_r$  for last 5 years

인데, 양측을 합치면 17.5 ~ 30 % 수준에 이른다.

그래서, 서울시내 전체 도로 면적에서 17.5 ~ 30 % 수준으로 국한하되, 살포의 영향을 받는 유효 면적율은 50 ~ 80 % 수준으로 변수화 하였다. Fig. 4는 연도별 적설량과 제설제 사용량으로부터 염소 수용액 농도를 추정된 결과이다. 2017 ~ 2018년은 적설량이 많아서 제설제 사용량이 급증하였는데, 주간선 보조간선 도로 17.5 % 수준, 살포 유효면적율 50 % 수준에서, 외래 염소 수용액 농도가 4.73 mol/L의 상당한 고농축 용액으로 계산되었다. 반면, 2019 ~ 2020년에는 적설량이 매우 적어서 동일 조건에서 1.61 mol/L의 외래 염소 수용액으로 추정되었다. Fig. 4(f)는 5년간 데이터를 평균화하여 나타낸 것으로, 동일 조건에서 3.2 mol/L의 높은 염소 수용액이 추정되었다.

앞서 설명한 바와 같이 제설제 살포 방식이 매우 불규칙적이기 때문에 결정적으로 염소 수용액 농도를 표현하는 것은 대단히 어렵다. 그래서 다중 회귀분석을 행하여 도로내 살포 유효 면적율 및 주간선 보조간선 도로의 비율을 변수로 도로 표면이 접하는 외래 염소 수용액 농도  $[Cl(aq)]_{ex}$ 를 추정할 수 있는 식 (6)을 도출하였다. 즉, 제설제량이 많으며, 제설제 살

포 유효면적율과 주간선 및 보조간선도로가 적을수록 외래 염소수용액 농도는 상승한다.

$$[Cl(aq)]_{ex} = -(4.24 \times 10^{-2} \cdot A_c + 6.02) \left( \frac{h_{snow}}{R_{tr}} \right) + (8.49 \times 10^{-2} \cdot A_c - 1.16 \times 10) \left( \frac{1}{R_{tr}} \right) \quad (\text{mol/L}) \quad (6)$$

여기서,  $A_c$ : 도로 단위면적당 제설제 살포 유효 면적율 (%/100),  $R_{tr}$ : 주간선 및 보조간선 도로를 합한 비율이다.

### 3. 부식환경 해석

#### 3.1 최대 표면 염소 이온량

염소이온 농도에 직접적으로 큰 영향을 미치는 원자무게를 고려하여 수용액내 복합염소체  $c$ 의 해당량( $C_c$ )은 다음과 같다.

$$C_c = q_c W_c \quad (7)$$

여기서,  $q_c$ : 수용액내 원자 $e$ 의 양,  $W_c$ : 원자 $e$ 의 원자 무게이다(Na: 22.990, Cl: 35.453, Ca : 40.078).

다음으로 제설제가 녹아서 생성된 외래 염소 수용액내, 전체 소금성분 값에 대비한 복합염소체  $c$  (NaCl, 또는 CaCl<sub>2</sub>)의 중량비율( $\Omega_c$ )은 다음과 같다.

$$\Omega_c = C_c / [Cl(aq)]_{ex} \quad (8)$$

단위체적의 수용액 내에 복합염소체의 양( $q_{Cl}$ )은 각각의 밀도를 고려하여 다음과 같다.

$$q_{Cl} = \Omega_c \rho_c \quad (\text{kg/L}) \quad (9)$$

여기서,  $\rho_c$ : 복합 염소분자체  $c$ 의 밀도이다(NaCl: 2.16 kg/dm<sup>3</sup>, CaCl<sub>2</sub>: 2.15 kg/dm<sup>3</sup>).

이론적인 표면 염소이온량에 궁극적으로 필요한 것은 수용액내 복합염소 분자체  $c$ , 즉 NaCl 또는 CaCl<sub>2</sub>의 양  $q_c$ 로부터 복합염소체 내에 존재하는 염소 중량( $q_c^A$ )이므로 다음과 같이 환산된다.

$$q_c^A = q_c \frac{W_{Cl}}{W_c + W_{Cl}} \quad (\text{kg/L}) \quad (10)$$

여기서,  $W_{Cl}$ : Cl의 원자무게,  $W_c$ : 염소복합체를 구성하는 원자 무게이다.

본 연구에서는 서울시내 살포된 제설제를 염화칼슘으로 국한하였다. 침투된 염소이온이 모세관 공극 내부에만 축적되고 시멘트와 반응하는 고정화도 공극수내 염소이온량의 흡착으로 진행되므로, 최종적으로 콘크리트 표면에 존재할 수 있는 최대 염소이온량  $[Cl]_s(\text{max})$ 을 다음과 같이 표현하였다.

$$[Cl]_s(\text{max}) = \frac{(q_{CaCl_2}^A) \cdot D_{sat} \cdot V_{pore}}{W_{conc}} \quad (\% \text{ by conc'c wt.}) \quad (11)$$

여기서,  $V_{pore}$ : 콘크리트내 공극률(%/100),  $D_{sat}$ : 공극내 포화도(%/100),  $W_{conc}$ : 콘크리트 단위중량이다.

콘크리트가 포화상태라면  $D_{sat}$ 은 1로서, 콘크리트내 최대 염소이온량 $[Cl]_{\text{max}}$ 은 염해 해석시 초기치인 표면 염소이온량과 근사해진다. 그런데, 콘크리트 표면 부위에는 표면효과(Skin effect)로 인하여 작은 입자의 잔골재와 시멘트 풀만이 주로 존재하므로 굵은골재의 존재는 무시할 수 있다. 따라서, 식(11)에서  $V_{pore}$ 는 모르타르의 공극률으로 치환하는 것이 적합하되, 콘크리트 중량 대비 염소이온량으로 표현하였다. 여

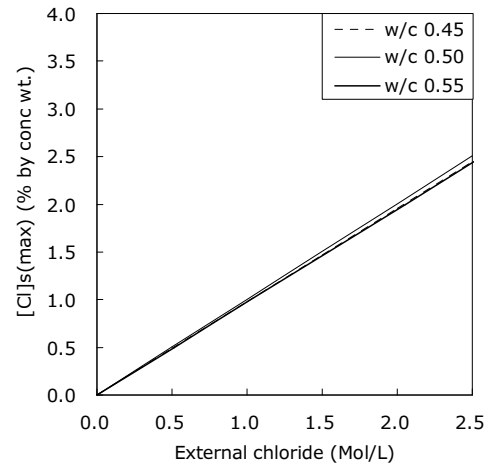


Fig. 5 Maximum chloride content of concrete with external chloride concentration

Table 2 Level of corrosion environment by means of surface chloride content

Researcher	Corrosion	Surface chloride content (kg/m <sup>3</sup> )
	Low	0 ~ 2.4 (1.8)
Weyer et al. (1992)	Moderate	2.4 ~ 4.7 (3.5)
	High	4.7 ~ 5.9 (5.3)
	Severe	5.9 ~ 8.9 (7.4)
Berke and Hicks (1992)	Moderate	Max. 15.0 (rate 0.15 kgf/m <sup>3</sup> /year)
	Severe	Max. 17.8

기서, 시멘트계 재료의 모세공극률은 Van Breugel(1991)의 제안기법과 연동하여 해석에 반영하였다.

이상을 기초로, 제설제가 용해된 수용액의 농도에 따른 최대 표면 염소이온량을 계산한 결과를 Fig. 5에 정리하였다. 표면 염소이온량은 외래 염소이온량에 크게 의존하되, 물-시멘트비에 따른 영향은 경미하였다. 문헌적 고찰에 의하면 표면 염소이온량으로 판단한 부식환경을 Table 2에 정리하였다.

### 3.2 염소 농축 속도

염화칼슘 수용액이 시간에 따라 농축되기 때문에 구체 표면부의 염소이온 농도는 지속적으로 증가하다가 일정시간에 도달하면 일정한 추이를 보인다. Table 3은 다양한 연구자들이 제안한 시간 의존적인 표면 염소이온량 식이다. 해양 침지대 콘크리트의 표면은 경년 10~15년이 경과하면 화학적 농도 평형에 도달하여 일정한 농도에 도달한다고 보고된 바 있으나 (Troiv 1995), 제설제의 경우는 연구사례가 극히 부족하다.

일본의 경우, 제설제 및 해양환경에서 15~40년 경과후 최대치 23 kg/m<sup>3</sup>에 도달되었다. 덴마크에서는 코펜하겐 해협 내에서 표면 염소이온량의 농축 속도가 평균 0.2%씩, 해협 외곽에

서는 0.1%씩 증가하였다(Henriksen et al., 1996). 북미에서는 제설제에 노출된 교량 상판의 염소이온이 매년  $0.6 \text{ kg/m}^3$  (0.026 % conc wt./year)의 속도로 최대  $15 \text{ kg/m}^3$ 에 도달한다고 보고하였다(Berke 2013). 미국에서는 교량 상판에서 표면 염소이온은 10~15년 동안 꾸준히 증가하다가 이후 완만한 속도를 보였다(Weyers et al., 1994). 특히, 미국은 1960년대부터 제설제가 살포된 도로 시설물에 대한 방대한 실측 데이터를 구축하였으며, Fig. 6과 같이 미국과 북미 전역에 대한 염소이온 농축 속도를 데이터베이스화 하여 콘크리트 구조물 수명해석 프로그램인 LIFE 365에 반영하였다. LIFE 365는 염소 농축 속도를 선형으로 간주하되 최대 표면 염소이온량에 도달한 이후부터는 일정해지는 쌍일차 함수로서 침투 해석에 반영하고 있다.

Fig. 7은 3.1절에서 계산한 최대 표면 염소이온량에 도달하

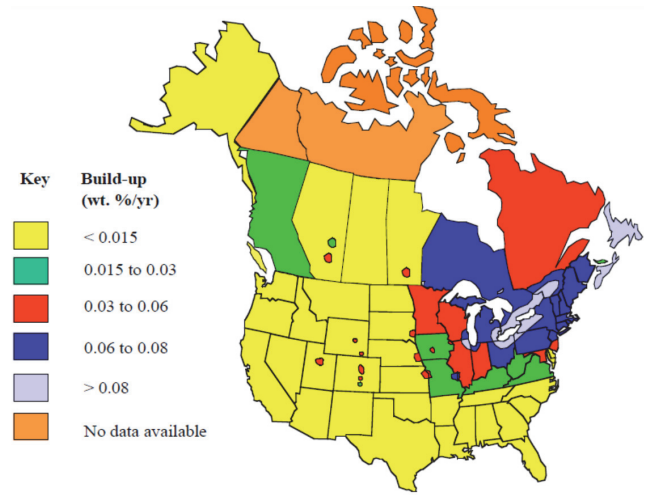


Fig. 6 Chloride levels, by region of North America (Life 365 2018)

Table 3 Surface chloride content ( $C_s$ ) of concrete with time

Researcher	Equation	Notation
Uji et al. (1990)	$C_s(t) = S\sqrt{t}$	(12) $S$ : chloride cohesion coefficient $t$ : time
Weyer et al. (1994)	$C_s(t) = a \cdot t^b$	(13) $a, b$ : constant
CEB(1998)	$C_s(t) = C_o^* (1 - e^{-\alpha t})$	(14) $C_o^*$ : final surface chloride content Takeda: $C_o^* = 0.70$ for tidal zone $C_o^* = 0.22$ for atmospheric zone $C_o^* = 0.63$ for submerged zone Kassir: $C_o^* = 5.34 \text{ kg/m}^3$ (0.227 % by concrete wt.) Kassir: $\alpha = 0.25/\text{year}$
Takeda et al. (1998)		
Kassir and Ghosn (2002)		
Arora et al. (1997)		
Nilsson et al. (1997)	$C_s = A(w/c) + B$	(15) $A$ : constant, 3.667
Wee et al. (1998)	$C_{s,f}(t) = a_1 \cdot \exp\left(-\frac{b_1}{t}\right)$	(16) $a_1$ : 1.9222, $b_1$ : 1.5116, for $W/C$ 0.4 $a_1$ : 2.2138, $b_1$ : 1.5188, for $W/C$ 0.5 $a_1$ : 2.5053, $b_1$ : 1.5243, for $W/C$ 0.6

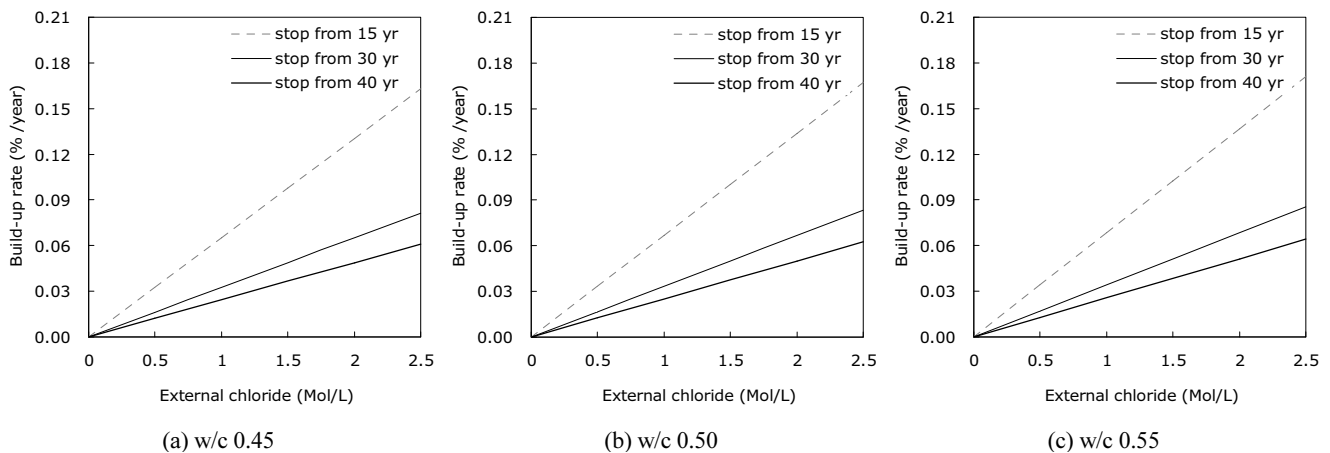


Fig. 7 Chloride build-up rate to form maximum chloride content in concrete with w/c ratio



기까지의 농축속도를 추정한 결과이다. 물-시멘트비에 따른 농축효과는 미비하지만, 최대 표면 염소이온량에 도달하는 시기가 표면 염소이온량을 결정하는데 매우 중요한 것을 알 수 있다. 30년까지 농축속도를 고려하면, 서울시는 외래염소 농도량 1.2 mol일때 북미 환경(Berke 2013)과 유사한 수준이었다.

### 3.3 검증실험 및 서울시 표면 염소이온량

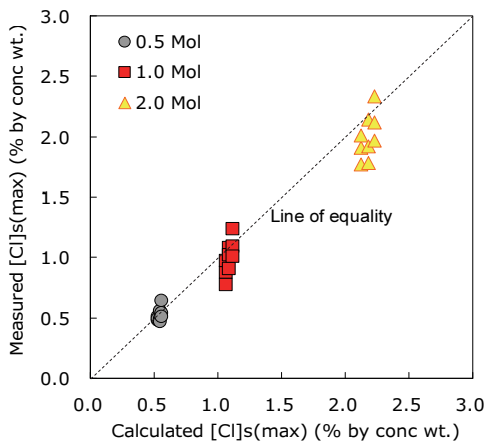
최대 표면 염소이온량의 이론치를 검증하기 위하여 검증실험을 행하였다. Table 4의 배합조건으로 보통포틀랜드 시멘트로 실린더형 콘크리트 시험편을 타설하였다. 28일 양생한 후 콘크리트 최상단을 2mm 두께로 커팅하여 디스크 형태로 제조하였다. 시험편은 염화칼슘 0.5 mol, 1.0 mol, 2.0 mol의 수용액에 22개월 동안 침지하였으며, 이후 디스크를 분쇄 사발 내에서 미분쇄하였다. 미분말은 No. 200 체로 분체한 후, 질산적정법에 의하여 전염소이온량을 추출하였다. 실험 데이터는 동일 배합별로 3개씩 얻었다.

Fig. 8은 최대 표면 염소이온량에 대한 이론치와 실험치를 비교한 결과이다. 물-시멘트비와 무관하게 모든 콘크리트 배합에서 이론치가 해석치의 평균 92%에 상응하며, 두 데이터 간 결정계수는 0.95의 수준이었다. 따라서, 본 해석결과에 대한 타당성은 적절한 수준이다.

다음으로, 제설제에 의한 염소 최대 농축량에 대한 연구자료가 극히 부족하여, 현 최대 표면 염소이온량 해석 방법을 적

**Table 4** Mix proportion of concrete samples

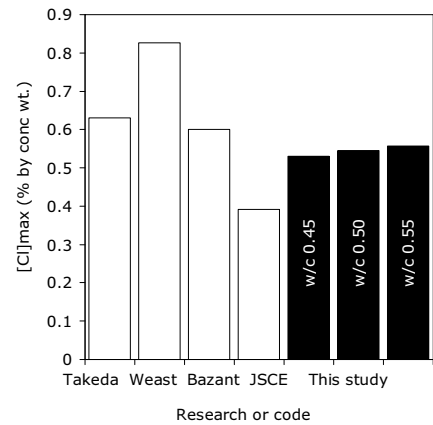
w/c	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )			
	Water	Cement	Sand	Gravel
0.45	185	411	706	1001
0.50	185	370	720	1021
0.55	185	336	732	1038



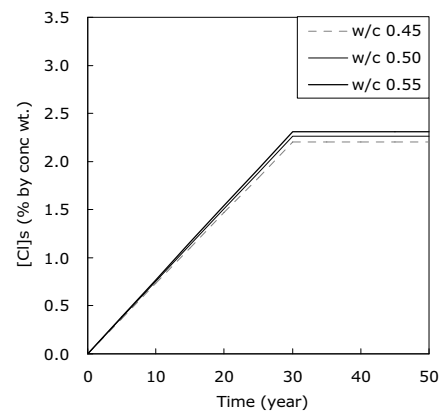
**Fig. 8** Comparison between calculation and experiment

용하여 제설제가 아닌 해수와 농도평형을 이룰 때의 최대치를 기존 해수 계측 연구문헌과 비교한 것이 Fig. 9이다. 물-시멘트비가 높은 콘크리트에서 최대 염소이온량도 증가하는 추이를 보였는데, 이는 높은 배합수량에 따른 공극량이 증가되어 침투된 해수가 저장될 공간이 많기 때문이다. 본 연구에서 제안한 이론적 접근방법과 Takeda(1998)의 실구조물을 대상으로 한 실측치, Weat(1982)의 실험치, Bazant(1979)의 이론치, JSCE(1999)의 제안치와 비교하여 검증한 것으로 본 연구의 계산결과가 Takeda(1998)와 Bazant(1979)의 제안치와 다소 유사한 수준이었다.

한편, 국내에는 염소 농축속도를 다룬 연구자료가 극히 부족하지만, 17년전 서울시 교량을 대상으로 경년별 염소 농도 변화를 실측한 데이터에 의하면(Lee et al., 2003), 초기 10년까지 표면 염소이온량이 빠르게 상승하되, 이후 30년부터 속도가 늦어서 조사공용연수 40년인 구조물에서도 히스테릭한 현상을 보이며 산발적인 형태로 증가하였다. 따라서, 30년까지 염소이온이 농축되며, 이후는 최대 염소이온량에 도달한다고



**Fig. 9** Comparison of maximum chloride content of this study with other literatures



**Fig. 10** Average value of surface chloride content of concrete road in Seoul

가정하여 시간에 따른 표면 염소이온량을 추정된 결과가 Fig. 10이다. 여기서, 기후조건은 서울시내 5년의 누적된 평균 데이터를 활용하였으며, 주간선 및 보조간선도로 비율 25%, 제설제 노출 유효면적을 50%의 수준에서 해석하였다. 앞서 분석 결과와 동일하게 표면 염소이온량의 편차는 물-시멘트비에 따른 크지 않았다. 향후 이 데이터를 서울시내 도로 시설물의 표면 염소이온량으로 간주하여 표면으로부터 깊이에 따라 염소이온 프로파일을 예측하는데 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 4. 결론

- (1) 서울시 도로를 대상으로 적설량에 상응하는 수용액량에 사용된 제설제량이 용해되었을 때 염소 수용액 농도를 산정하였다. 이때, 제설제는 주간선 및 보조간선도로율 17.5 ~ 30%, 살포 영향 유효 면적율은 50 ~ 80% 수준에서 검토하였다. 2017 ~ 2018년은 제설제 사용량이 급증하여 4.73 mol/L의 상당한 고농축 염소 수용액으로 계산되었다. 반면, 2019 ~ 2020년에는 적설량이 비교적 적어서 동일 조건에서 1.61 mol/L의 염소 수용액이 추정되었다. 5년간 데이터를 평균한 결과, 동일 조건에서 3.2 mol/L의 염소 수용액으로 추정되었다.
- (2) 계산된 수용액으로 구체의 표면 염소이온량을 추정하는데 활용하였다. 표면 염소이온량은 계산된 제설제 수용액이 콘크리트 표면에 포화되어 최대값에 상응하는 것으로 간주하였고, 수용액 농도가 가장 중요한 영향 요인이었다. 표면에서 염소 농축속도는 기존 연구를 참고로 30년간 선형으로 지속적으로 농축되고 이후는 최대값에 도달하여 일정하다고 간주하였다.
- (3) 최근 5년간 제설제 수용액의 평균농도, 주간선 및 보조간선도로 비율 25%, 제설제 노출 유효면적을 50%의 수준에서 서울시 도로 시설물의 평균 표면 염소이온량을 해석한 결과, 평균 농축속도는 콘크리트 중량대비 0.073 ~ 0.077%/년, 최대 염소이온량은 2.2 ~ 2.31%로 계산되었다. 본 연구결과는 서울시 제설제 노출 도로 시설물의 열화환경 분석에 유효했다고 생각되며, 향후 종합적인 유지관리 정책에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

본 논문은 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었음 (NRF-2018R1D1A1B07042819).

#### References

1. ASTM C 672 / 672 M (2012), *Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
2. Arora, P., Popov, B. N., Haran, B., Ramasubramanian, M., Popova, S., and White, R. E. (1997), Corrosion Initiation Time of Steel Reinforcement in a Chloride Environment – A One Dimensional Solution, *Corrosion Science*, 39(4), 739-759.
3. Bazant, Z. P. (1979), Physical Model for Steel Corrosion in Concrete Sea Structure – Application, *Journal of Structure, Div., ASCE*, 105(6)1137-1153.
4. Berke, N (2013), *Environmental Degradation of Reinforced Concrete*, Handbook of Environmental Degradation of Materials (eds. Kutz, M.), Third Edition, Elsevier Inc. 3rd Edition.
5. Berke, N. S., and Hicks, M. C. (1992), The Whole Life Cycle of Reinforced Concrete Decks and Marine Piles using Laboratory Diffusion and Corrosion Data,” In *Corrosion Forms and Control for Infrastructures*, Chaker, V. (Eds.), ASTM STP 1137, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 207-231.
6. Bu, Y, Luo, D., Weiss, W. J. (2014), Using Fick’s Second Law and Nernst Plank Approach in Predicting of Chloride Ingress in Concrete Materials, *Advances in Civil Engineering Materials*, 3(1).
7. CEB Belletin d’Information No.243 (1998), Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures, CEB-FIP, May, 142-149.
8. Farnam, Y., Bentz, D., Hampton, A., and Weiss, W. J. (2015a), *Acoustic Emission and Low temperature Calorimetry Study of Freeze and Thaw Behavior in Cementitious Materials Exposed to Sodium Chloride Salts*, Transportation Research Record, 2441, 81-90.
9. Farnam, Y., Dick, S., Wiese A., Davis, J., Bentz, D., and Weiss, W. J. (2015b), The Influence of Calcium Chloride Deicing Salt on Phase Changes and Damage Development in Cementitious Materials, *Cement and Concrete Composites*, 64, 1-15.
10. Greenspan, L. (1997), Humidity Fixed Points of Binary Saturated Aqueous Solutions, *Journal of Research of the National Bureau of Standards A: Physics and Chemistry*, 81, 89-96.
11. Henriksen, C., Ladefoged, L., and Thaulow, N. (1996), *Concrete Specifications for New Bridges, Bridge Management*, 3, Harding, J. E., Parke, G. A. R., and Ryall, M. J. (Eds.), E & FN SPON, 125-137.
12. Jain, J., Olek, J., Janusz, A., and Jozwiak-Niedzwiedzka, D. (2012), Effects of Deicing Salt Solutions on Physical Properties of Pavement Concretes, *Journal of the Transportation Research Board*, 2290, Transportation Research Board of the National Academies, 69-75.
13. JSCE (1999), *Concrete Standard Specification, Part of Durability* (in Japanese language).
14. Kassir, M. K., and Ghosn, M. (2002), Chloride-induced Corrosion of Reinforced Concrete Bridge Decks, *Cement and Concrete Research*, 32, 139-143.
15. Lee, C. S., Yoon, I. S., and Park, J. H. (2003), Prediction of Time to Corrosion for Concrete Bridge Decks Exposed to De-icing Chemicals, *Journal of Korea Concrete Institute*, 15(4), 610-618.
16. Life-365 Consortium III (2018), *Life-365 Service Life Prediction*



*Model and Computer Program for Predicting the Service Life and Life-Cycle Cost of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides*, Version 2.2.3, 70.

17. MTO Test Method LS-412 (1997), *Method of Test for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals*, Ministry of Transportation, Ontario.
18. Nilsson, L.-O., Sandberg, P., Poulsen, E., Tang, L., and Anderson, A. (1997), *A System of Estimation of Chloride Ingress into Background*, Frederiksen, J. M. (Eds.), HETEK-Report No.83, Danish Road Directorate, Copenhagen.
19. Peterson, K., Julio-Betancourt, Sutter, L., Hooton, D., Dam, T.V., Johnson, D., (2013), Observations of Chloride Ingress and Calcium Oxychloride Formation in Laboratory Concrete and Mortar at 5 °C, *Cement and Concrete Research*, 45(1), 79-90.
20. RILEM TC 117-FDC (1996), CDF Test – Test Method for the Freeze-Thaw Resistance of Concrete- Tests with Sodium Chloride Solution (CDF), prepared by Setzer, M. J., Fagerlund, G., and Janssen, D. J., *Materials and Structures*, Vol.29, pp.523-528.
21. Seoul Safety General Office (2020), *Promotion Results of Snow Removal for 2019/2020*, Department of Road Maintenance, Seoul Metropolitan Government, No.4988 (in Korean).
22. Suraneni, S., Azad, V. J., Isgor, O. B., Weiss, W. J. (2016), Calcium Oxychloride Formation in Paste Containing Supplementary Cementitious materials: Thoughts on the Role of Cement and Supplementary Cementitious Materials Reactivity, *RILEM Technical Letters*, 1, 24-30.
23. Svensk Standard SS 13 72 44 (2005), *Concrete Testing –Hardened Concrete –Scaling at Freezing*, Swedish Standards Institute.
24. Takeda, N., Sogo, S., Sakoda, S., and Idemitsu, T. (1998), An Experimental Study on Penetration of Chloride Ions into Concrete and Corrosion of Reinforcing Bars in Various Marine Environments,” *Journal of JSCE*, 40(599).
25. Taylor, P., Sutter, L., Weiss, W. J. (2012), *Investigation of Deterioration of Joints in Concrete Pavements*, Report in Trans Project 09-361.
26. Troive, S., Optimum of LCC of Concrete Bridges, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
27. Uji, K., Matsudaka, Y., and Maruya, T. (1990), Formulation of an Equation for Surface Chloride Content of Concrete Due to Permeation of Chloride, *Corrosion of Reinforcement in Concrete*, Page, C. L., Treadaway, K. W., Page, J. V., and Bamforth, P. B. (Eds.), Elsevier Applied Science, New York, 258-267.
28. Valenza II, J. K., Scherer, G. W. (2006), Mechanism for Salt Scaling, *Journal of American Ceramic Society*, 84(4), 1161-1179.
29. Van Breugel, K. (1991), Simulation of Hydration and Formation of Structures in Hardening Cement-Based Materials, Ph.D Dissertation, TU Delft, the Netherlands.
30. Villani, C., Spragg, R., Pour-Ghaz, M., Weiss, W. J. (2014 a), The Influence of Pore Solutions Properties on Drying in Cementitious Materials,” *Journal of the American Ceramic Society*, 97(2), 386-393.
31. Villani, C., Nantung, T. E., Weiss, W. J. (2014 b), The Influence of De-icing Salt Exposure on the Gas Transport in Cementitious Materials, *Construction and Building Materials*, 67, Part A, 107-114..
32. Vu, K. A. T., and Stewart M. G. (2000), Structural Reliability of Concrete Bridges including Improved Chloride-induced Corrosion Models, *Structure Safety*, 22(4), 313-333.
33. Weast, R. C., and Astle, M. J. (Eds.) (1982), *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 63<sup>rd</sup>, pp.299, CRC Press, Boca Raton, FL, F-154.
34. Wee, T. H., Wong, S. F., Swaddiwudhipong, S., and Lee, S. L. (1998), A Prediction Method of Long-Term Chloride Concentration Profiles in Hardened Cement Matrix Materials, *ACI Materials Journal*, 94(6), November-December, 565-576.
35. Weyers, R. E., Fitch, M. G., Laren, E. P., Al-Quadi, I. L., Chamberlin, W. P., and Hoffman, P. C. (1992), *Service Life Estimates*, SHRP-S-XXX, SHRP, National Research Council, Washington D. C.
36. Weyers, R. E., Fitch Michael, G., Larsen Erin, P., Al-Qadi Imad, L., Chamberlin, W. P., and Hoffman, P. C. (1994), *Concrete Bridge Protection and Rehabilitation: Chemical and Physical Techniques*, *Service Life Estimates*, SHRP-S-668, Strategic Highway Research Program, Washington, 155-164.
37. Seoul metropolitan government (2020), (website) <http://data.seoul.go.kr/dataList/251/C/2/datasetView.do>
38. Yoon, I. S., and Nam, J. W. (2014), Influence of Chloride Content on Electrical Resistivity in Concrete, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 18(6), 90-96.

Received : 07/20/2021

Revised : 11/01/2021

Accepted : 11/23/2021

**요 지** : 제설제는 동절기 도로 위의 눈을 녹이기 위하여 사용되고 있으나, 서울과 같은 대도시에서 교통이 밀집한 도로 시설물의 열화를 촉진시키는 주요 요인 중의 하나이다. 도로 시설물의 합리적인 유지관리 전략을 수립하기 위하여 제설제에 노출된 도로 시설물의 환경분석이 필요하다. 본 연구는 서울시의 적설량 및 사용된 제설제량을 토대로 외래 염소농도를 계산하였다. 평균 표면 염소이온량을 구하고자 서울시의 5년간 기후환경 및 제설제 사용량을 이용하였으며, 주간선 및 보조간선을 17.5 ~ 30%, 제설제 노출 유효면적을 50 ~ 80% 수준에서 검토하였는데, 농축 속도는 0.073 ~ 0.077%/년, 최대 표면 염소이온량은 콘크리트 중량대비 2.2 ~ 2.31% 수준이었다. 본 연구결과는 염소이온 프로파일의 예측 또는 콘크리트 구조체의 화학적 부식정도 등으로 종합적인 유지관리 대책을 수립하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**핵심용어** : 제설제, 외래염소농도, 표면염소이온량, 열화, 염소농축속도