

## 동절기 제설제 사용에 대한 고속도로 교량의 내구수명 평가

# Estimation of Service Life for Expressway Bridge Subjected to Chloride Ingress from De-icer

Honam Lee<sup>a,\*</sup>, Chanki Jeon<sup>b,1</sup>, Juho Kim<sup>c,2</sup>, Jaeyoung Shim<sup>d,3</sup>, Inkyu Jeon<sup>e,4</sup>

*a* 116-1103, e-Pyeonghansang Apt, 10, Geongeon 8-gil, Sangrok-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do, 15521, Republic of Korea

*b* Department of Urban & Environment Engineering, Incheon National University, 119 Academy-ro Yeonsu-gu, Incheon 406-772, Republic of Korea

*c* Department of Urban & Environment Engineering, Incheon National University, 119 Academy-ro Yeonsu-gu, Incheon 406-772, Republic of Korea

*d* 105-311, Useong Apt, 28, Bakdal-ro 498beon-gil, Manan-gu, Anyang-si, Gyeonggi-do, 14008, Republic of Korea

*e* 324-1303, Dangkok Maeul World Meridian Apt., Pungmu-dong, Gimpo-si, Gyeonggi-do, 415-750, Republic of Korea

### ABSTRACT

This paper aims to estimate the service life of the target bridge structures subjected to chloride ingress from de-icer, which is used for safety of vehicles in winter, by investigating the chloride ingress into concrete. In this study, the 10-year-old bridge structures were investigated by measuring the chloride along the depth from the exposed surface to derive the surface chloride concentration and the diffusion coefficient for the prediction of service life. The service life of each measured point on the structures were estimated with the surface chloride concentration and the diffusion coefficient by using Life-365 software. As a result, it was estimated for all measured points to have over 100-year service life. Furthermore, the diffusion coefficient and the service life from the measured data were compared to another method calculated with the concrete mix, considering the time dependency of diffusion coefficient.

### KEYWORDS

De-icer  
Chloride Attack  
Prediction of Service Life  
Diffusion Coefficient

본 연구에서는 동절기 교통안전을 위해 교량 구조물에 사용되는 제설제에 의한 염화물 침투 특성을 조사하여 사용수명을 평가하기 위해 수행되었다. 이 연구에서는 준공 후 공용기간이 약 10년이 경과한 10개 교량의 지점에서 깊이별 염화물 농도 분포를 조사하여 제설제에 의한 염해를 예측하기 위한 표면 염화물 농도와 확산계수를 도출하였다. 얻어진 정보를 바탕으로 Life-365 프로그램을 이용하여 각 지점의 사용수명을 평가하였다. 대상 교량의 사용수명 평가 결과 10개 지점 모두 100년 이상의 사용수명을 가질 것으로 판단되었다. 추가적으로 콘크리트의 배합에 기인한 확산계수를 구하여 제설제에 의한 염해와 해수에 의한 염해의 경우에 대해 확산특성을 비교 분석하고 사용수명을 평가하였다.

제설제  
염해  
사용수명 예측  
확산계수

© 2015 Korea Society of Disaster Information All rights reserved

\* Corresponding author. Tel. 82-10-5449-4894. Fax. 82-32-835-4939. Email. [ihonami@naver.com](mailto:ihonami@naver.com)

1 Tel. 82-32-835-8776. Email. [johnland@incheon.ac.kr](mailto:johnland@incheon.ac.kr)  
2 Tel. 82-32-835-4550. Email. [kimjuho1987@incheon.ac.kr](mailto:kimjuho1987@incheon.ac.kr)  
3 Tel. 82-10-3350-6352. Email. [ibytech@yahoo.co.kr](mailto:ibytech@yahoo.co.kr)  
4 Tel. 82-10-9029-2029. Email. [inkyubears@hanmail.net](mailto:inkyubears@hanmail.net)

### ARTICLE HISTORY

Received Nov. 05, 2015  
Revised Dec. 02, 2015  
Accepted Dec. 24, 2015

## 1. 서론

해발이 높고, 강설일수가 많고, 적설량이 많은 지역의 고속도로에서는 차량의 안전 확보를 위하여 제설제가 많이 사용된다. 이러한 지역에서는 콘크리트가 염해와 동결염해에 직접적으로 노출되어 콘크리트의 열화가 가속화될 수 있다. 콘크리트 내의 철근 부식을 야기할 수 있는 염화물 이온의 침투원은 해수와 제설제로 분류할 수 있다. 해수에 의한 염해는 해수의 직/간접적인 접촉에 의해 콘크리트 표면으로부터 지속적으로 내부로 침투하는 것이다. 반면에 제설제에 의한 염해는 동절기에 사용되는 염화칼슘이나 염화나트륨에 의해 특정 시기에 한정적으로 유입된다. 또한 해수에 의한 침투는 일반적으로 콘크리트가 포화된 상태로 유입되는 반면 제설제에 의한 경우에는 불포화상태에서 유입된다.

제설제가 사용되는 도로구조물에서는 동해와 제설제에 의한 염해가 복합적으로 작용하여 열화가 촉진될 것에 대비한 배합설계 및 시공 상 필요한 조치에 대하여 제시되고 있다. 또한 염화물 이온을 함유하고 있는 제설제에 노출된 콘크리트에서 동결염해가 복합적으로 작용함에 따라 콘크리트 내부의 공극구조 및 화학성분을 변화시켜 조기열화를 야기할 수 있다(김홍삼 등, 2013). 따라서 제설제가 사용되는 구조물의 환경조건을 분석하여 내구성 평가를 수행하는 것이 필요하다.

그러나 국내에서는 해수에 의한 염해 내구성에 관한 연구는 많이 수행되어 왔으나, 제설제 사용에 따른 사용수명을 평가하기 위한 연구는 거의 행해지지 않았다.

스웨덴을 비롯한 유럽에서는 장기 모니터링을 통해 실측 데이터를 확보하여 ERFC(Error-Function Complement) model, DuraCrete model, ClinConc model을 사용하여 사용수명을 예측하기 위한 연구가 시도되고 있다(Maage et al., 1995; DuraCrete, 2000; fib, 2006; NordTest, 1999; Tang, 2007, 2008). 3가지 모델 모두 해수에 의한 내구성 평가 프로그램으로서 염화물이온이 일정하게 공급되는 해양 침지 환경을 조건으로 개발된 것이었으며, 탄산화나 수산화이온의 침출은 배제되었다. 제설제에 의한 염해를 평가함에 있어 ERFC model에서는 염화물이온의 침투가 현저하게 과대 평가되는 경향이 나타났으며, DuraCrete model에서는 입력 변수를 적절하게 선정할 경우에는 상당히 합리적인 결과를 나타냈지만, 다소 과소평가되는 경향이 있었다. 마지막으로 ClinConc model에서는 차량의 통행량이 많은 경우에 예측이 잘 맞는 것으로 나타났다(Tang and Lindvall, 2013).

이 연구에서는 한국도로공사 ○○본부 관내 10개의 대상 구조물에 대한 연평균 기온 변화와 제설제 사용량을 조사하고, 교량 상부 슬래브의 깊이별 염화물 분포를 측정하였다. 조사된 염화물 분포를 통해 보정된 확산계수를 산출하고 이를 바탕으로 Life-365 프로그램을 이용하여 대상 환경조건에서의 염화물 이온의 침투를 예측하고 사용수명을 평가하였다.

## 2. 환경조건 및 콘크리트 내 염화물 농도 분포

### 2.1 기온변화

염화물의 확산계수는 주로 공극률, 공극의 포화도, 공극 구조에 의한 영향이 지배적이다. 따라서 공극 생성과 연관이 있는 상대습도, 온도, 재령 등에 의해 큰 영향을 받는다. 또한 콘크리트의 염화물 침투성을 예측하기 위해서도 염화물 노출 조건과 기온 변화 이력이 고려되어야 한다. 우리나라는 4계절이 비교적 명확하게 구분되어 하절기에는 평균 25℃ 이상의 고온이 유지되며, 동절기에는 평균 0℃ 이하의 저온이 유지된다. 조사 대상 지역의 5년간 월별 평균 기온은 Fig. 1과 같다. 1월에 평균기온이 가장 낮으며, 8월에 평균기온이 가장 높다. 동절기 동안의 평균기온은 거의 0℃ 내외이다. 제설제가 사용되는 기간은 동절기로 국한되며, 염화물 침투 또한 동절기를 전후하여 집중적으로 발생할 것이다. 그러나 사용수명 평가를 위해 동절기 동안 발생한 염화물의 침투를 Fig.1과 같은 기온이 변화는 1년 동안에 발생한 것으로 가정하여 사용수명 평가를 수행하였다.

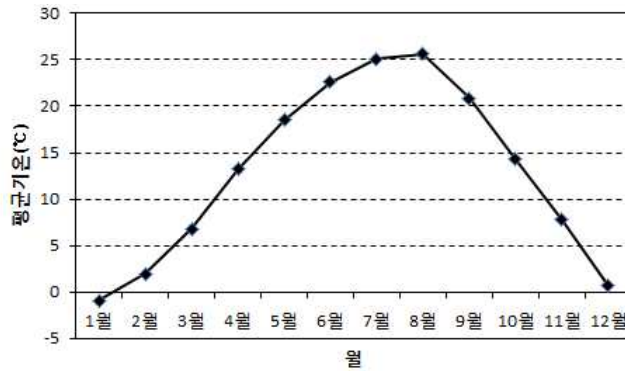


Fig. 1 Monthly average temperature in the target area(Weather yearbook)

### 2.2 콘크리트 내 염화물 농도 측정

10개의 대상 교량 상판에서 직경 100mm의 코어를 3개소씩 채취하여 깊이별 염화물 농도 분포를 측정하였다. 코어 채취 시 콘크리트용 코어 드릴을 사용하였으며, 채취한 코어의 표면 수분을 제거하고 폴리에틸렌 보호막으로 콘크리트 내부의 수분 이동을 억제하였다. 코어를 깊이 방향으로 10mm 간격으로 절단하여 쇠절구에 넣고 시료의 미분말로 분쇄하여 질산(1 : 6)을 가하여 전 염화물 농도를 Orion EA940 pH/ISE meter가 부착된 Thermo Scientific Orion 960을 이용하여 측정하였다.

Table 1에 나타난 깊이별 염화물 이온 농도 분포는 대상 교량의 공용기간 10년이 경과된 시점에서 측정된 것이다. 10개 지점 모두 철근 깊이에서 철근부식 임계염화물 농도인 결합재 중량비 0.4%에 해당되는 1.57kg/m<sup>3</sup>에 크게 못 미치고 있다. 따라서 현재는 철근 부식의 위험이 없는 것으로 판단된다. 그러나 지속적인 제설제의 사용으로 열화가 진행될 것이며, 동결/융해의 복합열화와 콘크리트 피복의 손상으로 인해 열화가 가속화될 수 있을 것이다. 이 연구에서는 동결/융해에 의한 피복 손상은 배제하고, 제설제를 사용한 경우에 발생하는 염화물 침투를 예측하여 사용수명을 평가하였다.



Fig. 2 Core samples of the highway upper surface



Fig. 3 Measurement of the thickness of the cloth after core sampling

Table 1 Measurement of depth another chloride ion concentration

구 분(깊이)		A교	B교	C교	D교	E교	F교	G교	H교	I교	J교
염화물 이온 농도 (kg/m <sup>3</sup> )	0~10 mm	1.338	0.405	0.663	0.441	0.712	1.05	0.857	0.729	1.148	1.813
	10~20 mm	0.286	0.305	0.253	0.208	0.674	0.351	0.613	0.648	0.941	0.775
	20~피복 mm	0.267	0.284	0.257	0.195	0.286	0.289	0.421	0.273	0.558	0.772

※ 대상교량의 설계도면 및 실측자료를 분석한 결과 바닥판 상면 콘크리트의 피복두께는 30~40mm로 조사됨.

염화물 이온 농도 측정 결과를 바탕으로 Fick의 제2법칙을 이용하여 콘크리트 내 염화물 이온 농도 분포를 예측하면 Fig. 4와 같다. 10개의 측정교량에서 15mm 깊이까지는 염화물 농도에 다소 차이가 있으나, 그 이후에는 약 1.0kg/m<sup>3</sup> 이하로 비교적 차이가 크지 않은 것으로 나타났으며 콘크리트 내부로 들어갈수록 수렴하는 것으로 나타났다.

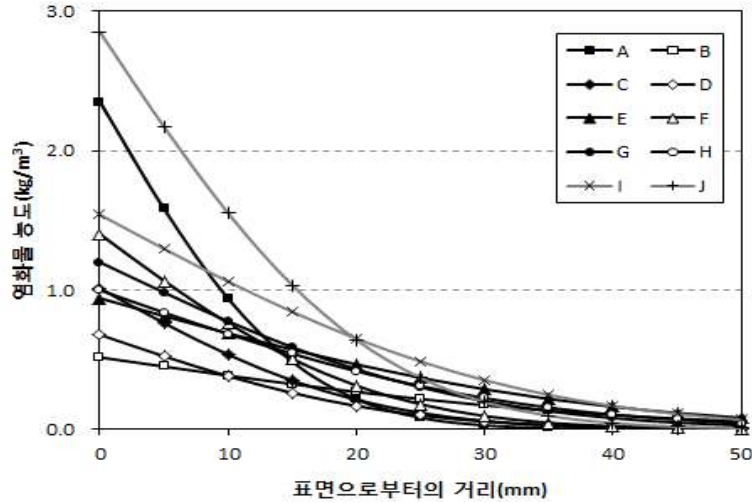


Fig. 4 Chloride concentration distribution

### 3. 염화물 침투 특성

#### 3.1 표면 염화물 농도

표면 염화물 농도는 Fig. 5에서와 같이 약 0.52~2.85kg/m<sup>3</sup>의 범위에 있으며, 평균 1.35kg/m<sup>3</sup>로 유추되었다. 다만 A지점과 J지점은 표면 염화물 농도가 각각 2.35kg/m<sup>3</sup>, 2.85kg/m<sup>3</sup>로 다른 측정지점에 비해 약 2배가량 높게 나타났다. 해수 노출 환경에 비하면 상대적으로 낮은 수준의 표면 염화물 농도이다. 이는 제설제 사용으로 인해 동절기 동안 집중적으로 발생한 염화물의 침투를 1년 동안 발생한 것으로 가정한 것에 기인한 것으로 판단된다. 실제로 동절기 동안 제설제에 의해 염해를 받는 기간 동안에는 더 높은 표면 염화물 농도를 가질 것이지만 사용수명을 평가하기 위해 1년 동안의 지속적인 염화물 침투를 가정한 것에는 무리가 없을 것이다.

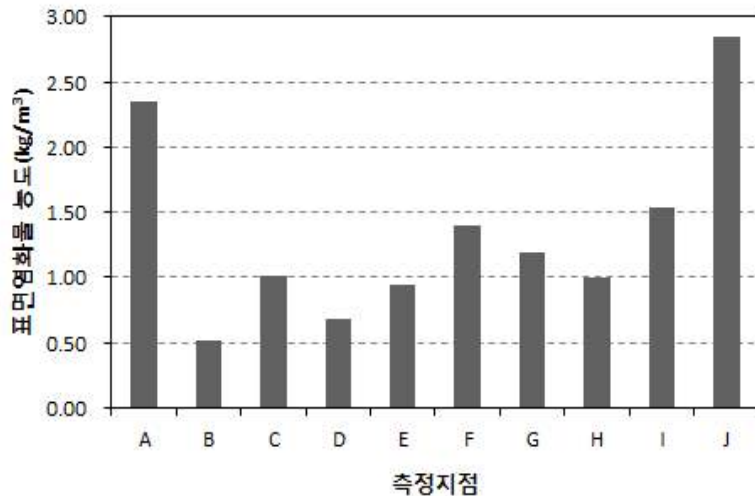


Fig. 5 Surface chloride concentration

### 3.2 확산계수

Fig. 6에서 나타난 것과 같이 측정지점 B, E에서는 확산계수가 상대적으로 높아 각각  $1.52 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ ,  $1.35 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$  이었다. 10개 측정지점의 평균 확산계수는  $7.52 \times 10^{-13} \text{m}^2/\text{s}$ 이었다. 콘크리트의 확산계수는 시멘트의 수화반응이 진행됨에 따라 감소하게 된다. Fig. 7은 각각의 확산계수에 대해 시간의존성을 나타낸 것이다. 측정된 염화물 이온 분포로부터 구한 확산계수는 재령 10년에서의 확산계수이므로 다음의 식 (1)에 의해 28일 확산계수를 구한 후 시간 경과에 따른 확산계수의 변화를 도출하였다.

$$D(t) = D_{ref} \cdot \left( \frac{t_{ref}}{t} \right)^m \quad (\text{Life-365, 2013}) \quad (1)$$

여기서,  $D(t)$ 는 시간  $t$ 에서의 확산계수,  $D_{ref}$ 는 콘크리트 재령 28일에서의 확산계수,  $t$ 는 시간,  $t_{ref}$ 는 콘크리트 재령 28일,  $m$ 은 실험상수로서 혼화재의 사용에 따라 변한다. 30년까지는 시간 경과에 따라 감소하지만 그 이후에는 일정한 것으로 가정하고 있다.

$$m = 0.2 + 0.4(\%FA/50 + \%SG/70) \quad (\text{Life-365, 2013}) \quad (2)$$

여기서, FA는 플라이애쉬의 치환율(%), SG는 슬래그의 치환율(%)을 나타내며, 플라이애쉬인 경우 50%, 슬래그인 경우 70%를 상한으로 한다. 대상 교량에서는 플라이애쉬를 20% 치환하여 이 연구에서 확산계수의 시간의존적 특성을 반영함에 있어  $m$ 값은 0.36을 사용하였다.

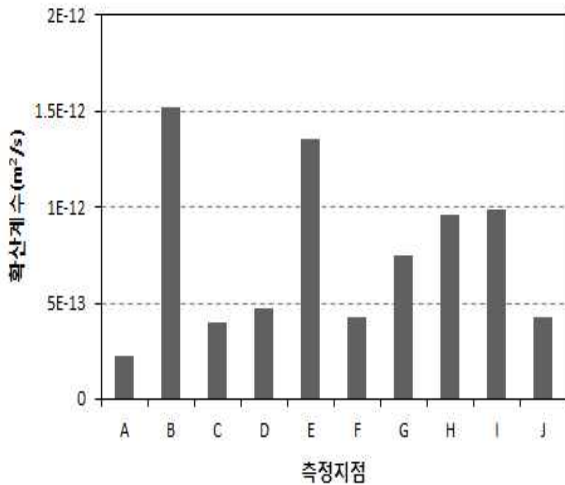


Fig. 6. Diffusion coefficient from 10 years

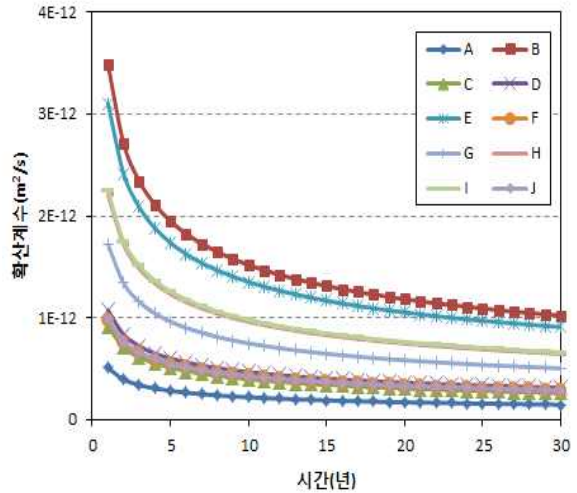


Fig. 7. Time-dependent diffusion coefficient

대상 교량의 제설제에 의한 염화물 침투에 의한 염화물 분포로부터 얻어진 재령 10년에서의 평균 확산계수는  $7.52 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ 이었으며, 식 (1)을 이용하여 28일 평균 확산계수는  $4.34 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ 이었다. 이 값은 앞서 가정된 것과 같이 동결기 동안에 발생된 침투를 1년 동안 평균적으로 발생한 것으로 간주하여 구한 것이다. 반면에 콘크리트의 배합을 바탕으로 구한 28일 확산계수는  $2.40 \times 10^{-11} \text{m}^2/\text{s}$ 이었으며 재령 10년에서의 확산계수는  $4.16 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ 이었다. 제설제에 의해 침투된 경우의 확산계수는 콘크리트의 배합에 의해 구한 확산계수에 약 18%에 해당되는 값이다. 따라서 제설제에 의해 단기간에 발생한 염화물 침투를 환산하면 본래 콘크리트의 확산계수의 약 1/5이 되는 것으로 간주하여 사용수명 평가가 가능할 것이다.



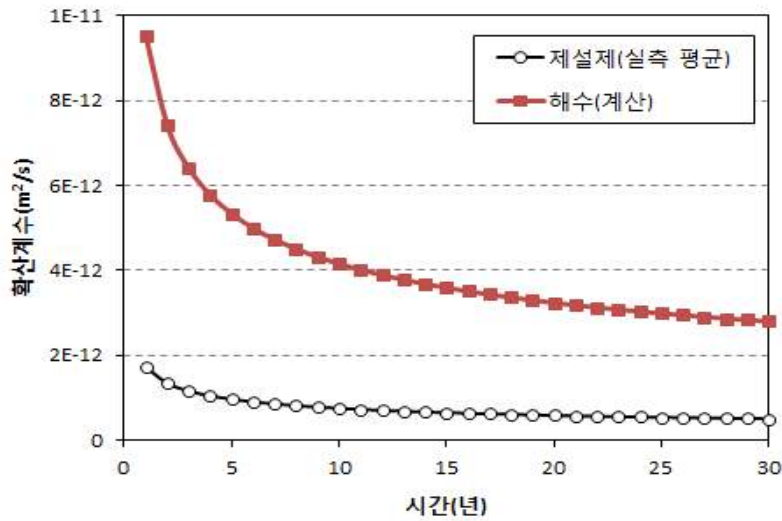


Fig. 8 Time-dependence of the diffusion coefficient due to seawater of snow removal agent

#### 4. 사용수명 평가

##### 4.1 대상 교량의 사용수명 평가

철근 깊이에서의 염화물 농도가 철근부식 임계 염화물 농도에 도달하면 철근 부식이 개시함과 동시에 이 때를 사용수명이 종료되는 것으로 간주하였다. 따라서 사용수명 평가를 위해서는 철근 부식 임계 염화물 농도를 설정하는 것이 필요하다. 국내에서는 철근부식 임계 염화물 농도는 결합재 중량비 0.4%로 제시되어 있다(콘크리트표준시방서 해설, 2009). 대상 교량에 사용된 콘크리트의 단위 수량은  $392\text{kg/m}^3$ 이었다. 따라서 철근부식 임계 염화물 농도를 구하면  $1.57\text{kg/m}^3$ 이다. 따라서 앞서 구한 각각의 조사지점의 표면 염화물 농도와 확산계수를 사용하여 Life-365로 사용수명을 평가하였다. 사용수명 평가 시 시간의존적 확산계수를 이용하였다. 사용수명 예측 결과는 Fig 9와 같다. 10개의 조사 지점 중 지점 J에서 다른 지점에 비해 철근 깊이에서 상대적으로 높은 염화물 농도를 가질 것으로 예측되었다. 그러나 10개 지점 모두 100년 이상의 사용수명을 가질 것으로 예측되었다.

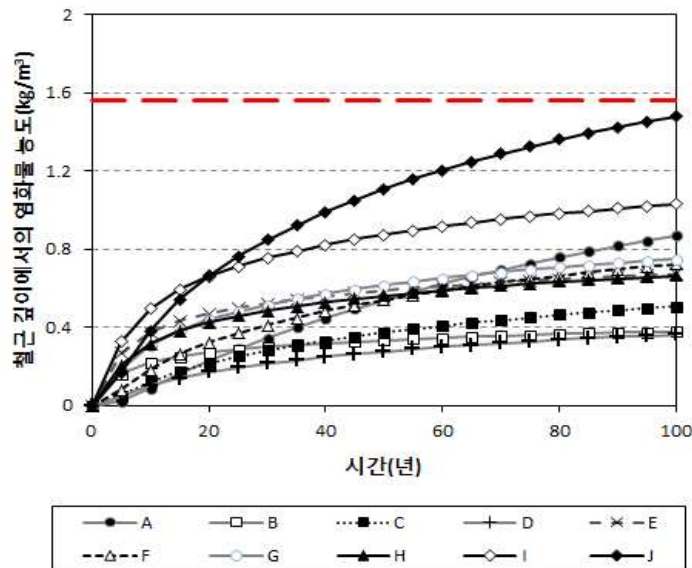


Fig. 9 Life-time evaluation

Fig. 10은 제설제로 인한 염화물 침투와 해수로 인한 염화물 침투를 예측하여 사용수명을 평가하여 비교한 것이다. 여기서 제설제에 의한 염화물 침투는 이 연구에서 10개의 지점을 대상으로 조사한 염화물 분포를 이용하여 구한 평균 표면 염화물 농도와 평균 확산계수를 이용한 것이고, 해수에 의한 염화물 침투는 콘크리트의 배합으로부터 추정된 확산계수를 이용한 것이다. 제설제의 사용으로 인한 염화물 침투는 해수에 의한 침투에 비해 약 18%에 해당되는 확산계수를 가지므로, 사용수명은 상대적으로 더 길어진다. 그러나 두 경우 모두 100년 이상의 사용수명을 갖는 것으로 예측되었다.

다만 제설제에 의한 염해 환경에서는 동결/융해를 수반하는 경우가 많을 것이다. 하지만 동결/융해에 의한 사용수명 평가 방법은 아직 정립되지 않았고, 동결/융해 작용과 복합 열화되는 경우의 사용수명 평가 방법에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것이다. 여기에 동결/융해로 인한 손상을 정량화하여 동결/융해로 콘크리트의 피복 두께 감소 또는 균열 발생으로 인한 침투속도 증가에 대해 확산계수를 보정하기 위한 연구가 선행되어야 할 것이다. 따라서 이 연구에서는 제설제가 사용되는 동절기 동안에 발생하는 염화물 침투를 1년 동안 지속적으로 침투되는 것으로 가정하여 보정된 확산계수를 사용한 사용수명 평가를 시도하였다. 추후 동결/융해에 의한 손상에 따른 확산계수 보정이 이루어진다면 더 합리적인 사용수명 평가가 가능할 것이다.

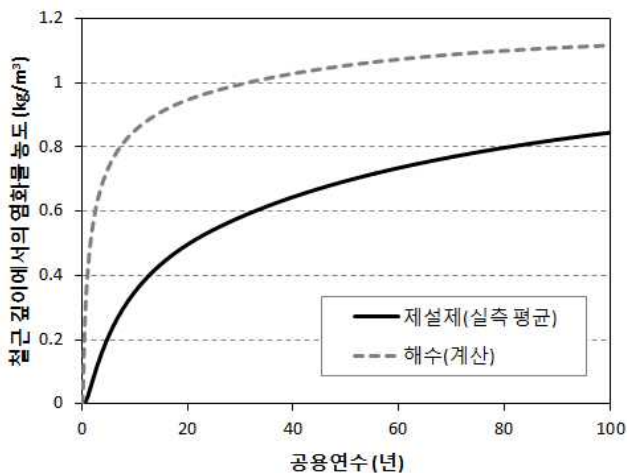


Fig. 10 Comparison of the service life by seawater and snow removal agent

### 5. 결론

이 논문에서는 제설제에 의한 염해에 노출된 교량의 사용수명을 예측하기 위한 연구를 수행하였다. 공용 중인 교량의 깊이별 염화물 농도 분포를 조사 후 이를 바탕으로 표면염화물 농도와 확산계수를 도출하여 사용수명 평가를 수행하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- (1) 대상 교량 10개의 조사 지점에서 모두 철근깊이에서 염화물 농도가 철근부식 임계 염화물 농도에 도달하지 않았다. 따라서 철근 부식이 아직 개시되지 않은 것으로 판단된다.
- (2) 조사 지점의 표면 염화물농도는 약 0.52~2.85kg/m<sup>3</sup>의 범위에 있으며, 평균 1.35kg/m<sup>3</sup>로 유추되었다. 또한 10개 측정지점의 평균 확산계수는 7.52×10<sup>-13</sup>m<sup>2</sup>/s이었다.
- (3) 시간의존적 확산특성을 고려하면 28일 평균 확산계수는 4.34×10<sup>-12</sup>m<sup>2</sup>/s로 계산되었다. 이는 동절기 동안에 발생한 침투를 1년 동안 평균적으로 발생한 것으로 간주하여 구한 것이다. 반면에 콘크리트의 배합을 바탕으로 구한 28일 확산계수는 2.40×10<sup>-11</sup>m<sup>2</sup>/s이었다. 제설제에 의해 침투된 경우의 확산계수는 콘크리트의 배합에 의해 구한 확산계수에 약 18%에 해당되는 값이다.
- (4) 대상 구조물의 단위 결합재량에 근거하여 철근부식 임계 염화물 농도를 구하면 1.57kg/m<sup>3</sup>이다. Life-365 프로그램을 이용하여 사용수명을 평가해 본 결과 10개 지점 모두 100년 이상의 사용수명을 가질 것으로 예측되었다.
- (5) 제설제에 의한 염화물 침투와 해수에 의한 염화물 침투에 대해 사용수명을 평가하여 비교해 본 결과 두 경우 모두 100년 이상의 사용수명을 가지는 것으로 나타났다. 하지만 이는 동결/융해에 대한 복합열화는 배제된 결과로 추후 복합열화에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 2013년도 한국도로공사에서 시행하는 교량 정밀안전진단과업 중 ○○본부에서 자료수집 및 현장시험을 통해 이루어진 것으로, 본 연구를 가능하게 한 공사에 감사드립니다.

## References

- ACI Committee 365 (2001) Service life prediction – state-of-the-art report. Manual of Concrete Practice, ACI 365.1R-00-44.
- Amey, S.L., Johnson, D.A., Miltenberger, M.A., Farzam, H. (1998) "Predicting the service life of concrete marine structures: an environmental methodology" ACI Structural Journal, Vol. 95, No. 2, pp.205-214.
- DuraCrete (2000) 'General guidelines for durability design and redesign', Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures, Report No. 15 in EU-Project(Brite EuRam III) No. BE95-1347, Gouda, The Netherlands.
- Fib (2006) 'Model code for service-life design', fib bulletin, 1st ed., p.34, Federation International du Beton, Lausanne, Switzerland.
- Jeon, C.K., Jeon, J.K., (2013). "A Experimental Study on the Field Application of Concrete with CO<sub>2</sub> Reduction Materials", Journal of Korea Society of Disaster Information, Vol. 9, No. 2, pp.128-136.
- Kim, D.B., Kwon, S.D., An, K.H. (2015) "A Study on the Allowable Crack Width of RC Beam with Corrosive Environment", Journal of Korea Society of Disaster Information, Vol.11, No.2, pp.253-261.
- Korea Concrete Institute (2009) Standard Specification for Concrete commentary. Supplement II-Durability evaluation of concrete Evaluation of Durability.
- Lee, C.S., Yoon, I.S., Park, J.H., (2003). "Prediction of Time to Corrosion for Concrete Bridge Decks Exposed to De-Icing Chemicals " Journal of Korea Concrete Institute, Vol. 15, No. 4, pp.606-614.
- Life-365 user manual (2013) Service life prediction model.
- Maage, M., Helland, S., Poulsen, E., Vennesland, O., Carlsen, J.E. (1996) "Service life prediction of existing concrete structures exposed to marine environment" ACI Materials Journal, Vol. 93, No. 6, pp.1-8.
- Maage, M., Poulsen, E., Vennesland, Ø. and Carlsen, J.E. (1995) 'Service life model for concrete structures exposed to marine environment', LIGHTCON Report No. 2.4, STF70 A94082 SINTEF, Trondheim, Norway
- NordTest (1999) 'Concrete, mortar and cement based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady state migration experiments', NT BUILD 492, Helsinki, Finland.
- Park, C.B., (2001). "The Snowy Road Problem and improvement method", Korean Society of Civil Engineers, Vol. 49, No. 4, pp.49-51.
- Park, S.B., Kim, D.G., (2000). "A Experimental Study on the Chloride Diffusion Properties in Concrete", Journal of Concrete Institute, Vol.12, No.1, pp.33-44.
- Song, H.W., Lee, C.H., Lee, K.C., Kim, J.H., Ann, K.Y., (2008) "Chloride Penetration Resistance of Ternary Blended Concrete and Discussion for Durability ", Journal of Korea Concrete Institute, Vol. 20, No. 4, pp.439-449.
- Tang, L. and Lindvall, Anders, (2013). "Validation of models for prediction of chloride ingress in concrete exposed in de-icing salt road environment" International Journal of Structural Engineering, Vol. 4, pp.86-99.
- Tang, L. (2008) 'Engineering expression of the ClinConc model for prediction of free and total chloride ingress in submerged marine concrete', Cem. Concr. Res., Vol. 38, Nos. 8 - 9, pp.1092 - 1097.
- Tang L (2007) 'Service-life prediction based on the rapid migration test and the ClinConc model', in Baroghel-Bouny, V. et al. (Eds.): RILEM Proceedings PRO 047: 'Performance Based Evaluation and Indicators for Concrete Durability', pp.157 - 164, RILEM Publications.
- Yang, E.I., Kim, M.Y., Park H.G., (2008). "Field Investigation of Chloride Penetration and Evaluation of Corrosion Characteristics for Deicer " The Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 8, No. 6, pp.47-52.
- Yun, D.G., Jeong, J.H., (2006). "Performance and Adequate Usage of Deicing Materials " The Journal of Korean Society of Road Engineers, Vol. 8, No. 1, pp.55-64.