

## 서울시내 콘크리트 교량 바닥판의 제빙화학제 살포로 인한 염소이온 침투의 확률 해석

이 창 수\* · 윤 인 석\*\* · 박 종 혁\*\*\* · 한 재 호\*\*\*\*

### Probabilistic Analysis on Deicing Salt Penetration of Concrete Bridges Decks in Seoul Metropolitan Area

Chang-Soo Lee\* · In-Seok Yoon\*\* · Jong-Hyck Park\*\*\* · Jae-Ho Han\*\*\*\*

**요약 :** 본 연구는 서울시에 위치한 콘크리트 교량 바닥판의 제빙화학제로 인한 열화속도를 추정하기 위하여 제빙화학제 사용현황을 조사하고, 실구조물 조사에 의한 표면 염소이온량 누적정도와 염소이온 확산계수의 확률 분포적 특성을 고려하여 국내 환경에 적합한 내구수명 예측을 수행하였다. 연구결과, 무작위성을 나타내는 표면 염소 이온량과 염소이온 확산계수는 각각 규모 매개변수 0.192, 29.828, 형상 매개변수 7.899, 1.983을 갖는 gamma 분포가 형성되었다. 표면 염소이온량은 평균  $1.5\text{kg/m}^3$ 이며 약 70 %의 확률수준에서  $1\sim 2\text{kg/m}^3$ 까지 농축되었다. 본 연구결과를 종합하여 볼 때, 콘크리트 교량 바닥판의 설계 내구수명이 20년 이상이 되려면 필요한 피복두께는 최소 26 mm 이상으로 시공되어야 하는 것으로 나타났다.

**주제어 :** 제빙화학제, 콘크리트 교량 바닥판, 내구수명 예측, 표면 염소이온량, 염소이온 확산계수

**ABSTRACT :** The major cause of deterioration for the concrete bridge decks exposed to de-icing chemicals would be chloride-induced reinforcement corrosion. Thus, in this paper, in order to predict time to corrode for concrete bridge decks in the urban area, chloride concentration was measured with depth from the surface. A frequency analysis on surface chloride concentration and chloride diffusion coefficient of concrete bridge deck equals 0.192, 29.828 in the scale parameter and 7.899, 1.983 in the shape parameter of gamma distribution. The average value of surface chloride concentration equals  $1.5\text{ kg/m}^3$  and condenses from 1 to  $2\text{ kg/m}^3$  in the level of probability 70 %. From the probabilistic results, it is confirmed that 26mm of minimum cover depth in order to target 20 years over is calculated. The countermeasure strategy to extend the service life of concrete bridge deck exposed to deicing chemicals would be an effective method to increase cover depth and to place high performance concrete, which could lead to reduce the chloride diffusion coefficient and distribution range.

**Key Words :** deicing chemicals, concrete bridge deck, service life prediction, surface chloride concentration, chloride diffusion coefficient

\* 서울시립대학교 토목공학과 교수(Professor, Department of Civil Engineering, The University of Seoul)

\*\* 서울시립대학교 토목공학과 연구원(Researcher, Department of Civil Engineering, The University of Seoul).  
논문 주작성자인.

\*\*\* 서울시립대학교 토목공학과 박사과정(Doctor's Course Student, Department of Civil Engineering, The University of Seoul)

\*\*\*\* 서울시청 치수과 과장(Director, Flood Control Division, Seoul Metropolitan Government)

## I. 서론

도심지에 위치한 도로교는 동절기 교면 위의 얼음을 녹이기 위하여 제빙화학제를 살포하고 있으며, 적설 한랭지의 교면에서 교통안전을 확보하기 위하여 사용량이 꾸준히 증가하고 있다. 그러나 가장 보편적으로 사용되는 제빙화학제인 염화칼슘은 동결융해와 더불어 콘크리트 표면의 스케일링을 유발하고 배수구를 통하여 누수되어 교좌장치를 심각하게 부식시킬 뿐만 아니라 콘크리트 중의 철근위치까지 확산되어 철근의 부식을 위협하는 주요 원인으로 간주되고 있다.(이창수 외, 2000; 콘크리트工學協會, 1999)

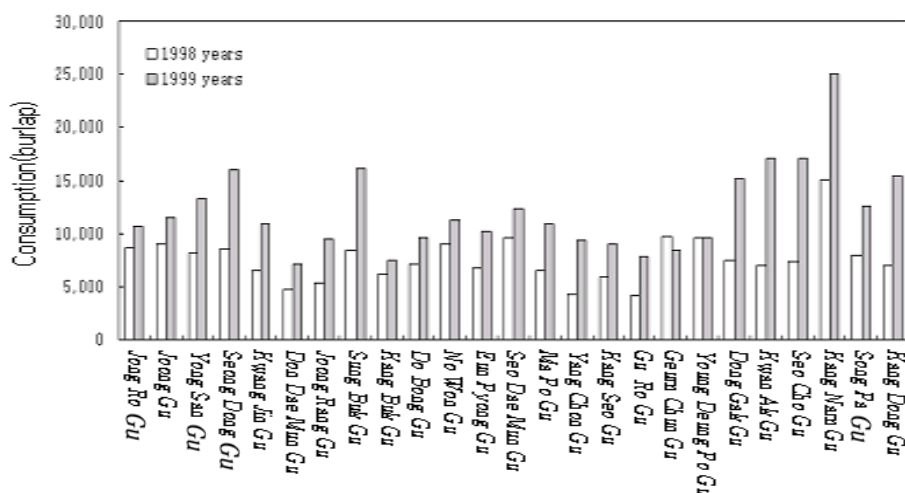
그래서 선진외국에서는 제빙화학제의 침투로 인한 철근부식 시작 시기를 예측하기 위하여 적설량 누적정도를 근거로 한 표면 염소이온량과 염소이온 확산계수를 얻고자 하는 노력이 있었으나, 우리나라의 경우 이에 대한 체계적인 연구가 매우 미흡한 실정이다.

본 연구는 서울시에 위치한 콘크리트 구조물의 제빙화학제로 인한 열화속도를 추정하기 위하여 제빙화학제 사용현황을 조사하고, 실구조물 조사에 의한 표면 염소이온 누적정도와 염소이온 확산계수의 확률 분포적 특성을 고려하여 국내 환경에 적합한 내구수명 예측을 수행하고자 하였다.

## II. 연구개요 및 방법

### 1. 염화칼슘 살포 현황

1990년대 서울시의 연평균 강설량은 18cm로서 미국(뉴욕시)의 강설량인 72cm의 약 1/4배 정도이다. 서울시 도로교에서 사용되고 있는 염화칼슘 사용량은 강설량이 3cm 이하의 경우  $0.02 \sim 0.03 \text{ kg/m}^3$ , 적설량이 3~5cm 이상이면  $0.03 \sim 0.04 \text{ kg/m}^3$  씩 살포하는 것으로 하고 있다. 따라서 염화칼슘 1포대(25kg)당 살포면적이  $500 \sim 1250 \text{ m}^2$  되는 것으로 추정



〈그림 1〉 서울시의 제빙화학제 사용량

된다(서울특별시, 2000).

살포된 염화칼슘의 일부는 콘크리트 표면에 누적되어 표면 염소이온으로 존재하지만, 이 과정에서 매우 큰 불확실성을 갖기 때문에 염화칼슘 농도를 표면 염소이온량 산정에 직접 적용하기는 어렵다. 그래서 본 연구는 현장 조사를 행하여 서울시 실구조물을 대상으로 표면 염소이온량 및 내부 깊이에 대한 염소이온량을 조사한 후, 염소이온 확산계수를 산출하여 확률 변수화하였다.

## 2. 현장조사 방법

콘크리트 교량 바닥판의 표면 염소이온량과 염소이온 확산계수 산정을 위하여 교통량이 빈번할 것으로 판단되는 2등교 이상의 서울시 교량 30개소를 선정하였다. 선정된 교량은 1등교 9개소, 2등교 21개소이며 상부구조 형식은 RC 슬래브교가 7개소, PSC I형교 16개소, RC T형교가 3개소, 라멘교 2개소, 아치교 1개소, PSC 박스교 1개소이다. 경년별 분포상황은 1965년부터 1998년에 준공된 것으로 최고 37년 경과된 교량에 대한 염화물량 측정이 가능하였다. 측정시기는 여름철 우기 이후로 하여 계절변동성을 최소화 하였다. 측정부위는 배수 및 차륜에 의하여 표면 염소이온 농축이 가장 클 것으로 예상되는 교량 바닥판 난간 부위의 콘크리트를 대상으로 1개 구조물 당 총 6개소에서 측정되었다. 시료채취 방법은 깊이에 따른 염소이온 프로파일을 얻기 위하여, 1mm 정도의 깊이마다 시료를 채취할 수 있는 그라인드형 드릴을 사용하여 표면으로부터 10mm 씩

50mm 깊이까지 시료를 채취한 후, JCI-SC4에 의해 수용성 염소이온량을 측정하였다. 측정된 자료는 <표 1>에 의한 표면 염소이온량의 부식 환경 판단과 염소이온 확산계수의 산정 및 적정 확률 분포의 추정에 활용하였다.

<표 1> 표면염소이온량 농도에 따른 부식환경

(Unit :  $\text{kg/m}^3$ )

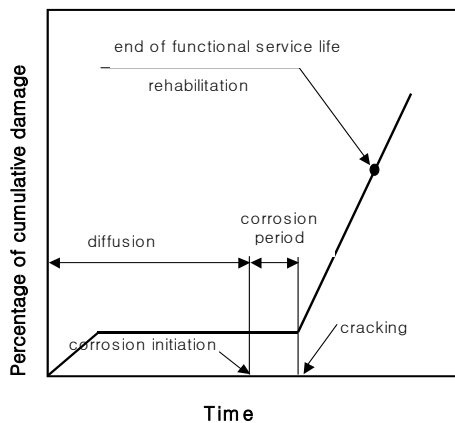
Low	Moderate	High	Severe
$0 < C_s < 2.4$	$2.4 \leq C_s < 4.7$	$4.7 \leq C_s < 5.9$	$5.9 \leq C_s < 8.9$
Mean = 1.8	Mean = 3.5	Mean = 5.3	Mean = 7.4

## 3. 염소이온 침투예측 방법

염소이온에 의한 콘크리트 구조물의 열화는 <그림 2>와 같이 확산기와 부식기로 나누어진다. 확산기는 식 (1)의 Fick의 확산 제2법칙에 의해 염소이온이 콘크리트 내부로 침투하는 시기이며 공학적인 해는 식 (2)와 같다. 염소이온이 침투하여 철근부식을 유발하는 임계 염소이온량에 이르면 부식기가 도래되는데 일반적으로 수십 년에서 수백 년에 해당하는 확산기에 비하여 매우 짧은 시기이므로 본 연구는 확산기만을 고려한 내구수명 예측을 수행하였다(Liu, 1996). 이때 확산기는 콘크리트 교량 바닥판의 단위 시멘트량을  $400 \text{ kg/m}^3$ 으로 가정하고 ACI Committee 201에서 제안된 임계 수용성 염소이온량 0.20%(시멘트 질량대비)에 도달하는 시기로 간주하였다.

확산기의 내구수명을 결정하는 주요 매개변수는 표면 염소이온량  $C_s$ , 피복두께  $x$ , 임계 염소이온량  $C_{cr}$ , 염소이온 확산계수  $D$  등이다. 여기서 표면 염소이온량은 철근 부식 환경의

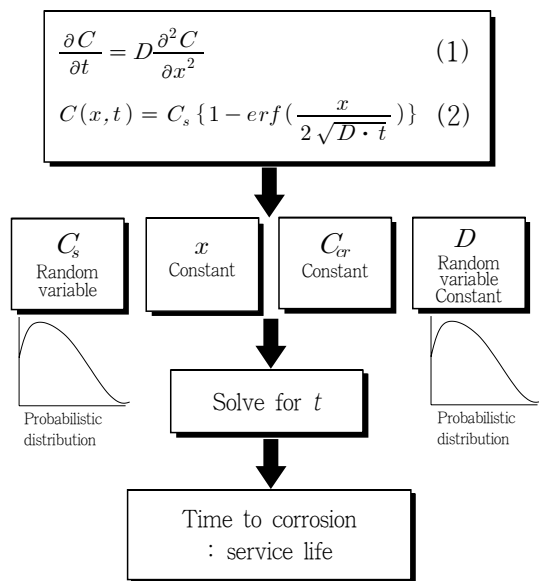
판단지표로서 계절의 변화에 따른 기후조건 및 강설량에 따른 제빙화학제 사용량에 의존하며 염소이온 확산계수는 염소이온 침투 속도와 부식 시작시기를 구성하는 주요 매개변수이다(Weyers et al., 1994; Luciano and Miltenberger, 1999; Thomas, 1999). 그러나 표면 염소이온량과 염소이온 확산계수는 실구조물의 경우, 동일 시방기준과 동일 교량이라도 다양한 범위의 분포를 가지므로, 부식 시작시기 예측을 위한 대표값을 선정하기 곤란하다. 이는 제빙화학제 살포로 인한 콘크리트의 열화가 배합특성 및 시공조건, 시간조건, 온·습도와 유관된 환경적 특성 등과 같이 해수의 침투에 영향을 미치는 변수는 물론 제빙화학제의 살포조건, 적설량, 교통환경 등과 같은 많은 영향인자가 추가되기 때문이다(Zemajtis, 1998).



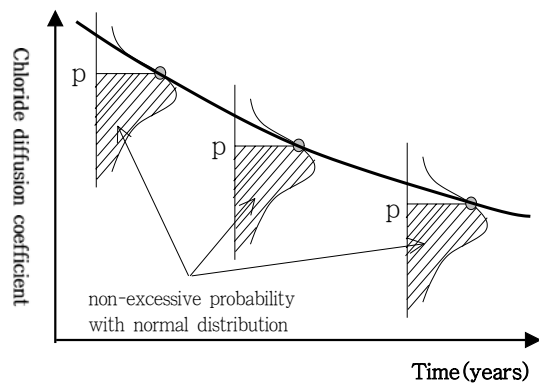
〈그림 2〉 염소이온 침투에 따른 구조물의 열화과정

콘크리트 구조물의 내구수명의 예측방법은 경험에 기초한 방법, 열화 메커니즘에 기초한 촉진실험 방법, 물리적·화학적 성능저하 기구에 기초한 수학적 모델, 확률 및 추계학적

방법 등이 있다(Clifton, 1993). 이 가운데 본 연구는 제빙화학제 살포로 인한 각종 열화 영향인자의 불확실성을 고려하기 위하여 확률통계 및 추계학적 기법으로 표면 염소이온량과 염소이온 확산계수의 적합한 확률 분포형을 도출하여 철근부식이 시작되는 시기를 예측하였다. 본 연구의 흐름은 <그림 3>과 같다.



〈그림 3〉 본 연구의 흐름도



〈그림 4〉 시간경과에 따른 염소이온 확산계수의 확률해석방법

표면 염소이온량과 염소이온 확산계수의 확률 분포 특성을 파악하기 위하여 계수상관법(rank correlation coefficient test, R.C.C.)과 전환법(turning point test, T.P.)을 사용하여 자료의 무작위성을 판단하였다. 적정 확률 분포로는 왜곡현상을 나타낼 수 있는 gamma 분포를 사용하였다. 식 (3)과 같이 2변수 gamma 확률밀도 함수를 따르는 매개변수 추정법은 자료의 크기가 비교적 큰 경우에 가장 효율적인 방법인 최우도법(maximum likelihood method)을 식 (4)와 같이 적용하였고, 추정된 확률분포는 유의 수준 5%에서  $\chi^2$ 검정과 Kolmogorov-Smirnov 검정을 수행하였다(Harold, 1992).

$$f(x) = \frac{1}{\Gamma(\beta)} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\frac{x}{\alpha}\right) \quad (3)$$

여기서,

$\alpha$  : 규모매개변수(scale parameter)

$\beta$  : 형상 매개변수(shape parameter)

$$\frac{\partial \ln L(\theta_i)}{\partial \theta_i} = 0 \quad i = 1, 2, 3, \dots, k \quad (4)$$

여기서,

$\ln(\theta_i)$  : 대수 우도함수(log likelihood function)

$\theta$  : 선정된 확률분포형의 매개변수

$k$  : 선정된 확률분포함수의 매개변수

한편, 염소이온 확산계수는 불규칙적으로 살포되어 무작위성을 나타내는 표면 염소이온량과는 달리 콘크리트 내의 지속적인 수화작용

으로 시간에 따라 서서히 감소하는 경향이 있다. 이를 <그림 4>와 같이 경년에 따른 염소이온 확산계수를 정규분포로 하여 비초과 확률  $P$ 에 해당하는 염소이온 확산계수를 회귀분석함으로써 시간에 따른 염소이온 확산계수의 경시변화를 고려하였다.

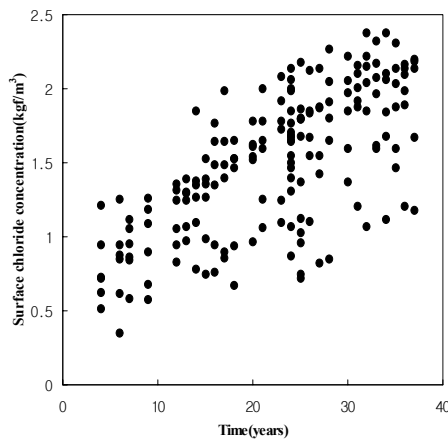
### III. 연구결과 및 분석

#### 1. 표면염소이온량의 분포

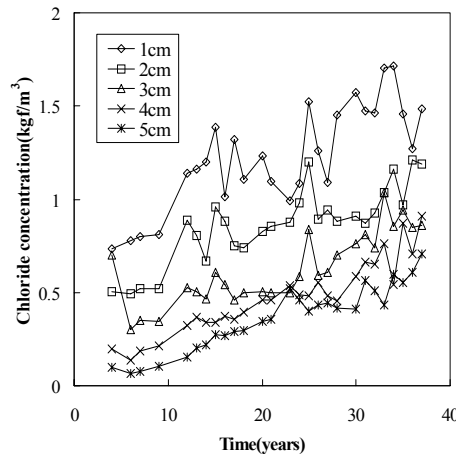
콘크리트 교량 바닥판의 염소이온량 분포를 평가하기 위하여 표면 및 깊이별로 측정된 염소이온량을 <그림 5>, <그림 6>과 같이 나타내었으며, 깊이별 염소이온량은 각 측정 교량에서의 평균값으로 도시하였다.

표면 염소이온량은 전체적으로 경년에 따라서는 증가하였으며, 깊이에 따른 염소이온량은 감소하는 경향을 보였다. 다만, 제빙화학제의 누적에 영향을 미치는 요인들 뿐 아니라 표면 흡수작용, 수분이동, 중성화 등과 같은 콘크리트의 열화상태 및 환경적 미세기후 조건들에 의해서 대체적인 염소이온 침투가 가속화되거나 무작위성을 보였다. <그림 6>에서 서울시의 콘크리트 교량 바닥판에서 검출된 수용성 표면 염소이온량은  $2.5 \text{ kg/m}^3$  이하이며,  $1 \sim 2 \text{ kg/m}^3$  범위에 집중적으로 분포되어 있음을 알 수 있다.

<표 2>는 무작위성을 갖는 표면 염소이온량의 기본통계량, 매개변수 추정량을 분석한 결과로서  $\chi^2$ , K-S 적합도 검정을 모두 통과하였다.



〈그림 5〉 시간에 따른 표면 염소이온량

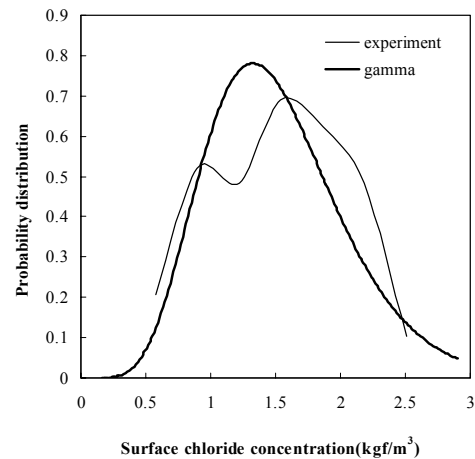


〈그림 6〉 시간경과에 따른 깊이별 염소이온량

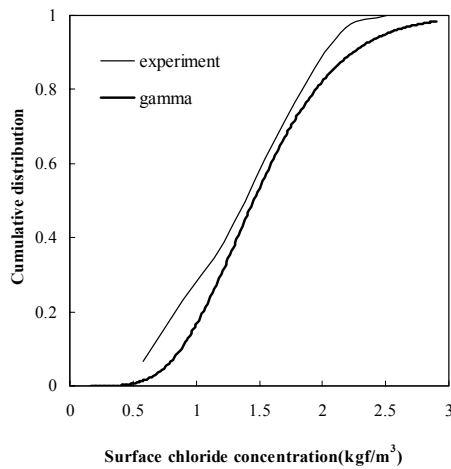
〈표 2〉 표면 염소이온량의 통계결과

Basic statistics	Mean	1.5	Standard deviation	0.5
	Coeff. of variation	0.333	Coeff. of Skewness	-0.165
Parameter estimation	$\alpha$	0.192	$\beta$	7.899
Test of randomness		Computed	Table	Validity
	R.C.C.	1.532	1.991	OK
	T.P.	1.397	1.960	OK
Goodness of fit	$\chi^2$	7.33	9.49	OK
	K-S	0.11	0.13	OK

평균적인 수용성 표면 염소이온량은  $1.5 \text{ kg/m}^3$ , 변동계수는 0.333로서 미국(Hoffman and Weyers, 1994)에서 조사된 표면 염소이온량(전 염화물량)  $3.5 \text{ kg/m}^3$ , 변동계수 0.5보다 다소 작은 편으로 나타났다. 이를 토대로 표면 염소이온량 자료의 빈도해석을 수행하여 〈그림 7〉, 〈그림 8〉과 같은 확률 밀도 함수와 누가 확률함수 분포를 얻었다. 〈그림 7〉에서 분포특성은 평균값이  $1.5 \text{ kg/m}^3$ 으로 나타났으며, 제빙화학제에 의한 표면 염소이온 농축은 대체적으로 70%의 확률 분포를 갖는  $1 \sim 2 \text{ kg/m}^3$  범주에서 형성되었다. 표면 염소이온량으로 부식 환경을 평가하기 위하여 전 염소이온량에 대한 수용성 염소이온량의 고정화율을 약 2배로 가정하면 약  $3 \text{ kg/m}^3$ 으로 환산되며, 이는 〈표 1〉에 의하여 보통 수준의 부식 환경인 것으로 판단된다.



〈그림 7〉 표면 염소이온량의 확률분포



〈그림 8〉 표면 염소이온량의 누적분포

## 2. 염소이온 확산계수의 분포

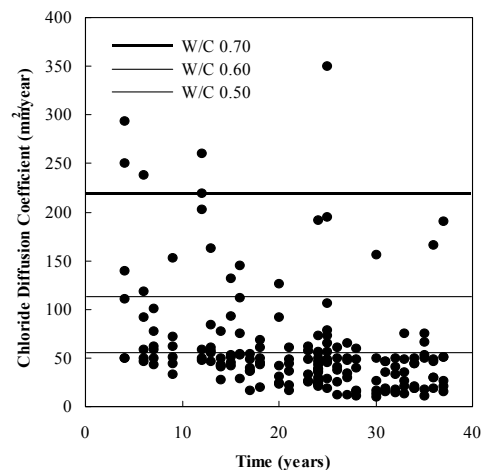
깊이별 염소이온 프로파일로부터 식 (2)에 의하여 염소이온 확산계수를 산출하여 경년별로 나타낸 것이 〈그림 9〉이며, 기본 통계량, 매개변수 추정량, 적합도 검정은 〈표 3〉과 같다.

〈표 3〉 염소이온 확산계수의 통계결과

Basic statistics	Mean	59.2	Standard deviation	52.5
	Coeff. of variation	0.882	Coeff. of Skewness	2.383
Parameter estimation	$\alpha$	29.828	$\beta$	1.983
Test of randomness		Computed	Table	Validity
	R.C.C.	4.121	1.991	not good
Goodness of fit	T.P.	0.842	1.960	OK
	$\chi^2$	12.00	9.49	not good
	K-S	0.12	0.13	OK

평균적인 염소이온 확산계수는  $59.2 \text{ mm}^2/\text{year}$ 로서 미국 교량의 제빙화학제로 인한 염소이온 확산계수인  $63.07 \text{ mm}^2/\text{year}$  보다 다소 작게 산출되었다(McBean and Al-Nassri, 1987).

즉, 서울시의 제빙화학제로 인한 평균적인 표면 염소이온량 및 염소이온 확산계수는 미국보다 다소 낮게 평가되었는데 상대적으로 미국이 국내보다 적설량이 많기 때문에 살포된 제빙화학제량도 더 많은 것이 원인으로 생각된다. 그러나 미국이 국내보다 약 4배의 적설량을 보임에도 불구하고 국내의 교량 바닥판의 확산성과 유사한 수준임을 고려해 볼 때, 적설량 수준에 맞는 적합한 제빙화학제의 살포 및 이에 따른 면밀한 유지관리가 이루어져야 할 것으로 생각된다.



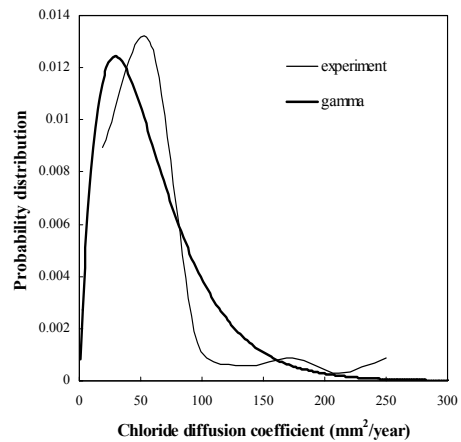
〈그림 9〉 시간경과에 따른 염소이온 확산계수

〈그림 9〉는 경년에 따른 염소이온 확산계수의 분포 특성을 제빙화학제 살포로 인한 물-시멘트비별 염소이온 확산계수의 기존자료(Hobbs, 1998)와 비교한 것이다. 서울시내 교량 바닥판에서 얻은 염소이온 확산계수는 물-시멘트비 50% 미만에서 집중적으로 존재하되 물-시멘트비 70%까지 폭넓게 분포하였다. 한편, 염소이온 확산계수는 경년에 따라 감소하

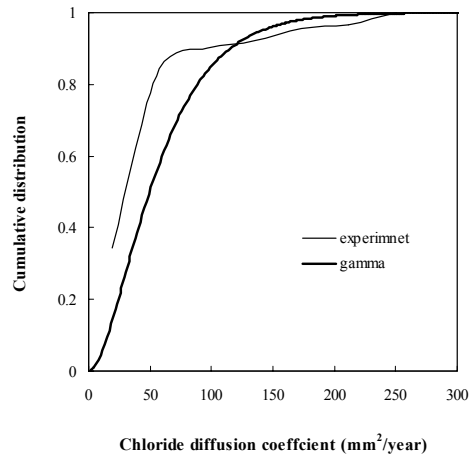
는 추세를 보이고 있는데, 이는 콘크리트가 시간에 따른 지속적인 수화가 진행되어 미세구조가 향상되었기 때문으로 생각되며, 이로 인한 시간과의 상관성으로 무작위성 검사와 매개변수 추정시 각각 계수상관법과  $\chi^2$  검정을 통과하지 못하였다. 즉, 염소이온 확산계수는 무작위적인 확률 분포 특성보다는 시간과의 상관성이 표면 염소이온량 분포에 비하여 좀 더 뚜렷한 경향을 보였다.

<표 3>의 통계자료를 근거로 염소이온 확산계수의 빈도해석을 수행하고 확률 분포함수와 누가 확률분포함수를 각각 <그림 10>, <그림 11>에 제시하였다. 확률밀도함수는 오른쪽으로 긴 꼬리를 가지고 있으며 15~115 mm<sup>2</sup>/year의 범위에 90% 정도의 분포를 지니고 있다.

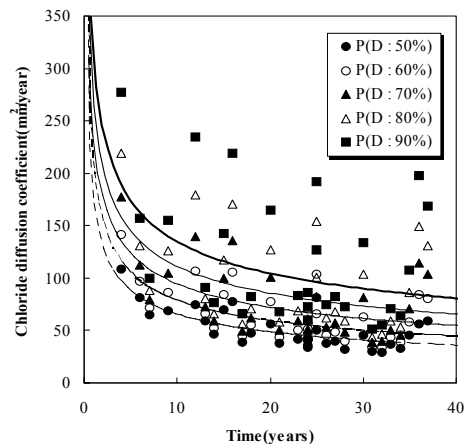
한편, 시간에 따른 염소이온 확산계수의 감소성을 평가하기 위하여 비초과 확률 50%~90%(P(D : 50%~90%))에 해당하는 염소이온 확산계수의 회귀분석 결과가 <그림 12>이다. 재령 5년~10년이 경과하면서 뚜렷하게 염소이온 확산계수가 감소하였는데, 5년이 경과하면서 염소이온 확산계수가 크게 감소한다는 기존의 연구결과와 매우 유사한 결과를 보이고 있다(Bamforth and Price, 1997). 따라서 염소이온 확산에 의한 장기 내구수명을 예측시, 시간경과에 따른 염소이온 확산계수의 경시변화율을 고려하면 필요이상의 과도한 피복두께의 산출을 제어할 수 있을 것으로 생각된다.



<그림 10> 염소이온 확산계수의 확률분포



<그림 11> 염소이온 확산계수의 누적분포



<그림 12> 시간경과에 따른 염소이온 확산계수의 확률분석



### 3. 확률분포형 염소이온 침투의 예측

실구조물에서 측정된 표면 염소이온량은 제빙화학제 살포량, 우수의 노출유무 및 배수 등에 따라 1개 구조물의 측정 지점에 대해서도 큰 편차를 나타냈으며 <표 2>의 무작위성 검사를 모두 통과하여 확률분포적 특성이 시간과의 연관성보다 우세한 것으로 판단된다. 이는 동일한 시방 기준에 의해 시공된 교량 바닥 판임에도 불구하고 초기 균열, 양생 조건, 온도 및 습도와 풍압 편위, 우수 노출 등과 관련된 국부적인 미세기후 조건은 물론 도로표면의 요철상태, 풍속, 도로로부터 거리 및 차량의 주행속도에 의해서도 표면 염소이온량의 농축정도가 크게 상이하기 때문이다(McBean and Al-Nassri, 1987; Lindvall et al., 2000). 문헌적 보고에 의하면 차량의 주행속도가 시속 60 km/h에서 도로로부터 반경 4m 이내의 염화물은 침전하지만 이보다 빠른 속도로 주행하면 100m까지 제빙화학제의 영향을 받는다(Blomavist, 1998; Volkwein et al., 1986). 그러나 염소이온 확산계수의 경우 <표 3>에서 보듯이 무작위성 검사시 계수상관법을 통과하지 못하였고, 이는 염소이온 확산계수의 경우 시간과의 연관성과 확률분포적 특성을 동시에 지니는 것으로 나타났다. 따라서 염소이온 확산의 불확실성에 대한 의사결정을 하기 위하여 표면 염소이온량은 확률분포적 특성을, 염소이온 확산계수는 확률분포적 특성과 시간과의 연관성을 고려한 대표값으로 비초과 확률 50%~90%에 해당하는 값을 확률 변수화하였다. <표 4>는 비초과 확률 50%~90%에서 결정된 염소이온 확산계

수의 시간경과에 따른 경시변화율을 도출한 것으로 각 출현된 확률에 대한 임계 염소이온량이 도래되는 시기를 예측하였다. 여기서 시간경과에 따라 수화도가 증가함에 따라 콘크리트 경화체의 세공구조의 치밀성이 향상되어 염소이온 확산계수는 감소되는데 이를 시간함수로 표현하면 식 (5)와 같다(Maage et al., 1995).

$$D(t) = D_r \cdot \left( \frac{t_r}{t} \right)^n \quad (5)$$

여기서,

$t_r$  : 기준시기 (일반적으로 1년),

$D_r$  : 기준시기 도래시 염소이온 확산계수,

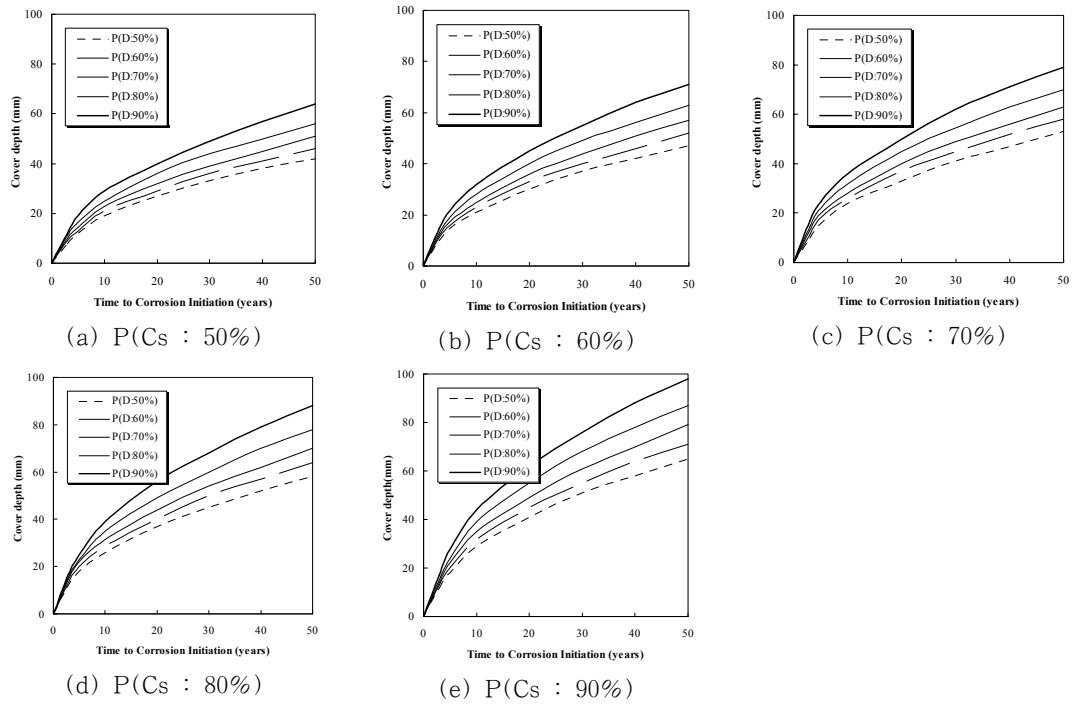
$n$  : 시간감소계수

상기 식에서 염소이온 확산계수의 시간감소계수( $n$ )는  $0 \leq n < 1$ 의 조건에서 유효하되, 물-시멘트비와 혼화재 치환량 등의 함수관계를 갖지만 실구조물에 대한 배합자료가 부재한 관계로 전체 측정자료에 대하여 <그림 4>의 방법으로 일괄적으로 도출하였다(HETEK, 1997).

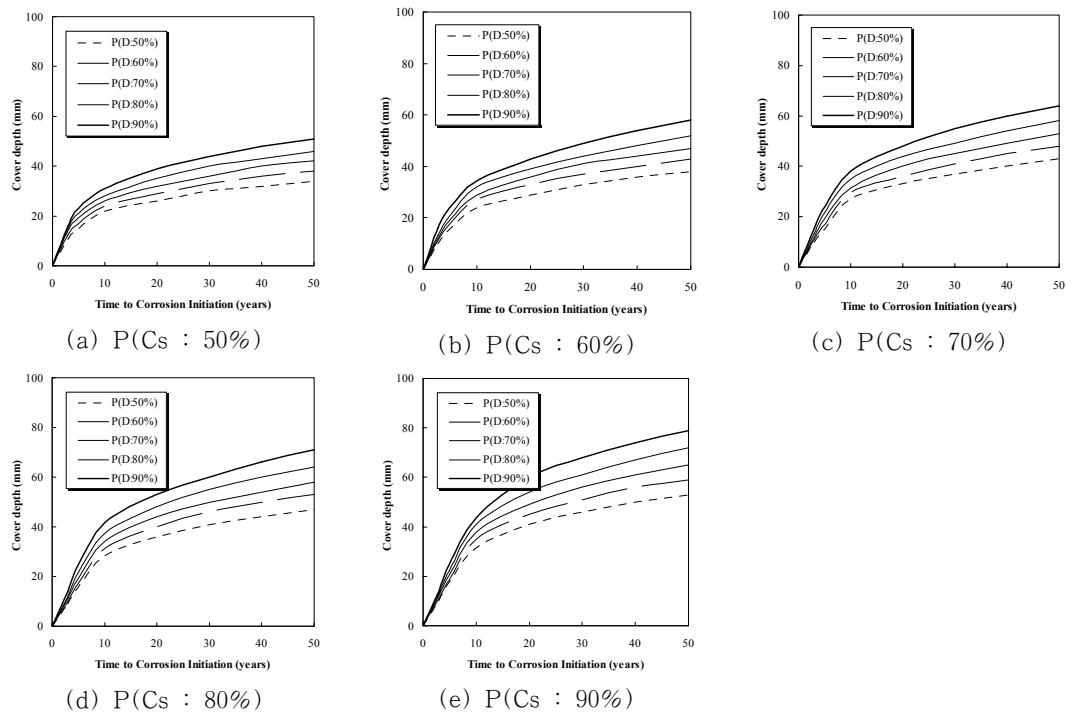
<표 4> 확률분석의 주요변수

$P(D(t))$	$C_s$ (kgf/m <sup>3</sup> )	$D$ (mm <sup>2</sup> /year)	$D(t)$ (mm <sup>2</sup> /year)
50%	1.458	50.1	$D(t) = 176.5 \cdot t^{-0.4292}$
60%	1.591	60.3	$D(t) = 204.3 \cdot t^{-0.4080}$
70%	1.752	72.2	$D(t) = 233.5 \cdot t^{-0.3927}$
80%	1.951	89.8	$D(t) = 267.1 \cdot t^{-0.3799}$
90%	2.243	115.0	$D(t) = 313.6 \cdot t^{-0.3672}$

이상과 같이 표면 염소이온량과 염소이온 확산계수에 대한 확률분포를 토대로 시간경과



〈그림 13〉 염소이온 확산계수를 상수로 간주한 최소 피복두께의 결정



〈그림 14〉 시간경과에 따른 염소이온 확산계수를 고려한 최소 피복두께의 결정

에 따른 임계 염소이온량이 도래되는 시기를 예측한 것이 <그림 13>과 <그림 14>이다. 먼저 <그림 13>은 염소이온 확산계수를 시간에 일정한 상수로 간주하여 나타낸 것으로 표면 염소이온량과 염소이온 확산계수의 신뢰성이 증가할수록 요구되는 피복두께는 증가하였다. 이러한 결과는 염소이온 확산계수를 시간의 함수로 반영하여 얻은 <그림 14>에서도 같은 추이를 보였으나, 확률 수준이 높아질수록 확산계수가 더욱 민감하게 감소하여 소요 피복두께가 현저하게 줄어들었다. 또한 설계 내구수명이 30년 이내일 경우, 확률 염소이온 확산계수  $D$ 와 시간 확률 염소이온 확산계수  $D(t)$ 가 큰 차이를 보이지 않지만, 30년 이상부터 큰 차이를 나타내므로 일반 내구수명 설계 시에는 확률 염소이온 확산계수를, 장수명 설계 시에는 시간 확률 염소이온 확산계수를 사용하는 것이 콘크리트 재료특성을 반영한 합리적인 내구수명 설계방법으로 판단된다. 한편, 선진외국의 경우, 콘크리트 교량의 설계 내구수명으로 일반구조물이 50~70년, 주요구조물은 100~200년, 콘크리트 바닥판의 경우는 15~20년으로 간주되고 있다(Saito, 1989; Whiting and Detwiler, 1998). 이를 토대로 콘크리트 바닥판의 수명을 20년으로 가정하면 필요한 피복두께는 26 mm~62 mm까지 분포하는 것으로 나타났다. 따라서 향후 시공될 콘크리트 바닥판의 피복두께는 최소 26 mm 이상으로 시공되어야 할 것으로 생각되지만 지나치게 피복두께가 증가된다면 곡률증가로 인한 균열폭 증가는 물론 교량 상부구조의 정모멘트 영향권에서 중립축이 상승되어 전단파괴에 의한

이탈작용을 촉진시키며, 연속교에서는 부모멘트 영향권에서 피복 콘크리트 표면에서의 균열폭이 확대될 수 있다. 따라서, 제빙화학제에 의한 철근부식 시작시기를 연장하는 방안은 적절한 피복두께의 증가 및 고내구성 콘크리트로 타설하여 염소이온 확산계수를 낮추는 것이 효율적일 것으로 판단된다(Embacher, 2001). 이상과 같이 서울시 콘크리트 도로교에서 채취한 염소이온량을 입력데이터로 하여 얻은 확률분포형 철근부식 시작시기의 예측은 신뢰성을 기초로 하여 콘크리트 상판부의 합리적인 피복두께를 결정하고, 동절기 도로교의 유지관리 대책을 수립하는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

#### IV. 결론

본 연구는 제빙화학제 살포로 인한 서울시 콘크리트 교량 바닥판의 내구수명예측을 수행하고자 현장실험에 의한 깊이별 염소이온량을 조사하였다. 불확실성에 대한 의사결정을 하기 위하여 표면 염소이온량과 염소이온 확산계수를 확률 변수화하여 출현된 확률에 대한 임계 염소이온량이 도래되는 시기를 예측하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 표면 염소이온량 분포는 평균적으로  $1.5 \text{ kg/m}^3$ 이며 약 70%의 확률수준에서  $1 \sim 2 \text{ kg/m}^3$ 까지 농축되었다. 이는 수용성 염소이온의 약 2배의 고정화율을 고려하여 전염화물량으로 환산하면  $3 \text{ kg/m}^3$ 에 해당하는 것으로 서울시의 제빙화학제로 인한 부식환경은 보통 수준인 것으로 사료된다.

- 2) 50 % 이상의 신뢰성을 갖는 범주에서 표면 염소이온은  $1.458 \sim 2.243 \text{ kg/m}^3$  이며, 염소이온 확산계수는  $50.1 \sim 115 \text{ mm}^2/\text{year}$ 의 범주에 존재하였다. 또한, 1년을 기준시기로 간주하였을 때, 기준시기에 대한 염소이온 확산계수는  $176.5 \sim 313.6 \text{ mm}^2/\text{year}$ , 시간감소계수는  $0.3672 \sim 0.4292$ 로서 시간의존적인 염소이온 확산계수를 얻을 수 있었다.
- 3) 콘크리트 바닥판의 설계내구수명을 20년으로 간주할 때 필요한 피복두께는  $26 \text{ mm} \sim 62 \text{ mm}$ 인 것으로 나타났다. 따라서 콘크리트 바닥판의 피복두께는 최소  $26 \text{ mm}$  이상으로 시공하되 지나치게 높지 않은 범위에서 결정되어야 할 것으로 생각된다.
- 4) 제빙화학제 침투에 의한 교량 바닥판의 수명 연장 방안은, 피복두께의 합리적인 증가 및 고성능 콘크리트로 타설하여 콘크리트의 염소이온 확산계수를 저감시키는 것이 효율적일 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

- 이창수, 설진성, 윤인석, 2000, "서울 시내 140개 콘크리트 교량의 내구성 현황 분석", 『한국구조물진단학회 논문집』, 제4권 3호.
- 서울특별시, 2000, 『2000년 제설대책』.
- 콘크리트工学協會, 1999, "融雪劑によるコンクリート構造物の劣化研究委員會", 『融雪劑による鐵筋コンクリート構造物の劣化研究委員會報告書』.
- ACI Committee 201, 1997, "Guide of Durable Concrete," *ACI Practice Manual*.
- ACI Committee 222, 1985, "Corrosion of Metals in Concrete," *ACI Practice Manual*.
- Bamforth, P. B. and Price, W. F., 1997, "An International Review of Chloride Ingress into Structural Concrete," Report No.1303/96/9092, Taywood Engineering Ltd. Technology Division.
- Blomqvist, G., 1998, "Impact of De-Icing Salt on Roadside Vegetation A Literature Review," VTI Rapport 427A, Swedish National Road and Transport Research Institute, Linköping.
- Clifton, J. R., 1993, "Predicting Service Life of Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol.90, No.6, 611~617.
- Embacher, E., 2001, "Using Silica Fume Concrete with Full-Depth Bridge Deck Construction in Minnesota," Mn DOT MN/RC 2001-18.
- Harold, R. L., 1992, "Analysis of Variance in Experimental Design," Springer-Verlag.
- HETEK, 1997, "A System for Estimation of Chloride Ingress into Concrete: Theoretical Background," Report No.83, Road Directorate, Denmark Ministry of Transport.
- Hoffman, P. C. and Weyers, R. E., 1994, "Predicting Critical Chloride Levels in Concrete Bridge Decks," in Schueller, G. I, Shinozuka, M. and Yao, J. T. P(eds.), *Structural Reliability : Proceedings of ICOSSAR '93*, Rotterdam.
- Hobbs, D. W., 1998, *Minimum Acquirements for Durable Concrete: Carbonation and Chloride-Induced Corrosion, Freeze-Thaw Attack and Chemical Attack*, Crownthorn (UK), British Cement Association.
- Lindvall, A., Andersen, A. and Nilsson, L. O., 2000, "Chloride Ingress Data from Danish and Swedish Road Bridges Exposed to Splash from De-Icing Salt," in *Proceedings of 2nd International RILEM Workshop on Testing and Modeling the Chloride Ingress into Concrete*, Paris, 85~103.
- Liu, Y., 1996, *Modelling the Time to Corrosion Cracking of the Cover Concrete in Chloride Contaminated Concrete Structures*, Ph. D Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Luciano, J. and Miltenberger, M., 1999, "Predicting Chloride Diffusion Coefficient from Concrete Mixture Proportions," *ACI Material Journal*, No.

- 96-M86.
- Maage, M., Helland, S. and Carlsen, J. E., 1995, "Practical Non-Steady State Chloride Transport as a Part of a Model for Predicting the Initiation Period," *Proceeding International RILEM Workshop: Chloride Penetration Into Concrete*, Oct.15-18, Saint-Remy-Les-Chevreuse, 398~406.
- McBean, E. and Al-Nassri, I., 1987, "Migration Pattern of De-Icing Salts from Roads," *Journal of Environmental Management*, Vol.25, 231~238.
- Saito, M., 1989. "The Development of Optimal Strategies for Maintenance, Rehabilitation and Replacement of Highway Bridges," *Final Report*, Vol. 4.
- Thomas, M. D. A, 1999, "Modelling Chloride diffusion in Concrete : Effect of Fly Ash and Slag," *Cement and Concrete Research*, Vol. 29.
- Weyers, R. E., Fitch, M. G., Laren, E. P., Al-Quadi, I. L., Chamberlin, W. P. and Hoffman, P. C., 1994, "Concrete Bridge Protection and Repair, and Rehabilitation Relative to Reinforcement Corrosion: A Methods Application Manual," SHRP-S-360, National Research Council, Washington D.C.
- Whiting, D. and Detwiler, R., 1998, "Silica Fume Concrete for Bridge Deck," NCHRP Report 410, Transportation Research Board, National Academy Press.
- Volkwein, A., Dorner, H. and Springenschmid, R., 1986, "Untersuchungen zur Kloridkorrosion der Bewehrung von Autobahn-Brcken aus Stahl-oder Spannbeton (Investigation of Chloride Induced Reinforcement Corrosion in Highway Brides Made of Steel or Reinforced Concrete)," *Forschung, Strassenbau und Strassenverkehrstechnik*, Heft 460, Berlin.
- Zemajtis, J., 1988, *Modelling the Time to Corrosion Initiation for Concrete with Mineral Admixtures and/or Corrosion Inhibitors in Chloride Laden Environment*, Ph. D Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University.

원 고 접 수 일 : 2004년 9월 7일  
 1차심사완료일 : 2004년 10월 25일  
 2차심사완료일 : 2004년 11월 17일  
 최종원고채택일 : 2004년 12월 1일