



## 염해 시간의존성을 고려한 확률론적 내구수명 평가

권성준 1)\*

<sup>1)</sup>한남대학교 건설시스템 공학과

# Service Life Evaluation through Probabilistic Method Considering Time-Dependent Chloride Behavior

Seung-Jun, Kwon<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Civil Engineering, Hannam University, Daejeon 34430, Rep. of Korea

**ABSTRACT** The service life in RC (Reinforced Concrete) is very important and it is usually obtained through deterministic method based on Fick's 2nd law and probabilistic method. This paper presents an evaluation of  $P_{df}$  (durability failure probability) and the related service life considering time-dependent behaviors in chloride diffusion and surface chloride content. For the work, field investigation is performed for RC structures exposed to chloride attack for 3.5~4.5 years, focusing tidal zone (6.0 m) and sea shore (9.0 m), respectively. Random variables like cover depth, chloride diffusion coefficient, and surface chloride content are obtained, and  $P_{df}$  and the service life are evaluated. Unlike the results from deterministic method using LIFE 365, probabilistic method with time effects on diffusion and surface chloride shows a relatively rapid change in the result, which is a significant reduction of service life in the case with low surface chloride content. For probabilistic evaluation of durability, high surface chloride content over 10.0 kg/m<sup>3</sup> is required and reasonable service life can be derived with consideration of time-dependent diffusion coefficient.

**Keywords** : chloride attack, probabilistic durability design, time-dependent diffusion, Fick's 2nd law

### 1. 서 론

염해에 노출된 콘크리트 구조물은 내부에 매립된 철근 부식으로 인해 내구성에 문제가 발생하고 이는 구조적인 안전성 문제로 진전된다.<sup>1,2)</sup> 이를 고려하기 위해 많은 연구들이 염화물 거동의 평가와 예측을 위해 제안되고 있으나, 콘크리트 재료의 불확실성과 실험의 오차 등으로 해석결과와의 차이가 발생하게 된다. 현재 국내외의 내구수명을 평가하는 방법은 결정론적인 방법과 확률론적인 방법으로 분류할 수 있다. 결정론적인 방법은 염화물 이동을 직접적으로 평가하는 방법으로 실무에서는 겉보기 확산계수를 이용한 평가방법이 대표적이다.<sup>3,4)</sup> 최근 들어 콘크리트의 수화도 및 수분이동을 고려한 해석도 많이 발전하고 있는데, 이는 자유염화물과 고정염화물의 상평형, 염화물의 확산이동과 압력에 의한 이동 등을 모두 고려해야 한다.<sup>5-7)</sup> 두가지 방법 모두 공학적으로 의미를 가지고 있지만, 일반적으로 알려진 공학적 불확실성(Uncertainties)을

해결하는데 충분하지 못하다.<sup>8,9)</sup>

국내외의 설계기준 및 시방서 수준은 현재 사양규정형에서 성능평가형으로 변화하고 있는 수준이지만, 현재는 환경조건을 고려한 사양규정 수준이라고 할 수 있다. 현재 ACI 318,<sup>10)</sup> BS 6349 및 8110,<sup>11,12)</sup> 일본 콘크리트 설계기준은<sup>13)</sup> 염해에 대하여 최소피복두께, 염화물 함유량 등의 규정 수준이며, BS 6349에서는 좀 더 합리적으로 환경조건이 거의 고려되어 있다. 사용수명 50년 및 100년에 대해 설계기준강도, 사용시멘트, 물-결합재 비 등을 제시하고 있다. BS 8500<sup>14)</sup>에서는 상세하게 환경을 분류하고 목표내구수명을 50년과 100년으로 분류하여 시멘트 등급, 슬럼프, 물-결합재 비를 제공하고 있으며, 현재 수준에서 가장 세분화된 사양설계의 시방서 수준이라고 할 수 있다. 일본에서는 콘크리트 표준시방서(재료 및 시공편)에서 상세하게 환경조건을 제시하고 이에 따른 시방수준을 제시하고 있다. 부록에서는 Fick's 2법칙에 근거한 성능평가형식을 제안하고 있으나 현실적으로 적용이 어려운 상황이다.<sup>15)</sup>

국내외의 시방서 및 설계기준들은 ACI의 내용을 일부 차용하고 있으며,<sup>16)</sup> 도로교 표준시방서, 건축공사 표준시방서에서는 내구성 설계가 크게 고려되지 않은 사양설계를 권하고 있다. 콘크리트 표준시방서에서는 상세하게

\*Corresponding author E-mail : jjuni98@hannam.ac.kr

Received June 12, 2015, Revised August 20, 2015,

Accepted September 22, 2015

©2016 by Korea Concrete Institute

환경조건에 따른 배합규정을 제시하고 있으며, 부록편에 내구성 설계를 위한 성능평가식을 제시하고 있다. 그러나 일본 JSCE의 표준시방서를 차용하고 있으므로 현실적인 적용이 매우 어려운 상황이다.<sup>17)</sup> 90년대 이후부터 시작된 확률론적인 내구성 설계방법은 일부 연구자들에 국한된 연구이지만 성능평가 내구성 설계의 단점을 보완할 수 있는 설계기법이다. 외부의 열화인자와 내부의 저항인자를 확률변수로 설정하고 이에 따라 유입된 염화물에 의해 부식이 발생할 확률을 내구성 파괴확률(PDF: Probability of Durability Failure)로 정의한다. 또한 목표내구수명을 설정하여 정해진 기간내에 부재의 내구성 파괴확률이 목표 내구성 확률(IPDF: Intended Probability of Durability Failure)보다 낮도록 유도하는 설계방법이다.<sup>18-20)</sup> 이러한 방법은 최근 시공간상의 확률특성을 고려한 Spatial Variability 기법으로 발전하고 있다.<sup>21,22)</sup>

그러나 이러한 확률론적 평가방법은 시간이 일정한 조건에서의 변수(피복두께, 표면 염화물량) 등이 고려되므로 시간의존성을 가지는 염화물 이동특성을 고려할 수 없다. 즉 실태조사를 통하여 도출된 결과를 이용하여 확률론적인 평가를 수행하려 해도, 그 시점에 국한된 결과를 제공할 뿐 이후 변화할 확산계수 및 표면 염화물에 대한 영향을 고려할 수 없으므로 내구수명의 변동을 평가할 수 없다. 또한 시간변수를 고려한 확률거동과 이에 따른 내구수명의 변화를 분석한 연구는 거의 없는 실정이다. 특히 비교적 사용기간이 짧은 구조물에 대해서는 염해에 대한 시간 의존적 영향이 더욱 커질 것이다.

본 연구에서는 염해에 노출되었으며 비교적 짧은 공용기간(3.5~4.5년)을 가진 콘크리트 교각의 실태조사를 수행하였으며, 실태조사결과를 이용하여 시간의존성 해석에 따른 내구수명의 변화를 분석하도록 한다. 염해실태조사 결과에 대한 연구는 많이 진행되었으므로 시간의존성을 가지는 염해 특성을 고려하여 확률론적 해석을 수행하였다. 이를 통해 내구적 파괴확률 변화와 이에 따른 내구수명을 분석하였다.

## 2. 확률론적 해석을 통한 염해의 내구수명 평가

확률론적인 내구수명 평가방법은 피복두께, 표면염화물량, 확산계수, 임계염화물 등을 하나의 숫자로 나타내지 않고 확률변수로 정의하여 평균 및 변동계수를 설정한다. 최근 들어 균열폭까지 고려하여 염해나 탄산화에 대한 확률론적 설계가 수행된 예가 있으나, 시간의존성 변화를 고려한 수준은 아니다.<sup>18,23,24)</sup>

확률론적 설계에서는 MCS (Monte Carlo Simulation)을 통해 목표내구수명동안 확산을 통하여 철근 위치에 유입된 염화물량이 임계염화물을 초과하지 않을 확률을 한계상태로 정의하고 이 조건이 발생할 확률인 내구성 파괴확률이 목표 내구성 파괴확률보다 낮도록 설계한다. 식 (1)은 확률론 해석의 지배방정식을 나타내고 있으며, 그

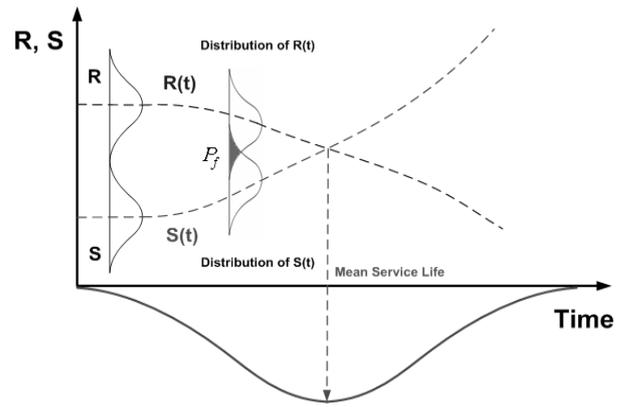


Fig. 1 Concept of probabilistic method for durability design<sup>25)</sup>

개요를 Fig. 1에 나타내었다.

$$P \{ C_r(\mu, \sigma) < C_s(\mu, \sigma) [1 - \text{erf}(\frac{x(\mu, \sigma)}{\sqrt{D(\mu, \sigma)t}})] \} < P_{\max} \quad (1)$$

여기서  $C_r(\mu, \sigma)$ ,  $C_s(\mu, \sigma)$ ,  $D(\mu, \sigma)$ ,  $x(\mu, \sigma)$ 는 임계염화물량, 표면염화물량, 염화물확산계수, 피복두께에 대한 확률변수로 각각의 평균과 표준편차를 가진다.  $P_{\max}$ 는 목표내구수명에 따른 목표 내구성 파괴확률을 나타낸다. 식 (1)의 확률변수는 실태조사를 통하여 도출된다.

Fig. 1에서 시간축 위의 저항내력-R(t)와 열화외력-S(t)을 이용한 설계개념은 service period design으로, 하나의 확률로 고려하는 아래의 그림은 lifetime design으로 알려져 있다.<sup>19)</sup> 염해의 경우 시간에 따라 콘크리트 내부로 염화물의 유입이 증가하므로 부식확률이 증가하게 되고 이에 따라 내구수명은 감소하게 된다. 그러나 시간의존성 특성을 가진 표면염화물량과 확산계수를 고려하면 내구성 파괴확률과 내구수명은 변동성을 보이게 된다. 3장에서는 실태조사를 통하여 도출한 표면염화물량 및 확산계수를 노출환경을 고려하여 분석하였으며, 이에 따른 내구수명의 변동성을 평가하였다.

## 3. 염해 실태조사결과를 이용한 대상구조물의 내구수명 평가

### 3.1 실태조사 결과의 개요

대상구조물은 해상부에 위치한 RC 교각으로 간만대(6.0 m)위치와 해상부(9.0 m)에서 지름 100 m의 코어를 채취하였다. 채취된 각각 6개의 코어에 대하여 AASTHO T 260에 따라 전염화물량을 측정하였다. 각 시편은 5.0 mm 깊이 단위로 전염화물량을 도출하였으며, 염화물 분포에 따라 회귀분석을 통하여 겉보기 표면 염화물량 및 겉보기 확산계수를 도출하였다. Table 1은 대상 구조물의 배합표를 나타내며, Table 2에서는 6.0 m 지점 및 9.0 m 지점의 결과값을 나타낸다.

**Table 1** Mix proportions for RC column

Slump (mm)	Strength (MPa)	Cement	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )			
					W	C	S	G
130	24	Type-1	52.0	44.0	186	358	758	988

**Table 2** Field investigation results for chloride behavior

Case	Height (m)	Surface chloride content (kg/m <sup>3</sup> )	Diffusion coefficient (m <sup>2</sup> /sec) (test year)	Diffusion coefficient (m <sup>2</sup> /sec) (28days)	
		A	6.0	8.94	1.52E-12
3.7 years	9.0	8.90	1.55E-12	3.37	
		0.89	2.27E-12	4.93	
B	6.0	0.85	2.04E-12	4.43	
		15.64	1.88E-12	4.10	
	3.8 years	9.0	15.26	2.06E-12	4.50
			1.09	2.93E-12	6.40
C	6.0	1.03	2.74E-12	5.99	
		12.25	1.05E-12	2.39	
	4.7 years	9.0	11.80	1.45E-12	3.30
			0.31	3.53E-12	8.04
		1.10	1.66E-12	3.78	

Table 2와 같이 6.0 m 위치는 간만대이므로 높은 표면 염화물량이 평가되었으며, 해상위인 9.0 m에서는 1.0 kg/m<sup>3</sup> 이하의 낮은 표면염화물량이 측정되었다.

### 3.2 Life 365를 이용한 결정론적 내구수명 평가

#### 3.2.1 표면염화물량 및 확산계수

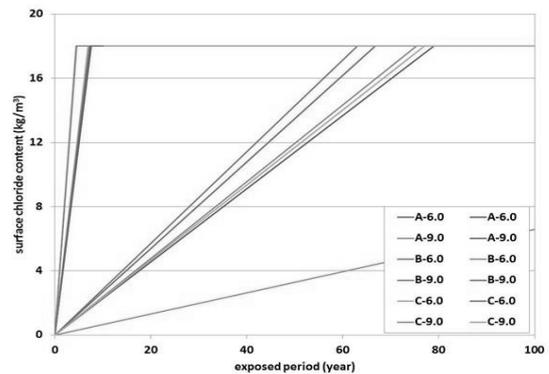
최근 국내에서 Life365는 표면염화물량의 증가와 시간의존성 길보기 확산계수를 사용하여 콘크리트 내부로 침투하는 염화물량을 평가하게 된다. 표면염화물량은 18.0~23.0 kg/m<sup>3</sup> 수준으로 변동성을 가지는 데 일반적으로 혼화 재료를 사용한 경우, 염화물 고정화가 커지므로 표면염화물량이 증가한다.<sup>26)</sup> 본 연구에서는 OPC를 사용한 콘크리트 교각을 대상으로 하였으므로 최대 표면염화물량을 18.0 kg/m<sup>3</sup>으로 가정하였으며, 도달하는 기간을 10년으로 가정하였다.<sup>3)</sup> 식 (2)에서는 Life365에서 차용한 길보기 확산계수를 고려한 염화물 지배방정식을 나타내었다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D(t) \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, D(t) = D_{28} \left( \frac{t_{28}}{t} \right)^m \quad (2)$$

여기서  $C_s$ 는 표면염화물량,  $x$  및  $t$  콘크리트 깊이 및 시간,  $erf$ 는 오차함수를 나타낸다.  $\bar{D}$ 는 시간의존적 확산계수이며, 재령 28일 확산계수( $D_{28}$ )과 기준 시간( $t_{28}$ )을 포함하고 있다.  $m$ 은 시간의존성 지수이며 OPC의 경우 0.2를 권하고 있다.<sup>2)</sup> 또한 온도 특성은 대상 구조물의 노출환경

**Table 3** Conditions for calculation of service life

Cover depth (mm)	m	Time to built-up	Critical chloride content
95.0 mm	0.2	10 years	1.2 kg/m <sup>3</sup>



**Fig. 2** Built-up of surface chloride content

을 조사하여 고려하였다.

Table 3에서는 해석조건을 나타내었는데,  $D_{28}$ 은 코어 채취의 노출기간을 고려하여 식 (2)를 통해 28일로 환산하였다. Fig. 2에서는 해석에 필요한 표면염화물량의 증가를 나타내고 있다.

#### 3.2.2 대상구조물 위치별 내구수명 평가

Table 1의 배합조건과 Table 3의 해석조건을 통하여 간

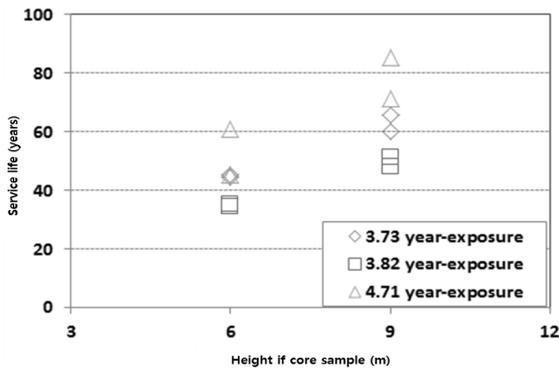


Fig. 3 Service life through deterministic method

만대인 6 m와 해상위인 9 m 위치의 내구수명을 교각별로 평가하면 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다.

간만대(6.0 m)에서는 35.2~60.9년의 내구수명이 평가되었으며, 평균값은 44.2년으로 평가되었다. 해상부(9.0 m)에서는 63.6년의 평균 내구수명을 가지고 있었는데, 51.3~85.2년의 범위를 가지고 있었다. 동일한 배합과 노출환경에 있다 하더라도 큰 변동성을 가지고 있음을 알 수 있다. 또한 해상부에서 내구수명이 크게 평가되었는데, 이는 간만대에 비해 매우 낮은 표면염화물량을 가지고 있기 때문이다.

#### 4. 시간의존성을 고려한 확률론적 내구수명 평가

##### 4.1 확률변수의 설정

본 절에서는 식 (1)을 통한 확률론적 해석을 수행하기 위해 표면염화물량, 확산계수의 평균 및 표준편차를 분석하고 확률분포함수를 구성하여 MCS를 적용하였다.

각 코어채취 높이(6.0 m, 9.0 m)에 대해 평균과 표준편차를 도출하였는데, 시편의 개수는 Table 2와 마찬가지로 각 높이에 대하여 6개, 총 12개의 시편을 대상으로 한 것이다. Table 4에서는 확산계수, 표면염화물량, 피복두께에 대한 확률변수를 나타내었다. 정리하였다.

기존의 연구에 따라 표면염화물량, 길보기 확산계수, 피복두께는 정규 확률분포함수를 고려하였으며, 임계염화물량에 대해서는 로그 확률분포를 고려하였다.<sup>20)</sup>

Table 4 Probability variables for MCS

Height	Chloride diffusion coefficient ( $\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$ ) Normal distribution		Surface chloride content ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) Normal distribution		Cover depth (mm) Normal distribution		Critical chloride content ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  Log normal distribution
	6.0 m	9.0 m	6.0 m	9.0 m	6.0 m	9.0 m	
n	6	6	6	6	6	6	
mean	1.585	2.528	12.132	0.878 (1.2)	94.72	94.82	1.20
STD	0.353	0.674	2.927	0.297	10.601	12.134	0.24
COV	0.223	0.266	0.241	0.338	0.112	0.128	0.20

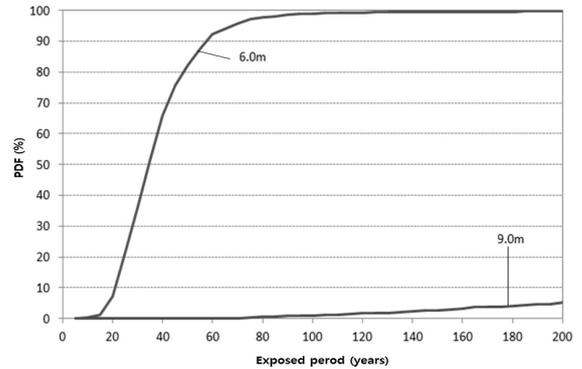


Fig. 4 PDF with elapsed time (6.0 and 9.0m height)

#### 4.1 일정한 확산계수를 가질 경우의 내구성 파괴확률

본 절에서는 코어를 채취하였을 시점을 기준으로 일정한 길보기 확산계수와 표면염화물량을 가질 경우의 내구성 파괴확률과 이에 따른 내구수명을 평가하였다. 국내외 지방서에서는 7.0~10.0% 수준의 염해에 대한 내구성 파괴 확률을 제안하고 있는데,<sup>17,18,27)</sup> 본 연구에서는 10.0%의 내구성 파괴확률을 고려하였다.<sup>17,18)</sup>

9.0 m 위치에서 평균 표면염화물량은 임계기준치인  $1.2 \text{kg}/\text{m}^3$ 보다 낮은 값이므로 증가하지 않을 경우 물리적으로 부식이 발생할 수 없는 조건이다. 그러므로 확률해석에서는 임계기준치인  $1.2 \text{kg}/\text{m}^3$ 을 가정하여 해석을 수행하였다. Fig. 4에서는 경과시간에 따른 내구성 파괴확률(PDF)을 도시하였는데, 6.0 m 지점에서는 20.2년이, 9.0 m에서는 270년 이상의 높은 내구수명이 평가되었다.

#### 4.2 시간의존성 확산계수를 가질 경우의 내구성 파괴확률

##### 4.2.1 해석 개요

시간의존성 확산계수 및 표면염화물량을 고려하기 위하여 코어채취 시간은 3.5년으로 고정하고 5년 단위로 확산계수와 표면염화물량 및 확산계수를 산정하여 수행하였다.

4.2.2 표면염화물이 고정되고 시간의존성 확산계수를 고려한 경우 확산계수의 감소는 식 (2)에 따라  $m$ 을 0.2로 고정하였으며, 노출기간인 3.5년부터 해석을 수행하였다. 6.0 m의 간만에 대하여 Fig. 5(a)에서는 시간이 증가할 경우의 PDF 변화를, Fig. 5(b)에서는 이에 따른 내구수명의 변화를 나타내었다.

Fig. 5에서 알 수 있듯이 시간이 지날수록 확산계수가 감소하므로 PDF가 감소하여 내구수명이 증가하게 된다. 식 (2)와 같이 30년 이후 확산계수가 일정하다고 평가되므로<sup>3)</sup> 30년 이후의 PDF 및 내구수명의 변화는 없다. 내

구수명은 초기에 20.2년으로 평가되었으나 확산계수의 시간의존 한계를 30년으로 가정시 내구수명은 35년으로 증가하였다.

Fig. 6에서는 해상부에서의 PDF의 변화와 이에 따른 내구수명 변화를 나타내었다. 내구수명은 3.5년 경과시 275년으로 평가되었으나, 30년 시간의존성을 고려하면 420년으로 내구수명이 증가하였다. 또한 30년 이후의 확산계수가 일정하다고 가정하였으므로 100년까지 시간의존성을 고려할 경우 내구수명은 420년으로 일정하였다.

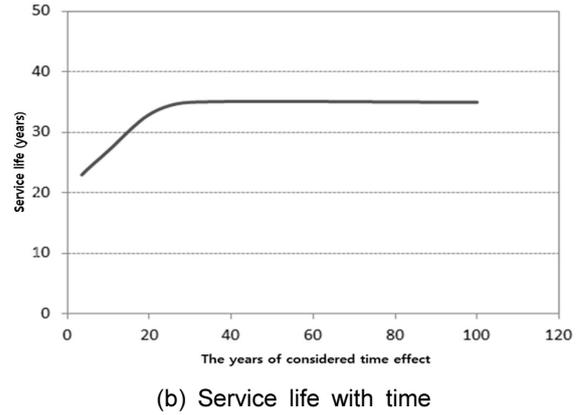
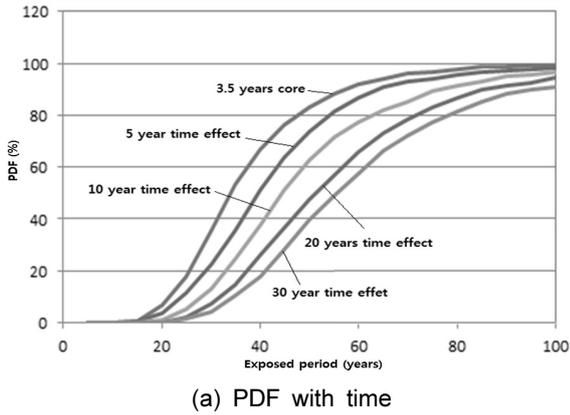


Fig. 5 Changes in PDF and service with time-dependent diffusion (tidal zone)

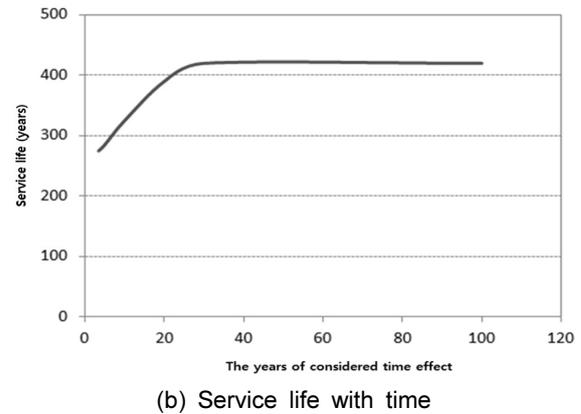
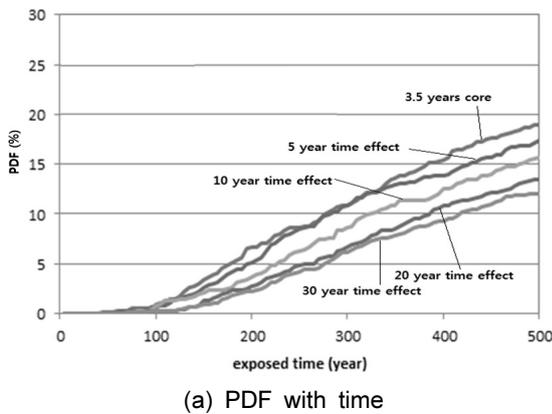
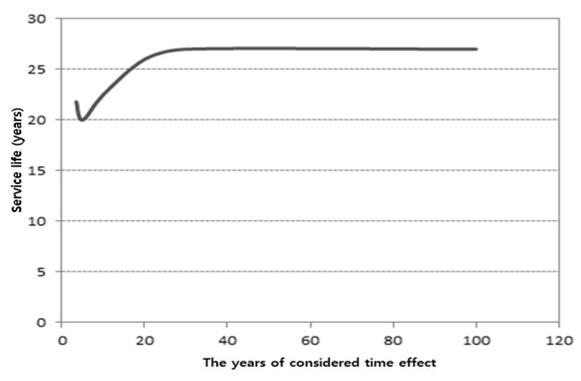
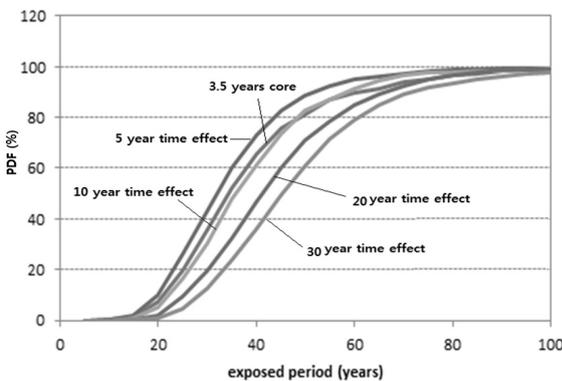


Fig. 6 Changes in PDF and service with time-dependent diffusion (sea shore)



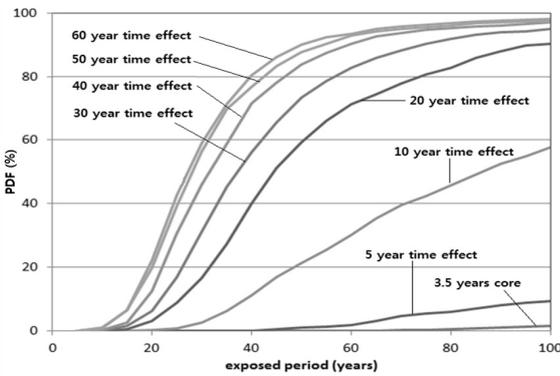
(a) PDF with varying diffusion and surface chloride content (b) Service life with varying diffusion and surface chloride content  
Fig. 7 Changes in PDF and service with time-dependent diffusion and surface chloride content (tidal zone)

4.2.3 표면염화물이 증가하고 시간의존성 확산계수를 고려한 경우

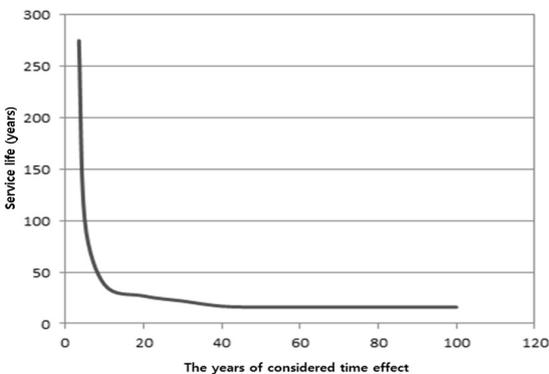
본 절에서는 표면염화물량이 선형으로 18.0 kg/m<sup>3</sup>까지 증가하면서 시간의존성 확산계수를 고려한 경우의 PDF의 변화와 이에 따른 내구수명의 변화를 분석하도록 한다. Fig. 7(a)에서는 간만대(6.0 m)에서의 PDF의 변화를, Fig. 7(b)에서는 이에 따른 내구수명의 변화를 나타내었다. 표면염화물량의 증가는 Fig. 2와 동일하게 가정하였다.

Fig. 7에서 알 수 있듯이 표면염화물량이 18.0 kg/m<sup>3</sup>까지 선형적으로 증가하므로 내구수명이 이에 따라 비선형적으로 감소하게 된다. 그러나 3.5년 경과시 표면염화물량이 12.1 kg/m<sup>3</sup>이었으므로 18.0 kg/m<sup>3</sup>까지 도달하는 데는 5.2년 밖에 걸리지 않으므로 5.2년까지는 표면염화물량의 증가로 인해 내구수명이 감소하고 이후 일정해진 표면염화물량과 30년까지 감소하는 확산계수로 인해 내구수명은 꾸준히 증가하게 된다. 30년 이후부터는 확산계수와 표면염화물량이 모두 일정해지므로 내구수명 역시 일정하게 27년으로 평가되었다.

Fig. 8에서는 해상부(9.0 m)의 PDF와 내구수명의 변화를 나타내었다. 해상부에서는 표면염화물량이 작으므로 52.5년까지 계속 증가하여 18.0 kg/m<sup>3</sup>이 그 이후 유지된다. 3.5년에서 표면염화물량이 1.2 kg/m<sup>3</sup>이었으므로 임계염화물량보다 커지기 시작하는 순간부터 PDF는 매우 크게 증가하고 이에 따라 급격한 내구수명을 확인 할 수 있다. 30년까지는 확산계수의 감소와 표면염화물량의 증가가,



(a) PDF with varying diffusion and surface chloride content



(b) Service life with varying diffusion and surface chloride content

Fig. 8 Changes in PDF and service with time-dependent diffusion (sea shore)

그 이후부터 52.5년까지는 표면염화물량의 증가만 존재한다. 52.5년 이후는 표면염화물과 확산계수가 모두 일정해지므로 내구수명은 16년으로 일정하게 평가되었다.

5. 결정론적 방법과 비교한 시간의존성을 고려한 확률론적 내구수명 평가방법의 특성

3.2.2절에 언급하였듯이 간만대 위치(6.0 m)에서는 35.2~60.9년의 범위에서 44.2년의 내구수명 평균값을, 해상부(9.0 m)에서는 51.3~85.2년의 범위에서 63.6년의 내구수명 평균값을 나타내고 있다. 간만대 위치에서의 내구수명 특성을 Fig. 9에 확률특성을 가진 내구수명과 비교하였다.

정량적인 방법과 확률론적인 방법에서 각각 도출된 내구수명은 큰 차이를 보이고 있으나 확률론적인 방법에서 낮은 내구수명을 보인다. 이는 확률변수의 변동성이 크다 하더라도 낮은 목표 내구적 파괴확률(10%)이 지배적이기 때문이다. 30년 이후 일정해진 내구수명을 비교하면, Life365의 평균값에 비해 시간의존성 확산계수만 고려한 경우는 79.2%, 시간의존성 확산성과 증가하는 표면염화물량을 고려한 경우는 61.8% 수준으로 평가되었다.

해상부에서 도출된 내구수명 비교는 Fig. 10에 나타내었는데, 이 조건에서는 더욱 큰 내구수명의 차이가 발생하고 있음을 알 수 있다. 해수에 직접 노출되지 않는 부재에서 10년 미만의 코어를 채취할 경우 낮은 표면염화물량으로 인해 확률론적 해석결과는 신뢰할 수 없는 값

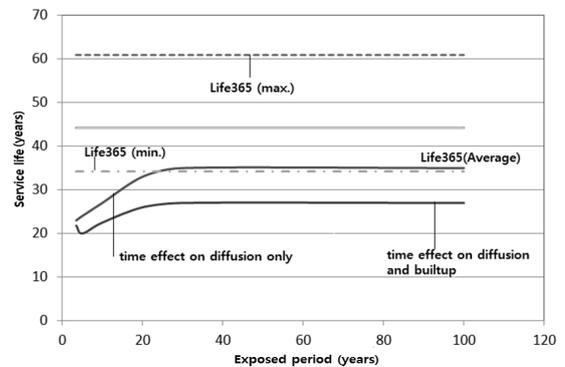


Fig. 9 Comparison with results for service life (tidal zone)

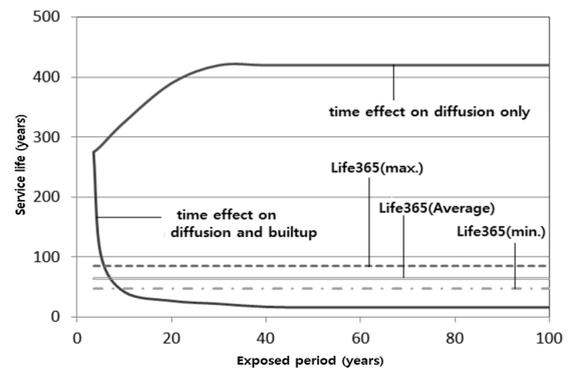


Fig. 10 Comparison with results of service life (sea shore)

이 도출된다. 또한 표면염화물량이 증가하는 것을 가정하여 해석을 수행할 경우 초기 시점에서 측정된 확산계수 값이 낮은 수준이므로 급격하게 내구수명이 감소하게 된다. 표면염화물량과 확산계수가 모두 일정해지는 50년 이후의 내구수명 평가에서는 Life365의 평균 내구수명보다 평가 결과인 25% 수준으로 매우 낮게 평가되었다.

본 연구는 비교적 단기간에 노출된 교각 구조물을 대상으로 확산계수와 표면염화물량을 평가하여 결정론적 방법과 확률론적 방법을 통해 내구수명 변화를 분석한 연구이다. 많은 연구에서도 지적되었듯이, 표면염화물량의 증가, 확산계수의 시간의존성에 대해서는 의견이 분분하며 국내현실을 고려한 개선이 절실하다. 특히 OPC 콘크리트를 사용하지 않을 경우의 시간의존성 염해거동은 매우 중요한데 광범위한 실태조사 및 장기 실험을 통하여 이에 대한 자료의 구축이 필요하다.

일반적으로 구조안전성 설계에서는 신뢰도 지수( $\beta$ )를 1.75~3.20 수준으로 설정하는데,<sup>28)</sup> 이 값은 정규분포를 가정할 경우, 0.07~4.0% 수준의 파괴확률을 나타낸다. 구조안전설 기준보다는 큰 파괴 확률값이지만 내구성 파괴확률의 경우 염해 및 탄산화에 대하여 국내 지방서에서 제시한 10%는 매우 큰 수치라고 생각되며, 좀 더 합리적인 계수의 반영을 통하여 과다한 내구설계를 지양할 필요가 있다고 판단된다.

## 6. 결 론

염해 시간의존성을 고려한 확률론적 내구수명 평가를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 3.5~4.5년 경과된 간만대와 해상부의 RC 교각의 실태조사 결과를 기준으로 하여, 결정론적인 방법과 확률론적인 방법으로 내구수명을 평가하였다. Life365를 통한 해석결과에서, 간만대(6.0 m)에서는 35.2~60.9년으로, 해상부(9.0 m)에서는 51.3~85.2년의 내구수명 범위가 평가되었다.
- 2) 확률론을 이용할 때, 확산계수의 시간의존에 따른 감소를 고려하면 간만대에서는 30년 경과시 내구수명은 35년으로 일정하게 평가되었다. 또한 표면염화물량이 증가하고 확산계수가 감소할 경우를 고려하면, 27년으로 평가되었다. 마찬가지로 해상부에서는 확산계수 감소만을 고려할 때, 30년 이후 420년으로 일정하게 내구수명이 평가되었으며, 표면염화물의 증가 및 확산계수의 감소를 고려할 때 16년으로 매우 낮게 평가되었다.
- 3) 비교적 초기에 코어를 채취하여 낮은 표면 염화물량을 가진 경우, 확률론적인 방법을 적용한 식과 Fick's 2nd Law를 적용한 식의 결과는 큰 차이를 나타낸다. 이 경우 표면염화물량의 증가를 고려할 때, 내구수명이 매우 빨리 감소되므로 적어도 10.0 kg/m<sup>3</sup> 보

다 높은 표면염화물량을 가지고 확산계수의 감소를 고려할 때 적절한 내구수명이 평가됨을 알 수 있다.

- 4) 본 연구에서는 실태조사결과를 기본으로 문헌조사를 통한 시간의존성을 고려하여 결정론적 및 확률론적 해석을 수행하였다. 더욱 합리적인 해석을 위해서는 시간에 따른 확산계수의 변화 특성과 노출 환경 및 시간에 따른 표면염화물량의 변화 등이 광범위한 실태조사결과 및 장기실험 등으로 규명되어야 한다.

## 감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-286 2013 R1A1A2060114)이며 저자는 이에 감사드립니다.

## References

1. Broomfield, J. P., *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair*, London, E&FN, 1997, pp.1-15.
2. Kwon, S.-J., Park, S. S., and Lho, B.-C., "Durability Evaluation of Inorganic-Impregnated Concrete Exposed to Long-Term Chloride Exposure Test", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.20, No.3, 2008, pp.283-290.
3. Thomas, M.D.A., and Bentz, E.C., *Computer program for predicting the service life and life-cycle costs of reinforced concrete exposed to chlorides*, Life365 Manual, SFA, 2002, pp.2-28.
4. Lee, S.-H., and Kwon, S.-J., "Experimental Study on the Relationship between Time-Dependent Chloride Diffusion Coefficient and Compressive Strength", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.24, No.6, 2012, pp.715-726.
5. Park, S.-S., Kwon, S.-J., and Jung, S.-H., "Analysis Technique for Chloride Penetration in Cracked Concrete Using Equivalent Diffusion and Permeation", *Construction and Building Materials*, Vol.29, No.2, 2012, pp.183-192.
6. Maekawa, K., Ishida, T., and Kishi, T., "Multi-Scale Modeling of Concrete Performance", *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.1, No.2, 2003, pp.91-126.
7. Song, H.-W., Park, S.-W., Lee, C.H., and Kwon, S.-J., "Service Life Prediction of Concrete Structures under Marine Environment Considering Coupled Deterioration", *Journal of Restoration Building and Monuments*, Vol.12, No.4, 2006, pp.265-284.
8. Duprat, F., and Sellier, A., "Probabilistic Approach to Corrosion Risk Due to Carbonation via An Adaptive Response Surface Method", *Journal of Probability Engineering and Mechanics*, Vol.21, No.4, 2006, pp.207-216.
9. Ferreira, F., Arskog, V., and Gjørsv, O. E., "Probability-

- Based Durability Analysis of Concrete Harbor Structures”, *Proceedings of CONSEC04*, Vol.1, No.1, 2004, pp.999-1006.
10. ACI 318-11, *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, 2011.
  11. British Standards 6349-1-4, *Maritime Works, General, Code of Practice for Materials*, 2013.
  12. British Standards-8110-1, *Structural Use of Concrete, Code of Practice for Design and Construction*, 1997.
  13. Japan Society of Civil Engineering, *Standard Specifications and Guidelines*, 2007.
  14. British Standards, 8500-1, Concrete Complementary British Standard to BS EN 206-1: Method of Specifying and Guidance for the Specifier, 2006.
  15. Japan Society of Civil Engineering-Concrete Committee, *Standard Specification for Concrete Structures*, 2002.
  16. ACI 301-10, *Specifications for Structural Concrete*, 2010.
  17. Korea Concrete Institute. *Concrete Standard Specification – Durability Part*, 2004.
  18. Kwon, S.-J., Na, U.J., Park, S.S., and Jung, S.H., “Service Life Prediction of Concrete Wharves with Early-Aged Crack: Probabilistic Approach for Chloride Diffusion”, *Structure and Safety*, Vol.31, No.1, 2009, pp.75-83.
  19. CEB Task Group 5.1, 5.2, *New Approach to Durability Design*, CEB, Sprint-Druck, Stuttgart, 1997, pp.29-43.
  20. Song, H.-W., Pack, S.-W., and Ann, K.-Y., “Probabilistic Assessment to Predict the Time to Corrosion of Steel in Reinforced Concrete Tunnel Box Exposed to Sea Water”, *Construction and Building Materials*, Vol.23, No.10, pp. 3270-3278.
  21. Stewart, M.G., and Mullard, J.A., “Spatial Time-Dependent Reliability Analysis of Corrosion Damage and the Timing of First Repair for RC Structures”, *Engineering Structure*, Vol.29, No.7, 2007, pp.1457-1464.
  22. Stewart, M.G., and Rosowsky, D.V., “Time-Dependent Reliability of Deteriorating Reinforced Concrete Bridge Decks”, *Structure and Safety*, Vol.20, No.1, 2007, pp.91-109.
  23. Kwon, S.-J., Song, H.-W., and Byun, K.J., “Durability Design for Cracked Concrete Structures Exposed to Carbonation Using Stochastic Approach”, *Journal of Korea Society of Civil Engineering*, Vol.25, No.5A, pp.741-750.
  24. Kwon, S.-J., Park, S.-S., Nam, S.-H., and Lho, B.-C., “A Service Life Prediction for Unsound Concrete Under Carbonation Through Probability of Durable Failure”, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol.12, No.2, 2008, pp.49-58.
  25. DuraCrete-Final Technical Report, *Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures*, Document BE95-1347/R17, European Brite-Euram III, Published by CUR, May, The Netherlands, 2000.
  26. Japan Society of Civil Engineering. Concrete Library 109: *Proposal of the Format for Durability Database of Concrete*, 2002.
  27. EN 1991. Eurocode 1, *Basis of Design and Actions on Structures*, CEN, 2000.
  28. Nawy, E.G., *Reinforced Concrete-A Fundamental Approach*, Prentice Hall, Inc. 2nd Edition, 1990, pp. 69-72.

**요 약** 염해에 노출된 콘크리트의 내구수명은 매우 중요한데, 주로 Fick's 2법칙에 근거한 결정론적인 방법과 확률론에 근거한 방법이 사용되고 있다. 본 연구에서는 시간의존적 확산계수와 표면염화물량을 고려하여 내구적 파괴확률과 이에 따른 내구수명의 변화를 평가하였다. 이를 위해 3.5~4.5년, 비교적 짧은 기간 염해에 노출된 RC 교각에 대하여 해상부(9.0 m)와 간만대(6.0 m) 구분하여 실태조사를 수행하였다. 피복두께, 표면염화물량, 염화물 확산계수에 대한 확률변수를 도출하였으며, MCS을 이용하여 내구적 파괴확률과 내구수명을 평가하였다. Life365를 이용한 결정론적 방법과 다르게, 시간의존성을 고려한 확률해석에서는 내구수명의 변동이 크게 발생하였으며, 표면염화물량이 낮은 조건에서는 초기에 빠른 내구수명의 감소가 평가되었다. 실태조사 결과를 이용하여 확률론적인 내구성 평가를 할 경우, 장기간 염해에 노출되어 10.0 kg/m<sup>3</sup> 이상의 높은 표면염화물량이 필요함을 알 수 있으며, 확산계수의 시간의존성에 따른 감소를 고려하면 합리적인 내구수명을 평가할 수 있다.

**핵심용어** : 염해, 확률론적 내구설계, 시간의존성 확산계수, Fick's 2법칙