

# RC 구조물 높이와 해안가 거리를 고려한 염해에 대한 내구수명 평가

## Service Life Evaluation Considering Height of RC Structures and Distance from Sea Shore

오경석<sup>1</sup> · 김영준<sup>1</sup> · 이성희<sup>1</sup> · 권성준<sup>1\*</sup>Kyeong-Seok Oh<sup>1</sup> · Young-Joon Kim<sup>1</sup> · Seong-Hee Lee<sup>1</sup> · Sung-Jun Kwon<sup>1\*</sup>

(Received June 2, 2016 / Revised June 14, 2016 / Accepted June 14, 2016)

For an evaluation of service life in RC(Reinforced Concrete) structures, deterministic method and probabilistic method considering random variables of design parameters are usually adopted. In the work, surface chloride contents which vary with distance from sea shore and height are investigated from the previous research literature surveys, and they are considered for service life estimation. Through the analysis, the probabilistic method shows much lower results, which is due to variations of design parameters and very low intended durability failure. In the deterministic method, the structures within 250m and higher than 60m are evaluated to be free from chloride attack. In the probabilistic method, those higher than 60m in all the region and higher than 40m and 250m from sea shore are evaluated to satisfy the service life.

**키워드 :** 내구수명, 확률론적 방법, 결정론적 방법, 해안으로부터 거리, 높이, 염해

**Keywords :** Service life, Probabilistic method, Deterministic method, Distance from sea shore, Height, Chloride attack

### 1. 서론

콘크리트는 공학적, 경제적 이점으로 현재까지 폭 넓게 사용되고 있는 건설재료이지만 노출환경에 따른 다양한 열화인자로 인해 매립된 철근은 부식이 발생한다(Broomfield 1997; CEB 1997). 이로 인해 현대 사회에는 콘크리트 구조물의 내구성에 대한 관심이 증가하고 있는 추세이며, 보다 합리적인 내구수명설계를 위해 다양한 열화인자에 대한 해석방법과 모델링의 연구들이 진행되어 왔다. 그중 염화물 이온( $Cl^-$ )은 이온 확산속도가 빠르며 철근부식에 직접적인 관여를 하므로 염해에 대한 내구성 설계가 꾸준히 연구되었다(RILEM 1994; Kwon et al., 2009; Duracrete 2000).

염해에 대한 내구성 설계는 결정론적인 방법과 확률론적인 방법으로 분류할 수 있다. 결정론적인 방법은 피크의 제2법칙에 기반한 염화물 확산이론이 주로 사용되는데, 이는 외부에서 유입되는 정상상태(steady-state condition)를 기본으로 하여 염화물 유입을 평가한다. 주로 실태조사 및 장기노출자료를 기본으로 하고 있

으며, 혼화재 영향과 시간의존성을 고려한 연구해석으로 활발하게 적용되고 있다(Thomas and Bentz 2002; Kwon et al., 2005). 최근 들어 공극률 및 수화도와 같은 초기재령 거동 모델링을 기반으로 한염화물 이동 모델링이 제안되고 있으며, 전기장내의 확산, 침투, 자유 염화물량의 고정화를 고려하여 엄밀한 해석을 수행할 수 있도록 제안되고 있다(Maekawa et al., 2003; Park et al., 2012).

이러한 정량적인 해석방법에도 재료, 시공, 설계의 공학적 불확실성(engineering uncertainties)으로 인해 확률론적인 해석이 시도되고 있다. 1990년대부터 시작된 확률론적 해석방법은 목표 내구수명동안 유입된 염화물량이 임계 염화물량을 초과할 확률이 설계 내구성 파괴확률을 초과하지 않도록 설계하는 것으로 염화물 이동방정식은 결정론적인 해석방법과 동일하다. 다만 콘크리트 피복두께, 확산계수 등의 주요 설계변수에 확률분포와 변동성을 고려하여 노출기간에 따라 내구적 파괴확률을 산정하도록 유도한다(Duracrete 2000; Kim et al., 2006).

기존의 연구에서는 다양한 노출환경과 균열부, 타설이음부와

\* Corresponding author E-mail: [jjuni98@hannam.ac.kr](mailto:jjuni98@hannam.ac.kr)

<sup>1</sup>한남대학교 건설시스템공학과 (Hannam University, Civil and Environmental Eng., Daejeon 34430, Korea)

같은 취약부에 대한 내구적 파괴확률도 수행되었으나(Kwon et al. 2009), 해안으로부터의 거리와 구조물 높이에 따라 변화하는 노출 환경을 동시에 고려한 연구는 매우 희박하다. 국내외 시방서에는 목표내구수명동안 유입되는 염화물량이 임계염화물(1.2kg/m<sup>3</sup> 또는 단위결합재량의 0.4%)을 초과하지 않도록 유도하고 있으며(KCI 2009; JSCE 2002), 주요 토목구조물인 교량, 고가도로, 지하철, 터널 등에 대한 목표내구수명은 100년으로 유도하고 있다. 하지만 동일한 구조물이라도 노출환경 및 높이에 따라서 합리적인 목표내구수명을 설정하는 것이 더욱 경제적인 구조물 설계로 이어질 수 있다. 실제로 구조물에 대해 해안으로부터 거리별, 위치별 표면염화물량이 다르게 측정된다. 국내외 시방서에는 해안선을 기준으로 표면염화물량을 지정하였고, 구조물의 높이에 따라 표면염화물량이 차이가 있음을 확인하는 연구가 진행되어 왔다(Irina et al. 2010).

본 연구에서는 확산계수의 시간의존성 변화를 적용한 확률론적 해석을 MSC(Monte Carlo Simulation)방법을 적용하여 내구수명 평가를 수행하였다. 이를 위해 실제 구조물의 높이별 표면염화물량과 일본토목학회 콘크리트 표준시방서에서 명시한 해안선으로부터 거리에 대한 표면염화물량을 적용하여 시간 및 공간을 고려한 염화물 해석을 실시하였다. 또한 결정론적 방법인 Life-365를 통한 염화물 해석을 수행하여 각 방법에 따라 도출되는 내구수명을 비교하였다.

## 2. 확률론적 내구수명 평가기법의 개요

확률론적인 내구수명 평가방법은 피복두께, 표면염화물량, 확산계수, 임계염화물 등을 일정하게 가정하지 않고 확률변수로 정의하여 평균 및 변동계수를 설정한다. 확률론적 설계에서는 주로 MCS(Monte Carlo Simulation)을 통해 목표내구수명동안 염화물 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 개요를 Fig. 1에 나타내었다.

$$P \{ C_{cr}(\mu, \sigma) < C_s(\mu, \sigma) \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x(\mu, \sigma)}{\sqrt{D(\mu, \sigma)t}} \right) \right] \} < P_{\max} \quad (1)$$

여기서  $C_{cr}(\mu, \sigma)$ ,  $C_s(\mu, \sigma)$ ,  $D(\mu, \sigma)$ ,  $x(\mu, \sigma)$ 는 임계염화물량, 표면염화물량, 염화물확산계수, 피복두께에 대한 확률변수로 각각

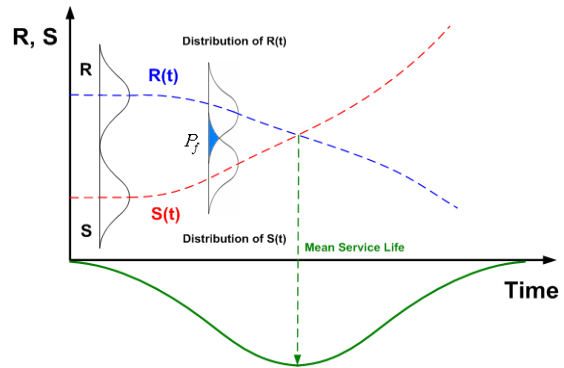


Fig. 1. Concept of probabilistic method for durability design (Duracrete, 2000)

의 평균과 표준편차를 가진다.  $P_{\max}$ 는 목표내구수명에 따른 목표 내구성 파괴확률을 나타낸다. Fig. 1에서는 확률론적 설계의 기본 개념을 나타내고 있다.

Fig. 1에서 시간에 따라 변화하는 저항내력- $R(t)$ 와 열화외력- $S(t)$ 을 이용한 설계개념은 service period design으로, 하나의 확률로 고려하는 아래의 그림은 lifetime design으로 알려져 있다(CEB 1997). 결정론적 방법을 통한 내구성 설계의 경우, 콘크리트 내부로 염화물의 유입이 증가하므로 부식확률이 증가하게 되고 이에 따라 내구수명은 감소하게 된다. 그러나 확률론적인 설계의 경우, 염화물 유입이 증가하더라도 설계변수의 변동성으로 인해 내구성 파괴확률은 다양하게 변하게 된다.

3장에서는 실태조사 및 시방서에 따라 도출된 RC 구조물의 겉보기 확산계수를 기본으로 시간의존성 확산계수의 변화를 고려하여 내구수명을 시·공간상에서 분석하였다.

## 3. 실태조사를 통한 비말대 표면염화물량와 확산계수 분석 및 내구수명 평가

### 3.1 탄산화 깊이 및 CO<sub>2</sub> 확산계수

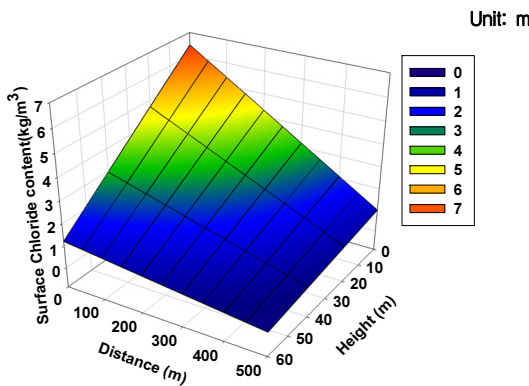
본 절에서는 높이 및 거리에 따른 겉보기 염화물량의 변화를 분석하기 위해 기존의 실태조사 자료를 분석하였다(Irina et al. 2010). 기존의 연구에서는 krk Arch Bridge의 겉보기 염화물량을 높이에 따른 표면염화물량을 조사하였는데, 본 논문에서는 Table 1과 같이 높이에 따른 가중치로 정규화하였다. 또한 거리에 따른 표면염화물량의 변화를 분석하기 위해 일본토목학회에서 제안하는 값을 사용하였으며, Table 2에 나타내었다(JSCE 2007). 이는 해안선으로부터 표면염화물량의 변화를 제안하였고, 해안으로부터 떨어질수록 지수함수 형태로 표면염화물량은 감소하게 된다.

**Table 1.** Surface chloride content of krk bridge with member height

Height (m)	Surface chloride content(kg/m <sup>3</sup> )					
	Average	1	2	3	4	Normalize
0	1.26	0.90	0.81	2.03	1.31	1.00
20	0.70	0.54	0.77	0.54	0.95	0.55
40	0.38	0.36	0.41	0.41	0.36	0.30
60	0.41	0.36	0.59	0.32	0.36	0.28

**Table 2.** Surface chloride content from coastline

Surface chloride content(kg/m <sup>3</sup> )	Distance from the coastline(m)				
	Coastline	100	250	500	1000
		9.0	4.5	3.0	2.0



**Fig. 2.** Surface chloride content with varying distance and height

국내 연구에서도 간만대, 비말대, 해상대기부의 콘크리트 구조물에 대한 염화물분석을 실시하여 거리에 따라 감소하는 표면염화물량을 제안하였다(Cheong et al. 2005).

Table 1 및 Table 2의 결과를 수직으로 회귀분석하면 식 (1) 및 식 (2)와 같이 나타낼 수 있으며, 이를 Fig. 2에 나타내었다.

$$y = -0.0115H + 0.8866 \tag{1}$$

$$y = -0.0122L + 7.2185 \tag{2}$$

여기서 y는 표면염화물량(kg/m<sup>3</sup>), H는 야치교의 높이(m), L은 해안으로부터 거리(m)이다. 식 (1), (2)는 염화물 해석결과에 사용되어 거리와 높이에 따라 변화하는 내구수명을 산정하게 된다.

### 3.2 결정론적 방법에 따른 내구수명 평가

결정론적 방법을 통한 염화물 거동을 평가하기 위해 Life-365

를 사용하였는데, 이 프로그램은 유한차분법을 사용하여 확산계수의 시간의존성 및 온도의존성을 고려할 수 있다. 식 (3)에서는 28일 재령의 기본확산계수를 나타내고 있으며, 식 (4)에서는 시간계수 m을 사용하여 변화하는 확산계수를 나타내고 있다(Thomas and Bentz 2002).

$$D_{28} = 1 \times 10^{(-12.06 + 2.40 W/C)} \tag{3}$$

$$D(t) = D_{ref} \left( \frac{t_{ref}}{t} \right)^m \tag{4}$$

여기서, 식 (3)의 D<sub>28</sub>은 28일 확산계수(m<sup>2</sup>/sec), W/C는 물-시멘트 비를 나타내고 있다. 식 (4)에 D(t)는 임의의 시간 t에서의 확산계수(m<sup>2</sup>/sec), D<sub>ref</sub>는 기준시간(t<sub>ref</sub>)에서의 확산계수, m은 시간(재령)에 따른 시간계수로서 life-365에서는 일반 OPC의 경우 0.2로 가정한다. 일반적으로 30년 이상 경과한 구조물에 대해서는 확산계수는 일정하다고 가정된다(Thomas and Bamforth 1999).

콘크리트에 대한 염화물 확산계수의 거동은 시간에 따라 일정하지 않고 수화반응이 진전되어 점차 감소하게 된다. 따라서 확산계수가 시간에 따라 감소하는 것을 고려하지 않고 초기 확산계수를 그대로 적용하게 되면 지나친 보수적 결과를 도출하게 된다. 일정한 시간을 가정하면 시간의존성 확산계수는 혼화재의 영향을 고려하여 식 (5a) 및 (5b)와 같이 나타낼 수 있다(Poulsen 1993).

$$D(m) = \frac{D_0}{1-m} \left( \frac{t_0}{t} \right) \quad (t < t_c) \tag{5a}$$

$$D(m) = \frac{D_0}{(1-m)} \left( \frac{t_{28}}{t_c} \right)^m \left[ 1 - m + m \frac{t_c}{t} \right] \quad (t \geq t_c) \tag{5b}$$

여기서, D(m)은 시간 t(sec)에서의 확산계수(m<sup>2</sup>/sec), D는 t<sub>0</sub>에서의 확산계수, t<sub>c</sub>는 확산계수가 더 이상 감소하지 않는 시간을 나타내며, 일반적으로 t<sub>c</sub>는 30년으로 가정하고 있다. 확산계수의 시간의존성은 결정론적 방법에만 적용하도록 한다. 표면염화물량은 앞서 3장의 결과를 사용하였으며, 해석조건은 Table 3에 정리

**Table 3.** Analysis condition for deterministic method

Service life (year)	W/C (%)	Cover depth (mm)	C <sub>cr</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	m	Monthly temperature (°C)
500	40	80	1.2	0.2	-6.7 ~ 20.5

하였다.

### 3.3 확률론적인 방법에 따른 내구수명 평가

#### 3.3.1 확률변수의 설정

확률론적인 해석을 위하여 피복두께, 확산계수, 임계염화물량을 확률변수계수로 설정하였으며, 기존의 문헌을 분석하여 변동계수는 도출하였다(Kwon et al, 2009; Song et al, 2009; Kwon 2016). Table 4에서는 해석에 필요한 확률변수 및 변동계수를 나타내었다. 결정론적인 해석방법과 비교하기 위하여 확산계수, 피복두께, 표면염화물량의 평균은 Table 3와 동일하다. 실태조사를 직접 수행하지 못하였으므로 기존의 연구결과를 참고하여 확산계수의 경우 로그분포를, 그 외의 확률변수에 대해서는 정규분포를 가정하였다.

Table 4. Random variables for probabilistic method

Random variables	Diffusion coefficient ( $D$ )	Surface chloride content ( $C_s$ )	Cover depth ( $x$ )	Critical chloride content ( $C_{cr}$ )
C.O.V	0.223	0.112	0.241	0.200

#### 3.3.2 높이 및 거리에 따른 내구적 파괴확률 평가

본 절에서는 Table 3 및 Table 4의 조건을 이용하여 높이와 거리에 내구적 파괴확률을 분석하였다. 표면염화물량의 변동성은 식 (1) 및 식 (2)를 사용하여 높이 및 거리의 증가에 따라 감소하도록 고려하였다. 식 (3)에서 제시한 겉보기 확산계수는 설계사의 제안식이므로 실제 실험결과보다 큰 값을 제공하고 있다. 기존의 실험결과(Lee and Kwon 2012)를 고려하면 유효한 28일 재령확산계수와 비교하면 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다.

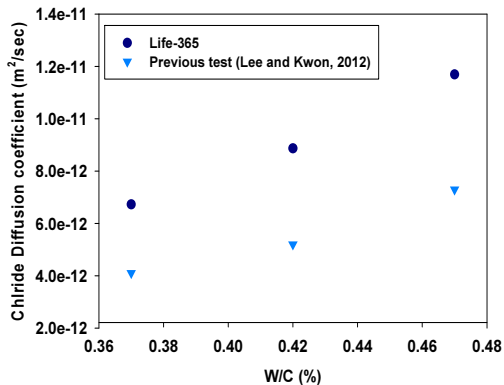


Fig. 3. Comparison of reference diffusion coefficient

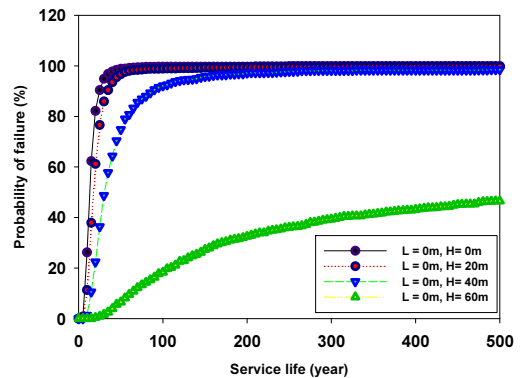
Fig. 3과 같이 기준확산계수는 Life 365에서 제안하는 값의 0.58~0.62 수준임을 알 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 식 (6)과 같은 28일 재령확산계수를 사용하였다.

$$D_{28} = C[1 \times 10^{(-12.06 + 2.40 W/C)}] \quad (6)$$

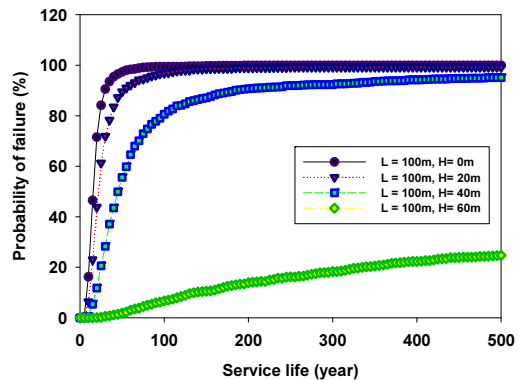
여기서  $C$ 는 실험상수로 0.6을 가정하였다.

대상구조물의 높이는 기존 실태조사를 고려하여 60m까지, 거리는 해안선에서부터 500m까지의 표면염화물량의 감소를 적용하였다. MCS를 수행하기 위한 발생빈도는 1,000으로 고정하여 해석을 수행하였다.

시뮬레이션 결과를 Fig. 4에 나타내었으며 해안선으로부터 거리가 멀어질수록, 구조물의 높이가 증가할수록 표면염화물량이 낮게 평가되어 파괴확률이 점차 감소하는 것을 볼 수 있다. 해안으로부터 500m 떨어진 곳의 파괴확률은 너무 낮은 표면염화물량으로 인하여 파괴확률이 시간이 지남에 따라 높아지지 않고 일정하게 평가되었다.

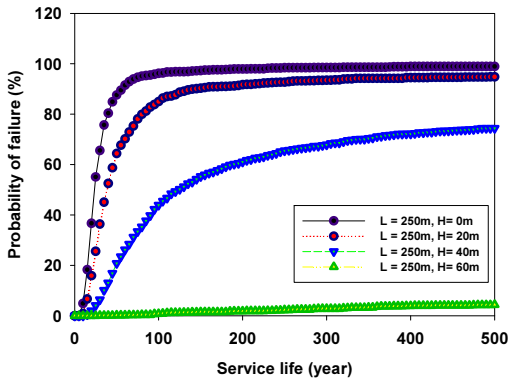


(a) L = 0m, H = 0m, 20m, 40m, 60m

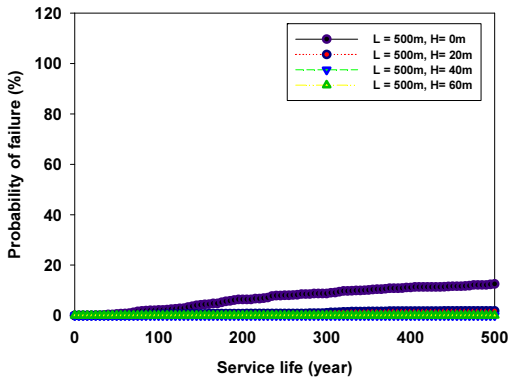


(b) L = 100m, H = 0m, 20m, 40m, 60m

Fig. 4. Probability of failure according to the height & distance



(c) L = 250m, H = 0m, 20m, 40m, 60m



(d) L = 500m, H = 0m, 20m, 40m, 60m

Fig. 4. Probability of failure according to the height & distance (Continued)

## 4. 거리 및 높이를 고려한 내구수명 비교

### 4.1 내구수명 도출

#### 4.1.1 결정론적 방법에 따른 내구수명 도출

결정론적 해석방법인 Life-365를 사용하여 내구수명을 도출하여 Table 5에 나타내었으며 이를 Fig. 5에 컨투어로 도시하였다. 단 기준 확산계수는 실제 실험결과를 고려하여 식 (6)을 사용하였다.

현재 국내외 기준에서는 7.0~10.0%의 내구적 파괴확률을 염해에 대하여 한계 상태로 정의하고 있는데(JSCE 2007; EN 2000;

Table 5. Service life results based on Life-365(year)

Distance from the coastline(m)	Height(m)			
	0	20	40	60
0	7	10	14	62
100	8	11	19	138
250	12	16	33	500
500	460	500	500	500

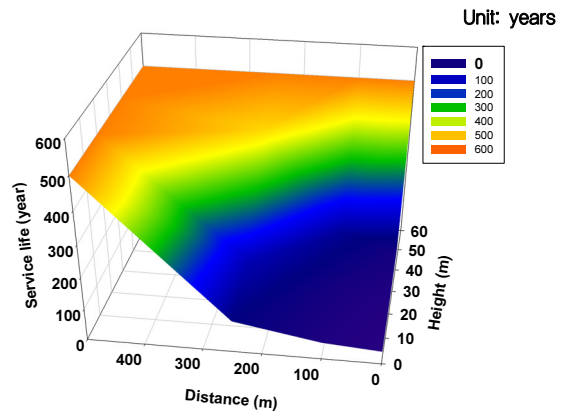


Fig. 5. Service life according to Life-365

KCI 2009), 본 연구에서는 일반적인 수준인 10.0%의 내구성 파괴 확률을 한계상태로 정의하였다. 최대표면염화물량은 각 거리와 높이에 대한 표면염화물량으로 설정하였고 도달하는 시간은 10년으로 가정하였다. 해석조건은 Table 3과 동일하다. 500년 이상의 내구수명은 물리적으로 큰 의미가 없으므로 500년으로 고정하였다.

시뮬레이션 결과 해안으로부터 점차 멀어지고 높이가 높을수록 높은 내구수명을 보였다. 이는 구조물의 실태조사에 따라 높이에 대한 표면염화물량과 거리에 따른 표면염화물이 동시에 고려된 표면염화물은 매우 낮기 때문이다.

#### 4.1.2 확률론적 방법에 따른 내구수명 도출

전술한대로 MCS를 실행하기 위한 발생빈도는 1,000으로 설정하였고, Table 4와 마찬가지로 표준편차와 거리와 높이에 대한 표면염화물량을 적용하여 시뮬레이션을 실시하였다. 결정론적방법과 내구수명을 비교평가하기 위해 경계조건을 동일하게 가정하였다. 내구수명 결과는 Table 6에 나타내었으며, Fig. 6에 컨투어로 나타내었다.

확률론적 방법에 따른 내구수명 평가 결과 결정론적 방법과 같은 경향을 보이지만 가까운 거리와 낮은 높이에 대한 내구수명 평가결과를 비교해보면, 확률론적 방법이 훨씬 작은 값을 보임을 알

Table 6. Service life results based on probabilistic analysis(year)

Distance from the coastline(m)	Height(m)			
	0	20	40	60
0	40	53	99	500
100	47	66	141	500
250	70	115	432	500
500	500	500	500	500

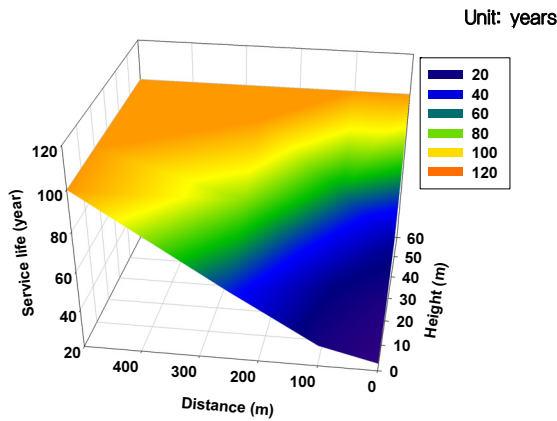


Fig. 6. Service life according to probabilistic analysis simulation

수 있다. 이는 앞서 말한 바와 같이 변동성을 고려하지 않은 결정론적 방법과 확산계수, 표면염화물량, 피복두께 등에 대한 변동계수를 고려한 결과이기 때문이다.

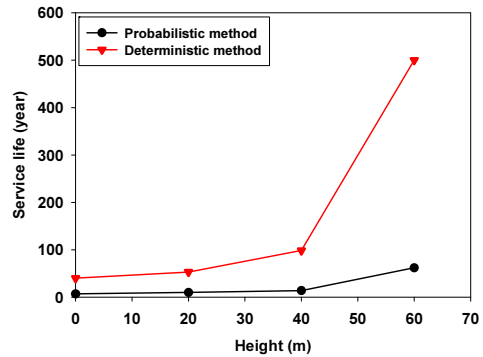
#### 4.2 거리 및 높이 특성을 고려한 내구수명 비교

Life 365로 산정된 결정론적 내구수명 평가 결과와 MCS을 이용한 확률론적 평가결과를 거리 및 높이에 따라 Fig. 7에 도시하였다. 결정론적 방법과 확률론적 방법으로 평가된 내구수명을 직접 비교한 결과, 확률론적 방법이 결정론적 방법보다 내구수명이 매우 낮게 평가되었음을 알 수 있었다. 그 이유는 각 확률변수의 변동성이 크다 하더라도 목표내구수명동안 부식이 발생할 확률을 10%로 설정하였기 때문이다.

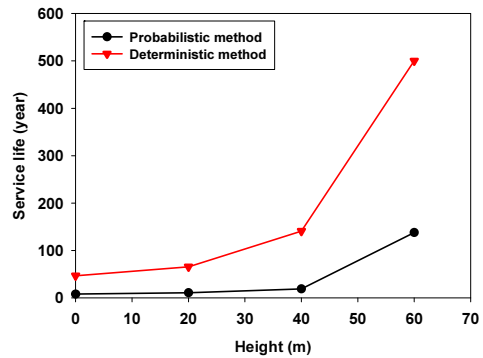
본 연구는 실태조사결과에 따른 높이에 대한 결보기 확산계수의 영향과 일본토목학회에서 고려하는 거리별 표면염화물량을 적용하여 결정론적 방법 및 확률론적 방법으로 내구수명을 평가하였다. 결과적으로 표면염화물량이 매우 작은 값을 적용하지 않는다면 확률론적 방법은 결정론적 방법보다 약 5~13배의 낮은 내구수명을 도출한다. 결정론적 방법에서는 해안가 250m 이내에서는 높이 60m 이상에서, 500m에서는 염해에 의한 피해를 고려하지 않아도 되는 것으로 평가되었다. 또한 확률론적인 방법에서는 전 구간에서 60m 이상의 지역, 250m 이내에서는 40 m 이상의 구조물은 염해에 대하여 안전한 것으로 평가되었다.

### 5. 결론

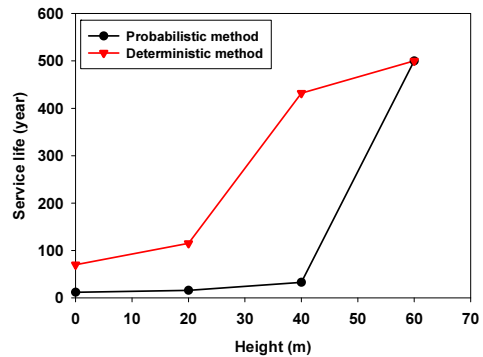
본 연구에서는 시간의존성을 고려한 결정론적 방법과 다양한 변동계수를 적용한 확률론적 내구수명 평가를 통해 도출된 결론은



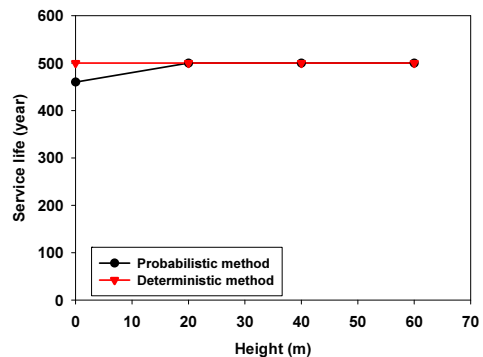
(a) L = 0m, H = 0m, 20m, 40m, 60m



(b) L = 100m, H = 0m, 20m, 40m, 60m



(c) L = 250m, H = 0m, 20m, 40m, 60m



(d) L = 500m, H = 0m, 20m, 40m, 60m

Fig. 7. Comparison with results of service life

다음과 같다.

1. 일본토목학회에서 제안한 거리에 따른 표면염화물량과 기존 연구의 실태조사에 따른 높이별 표면염화물량을 적용하여 픽의 제 2법칙에 따른 결정론적인 방법과 다양한 변동계수를 적용한 확률론적인 방법으로 내구수명을 평가하였다.
2. 결정론적 내구수명 평가 결과 해안으로부터 점차 멀어지고 높이가 높을수록 높은 내구수명을 보였다. 해안으로부터 가까울수록 높이가 낮을수록 내구수명이 급격하게 감소되어 평가됨을 알 수 있었다. 이는 표면염화물량에 대한 값이 해안으로부터 가까울수록 급격하게 큰 값을 사용하게 된 결과로 판단된다.
3. 확률론적 내구수명 평가 결과 결정론적 방법과 같이 경향은 비슷하나 내구수명이 500년으로 도출된 결과를 제외하고는 약 5~13배 정도로 결정론적 방법보다 낮게 평가되었음을 알 수 있었다. 이는 표면염화물량, 염화물확산계수, 피복두께 등에 따라 변동성이 발생하지만, 목표내구성 확률을 10%로 설정하였기 때문이다.
4. 결정론적 방법에서는 해안가 250m 이내에서는 높이 60m 이상에서, 500m에서는 염해에 의한 피해를 고려하지 않아도 되는 것으로 평가되었다. 또한 확률론적인 방법에서는 전 구간에서 60m 이상의 지역, 250m 이내에서는 40 m 이상의 구조물은 염해에 대하여 안전한 것으로 평가되었다.

## 감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2015R1A5A1037548).

## References

Broomfield, J.P. (1997). Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair, London, E&FN, 1-15.

CEB Task Group 5.1, 5.2. (1997). New Approach to Durability Design, CEB, Sprint-Druck, Stuttgart, 29-43.

Cheong, H.M., Ahn, T.S., Lee, B.D. (2005). Surface chloride content of concrete in domestic west and south coast, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 173-176 [in Korean].

DuraCrete-Final Technical Report. (2000). Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures,

Document BE95-1347/R17, European Brite-Euram III, CUR, Netherlands.

EN 1991. (2000). Eurocode 1: Basis of Design and Actions on Structures, CEN.

Irina, S.O., Dubravka, B., Dunja, M. (2010). Evaluation of service life design models on concrete structures exposed to marin environment, Materials and Structures, **43(10)**, 1397-1412.

Japan Society of Civil Engineering. (2002). Concrete Library 109: Proposal of the Format for Durability Database of Concrete.

JSCE-Concrete Committee. (2007). Standard Specification for Concrete Structures.

Kim, J.S., Jung, S.H., Kim, J.H., Lee, K.W., Bae, S.H. (2006). Probability-based durability analysis of concrete structures under chloride attack environment, Journal of the Korea Concrete Institute, **18(2)**, 239-248 [in Korean].

Korea Concrete Institute. (2009). Concrete Standard Specification - Durability Part [in Korean].

Kwon, S.J., Na, U.J., Park, S.S., Jung, S.H. (2009). Service life prediction of concrete wharves with early-aged crack: probabilistic approach for chloride diffusion, Structure and Safety, **31(1)**, 75-83.

Kwon, S.J., Song, H.W., Byun, K.J. (2005). Durability design for cracked concrete structures exposed to carbonation using stochastic approach, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, **25(5)**, 741-750 [in Korean].

Lee, S.H. (2012). Experimental study on the relationship between time-dependent chloride diffusion coefficient and compressive strength, Journal of the Korea Concrete institute, **24(6)**, 715-726 [in Korean].

Maekawa, K., Ishida, T., Kishi, T. (2003). Multi-scale modeling of concrete performance, Journal of Advanced Concrete Technology, **1(2)**, 91-126.

Park, S.S., Kwon, S.J., Jung, S.H. (2012). Analysis technique for chloride penetration in cracked concrete using equivalent diffusion and permeation, Construction and Building Materials, **29(2)**, 183-192.

Poulsen, E. (1993). On a Model of Chloride Ingress into Concrete, Nordic Mini Seminar-Chloride Transport, Department of

- Building Materials, Gouthenburg.
- RILEM. (1994). Durability Design of Concrete Structures, Report of RILEM Technical Committee 130-CSL, E&FN, 28–52.
- Song, H.W., Pack, S.W., Ann, K.Y. (2009). Probabilistic assessment to predict the time to corrosion of steel in reinforced concrete tunnel box exposed to sea water, Construction and Building Materials, **23(10)**, 3270–3278.
- Thomas, M.D.A., Bentz, E.C. (2002). Computer Program for Predicting the Service Life and Life–Cycle Costs of Reinforced Concrete Exposed To Chlorides, Life365 Manual, SFA, 2–28.
- Thomas, M.D.A., Bamforth, P.B. (1999). Modeling chloride diffusion in concrete: effect of fly ash and slag, Cement and Concrete Research, **29(4)**, 487–495.

#### RC 구조물 높이와 해안가 거리를 고려한 염해에 대한 내구수명 평가

콘크리트 구조물의 내구수명평가는 주로 해석 변수의 변동성을 고려하지 않은 결정론적 방법과 변동성을 고려한 확률론적 방법이 사용되고 있다. 본 연구에서는 해안으로부터의 거리와 높이에 따른 내구수명 평가를 위해 일본토목학회에서 제안한 해안으로부터 거리에 따른 표면염화물량과 실태조사를 통한 높이에 따른 표면염화물량을 적용하였다. Fick's 2<sup>nd</sup> Law에 기반을 둔 Life-365를 이용한 결정론적 방법과 MCS을 이용한 확률론적 방법을 수행하여 내구수명을 평가하였다. 평가결과 확률론적 방법이 결정론적 방법보다 낮은 내구수명이 평가되었으며, 이는 기존에 연구된 확산계수, 피복두께, 표면염화물량 등의 변동계수 뿐 아니라 낮은 목표내구적 파괴확률을 설정하였기 때문이다. 결정론적 방법에서는 해안가 250m 이내에서는 높이 60m 이상에서, 500m에서는 염해에 의한 피해를 고려하지 않아도 되는 것으로 평가되었다. 또한 확률론적인 방법에서는 전 구간에서 60m 이상의 지역, 250m 이내에서는 40m 이상의 구조물은 염해에 대하여 안전한 것으로 평가되었다.