

결정론 및 확률론적 방법에 따라 시간의존성 염화물 확산계수 및 외부 영향인자가 내구수명에 미치는 영향

권성준*

Effect of Time-dependent Diffusion and Exterior Conditions on Service Life Considering Deterministic and Probabilistic Method

Seung-Jun Kwon^{1*}

Abstract: Service life evaluation for RC Structures exposed to chloride attack is very important, however the previous two methods(deterministic and probabilistic method) show a big difference. The paper presents a service life simulation using deterministic and probabilistic method with time-dependent diffusion coefficient. Three different cases are considered for diffusion coefficient, concrete cover depth, and surface chloride content respectively, and then the PDF(probability of durability failure) and the related service life are obtained. Through adopting time-dependent diffusion, the discrepancy between the two methods can be reduced, which yields reasonable service life. When diffusion coefficient increases from $2.5 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$ to $7.5 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$, the service life decreases to 25.5~35.6% level, and cover depth does from 75 mm to 125 mm, it increases to 267~311% level as well. In the case of surface chloride content from 5.0 kg/m^3 to 15.0 kg/m^3 , it changes to 40.9~54.5%. The effect of cover depth is higher than the others by 8~10 times and also implies it is a key parameter to service life extension.

Keywords: Chloride attack, Service life, Diffusion coefficient, Surface chloride content, Cover depth

1. 서 론

콘크리트내부로 유입된 염화물 이온은 매립된 강재의 부식을 야기하고 부식량의 증가에 따라 사용성 및 안전성 문제가 증가하게 된다(Broomfield, 1997). 매립된 철근에 발생하는 부식은 초기에는 부식량의 팽창효과에 따라 역학적 성능이 일부 개선되기도 하지만 부식량이 보통 5.0% 이상 증가하게 되면 슬립효과가 크게 진전되어 RC(Reinforced Concrete)의 기본가정인 일체성이 없어지게 된다(Chung et al., 2008; Hakan et al., 2012).

기존의 많은 연구에서 염해에 노출된 콘크리트의 내구수명에 대한 연구가 진행되었는데, 크게 결정론적인 방법과 확률론적인 방법으로 분류할 수 있다. 결정론적인 방법은 주로 Fick's 2nd Law를 기본으로 하는데, 염화물 이동을 직접적으로 평가하는 방법으로 콘크리트 피복두께, 염화물 확산계수, 그리고 부식을 야기하는 임계염화물량을 주요 변수로 하고

있다. Fick's 2nd Law는 정상상태를 가정하고 있으므로 각 변수는 시간에 따라 일정한 값을 가지는 정상상태(Steady-State Condition)를 기본 가정으로 한다(Thomas and Bentz, 2002; CEB, 1997; RILEM, 1994). 최근 들어 초기재령 거동인 콘크리트의 수화도 및 수분이동을 고려한 열역학적 연성해석에 대한 연구도 많이 진행되고 있는데, 이러한 해석은 주로 Nernst-Einstein Equation을 지배방정식으로 사용하고 있다. 이러한 식은 염화물 이온의 유입, 확산 및 수압에 의한 염화물 이동(Flux), 그리고 수화물과의 흡착을 고려하여 염화물 거동을 해석한다(Maekawa et al., 2003; Song et al., 2006). 실무에서 사용하기에는 해석 및 경계조건의 어려움과 장기 해석시 수렴 문제로 인해 적극적으로 활용되지 못하고 있다. 이러한 연성 해석에는 자유염화물과 고정염화물의 상평형(Isotherm), 염화물의 확산이동과 압력에 의한 이동(Flux), 그리고 시멘트수화물에 의하여 흡착되는 고정염화물을 각각 고려해야 하는 어려움이 있다.

콘크리트는 시멘트를 기본으로 하는 복합재료이므로 재료 자체의 불확실성(Uncertainties)이 매우 크며, 시공시의 정도에 따라 피복두께의 오차가 발생한다. 또한 임계염화물로 규정한 값들(Hussain et al., 1995; Alonso et al., 2002) 역시 연구

¹정회원, 한남대학교 건설시스템공학과 부교수, 교신저자

*Corresponding author: jjuni98@hannam.ac.kr

Department of Civil Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2016년 12월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 1월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

자 및 노출환경에 따라 변동하게 된다. 이러한 변동성을 가진 영향인자의 변동성을 고려하기 위해 1990년대부터 확률론적인 방법이 도입되기 시작했다. 확률론적 방법은 Fick's 2nd Law와 같은 염화물 확산방정식을 사용하지만, 목표 내구적 파괴 확률과 부식이 발생할 확률을 비교하는 것으로 결정론적인 방법에 비해 보수적으로 알려져 있다(Kwon et al., 2009; Song et al., 2006).

최근 들어 플라이애쉬(FA: Fly Ash)나 고로 슬래그미분말(GGBFS: Ground Granulated Blast Furnace Slag)와 같은 혼화재가 적극적으로 사용되면서, 시간에 따른 염화물 확산계수의 감소에 대한 관심이 증가하고 있다. Life365와 같은 결정론적 방법에서도 혼화재에 따른 시간의존성 확산성을 고려하고 있는데, 혼화재 수화의 증가에 따른 공극률 감소, 외부 및 내부 농도차의 감소에 따른 확산 저감성, 수화물 생성의 증가에 따른 염화물 흡착 증가 등에 따라 염화물 이동이 저해되는 거동을 간단히 시간의 함수로 구현한 것이다(Lee and Kwon, 2012; Poulsen, 1993; Tang and Joost, 2007). 결정론적인 방법에 대해서는 시간의존성 확산계수에 대한 연구는 꾸준히 진행되어 왔는데, 확률론적인 해석에 대해서는 해석의 어려움으로 인해 시간 영향을 고려한 내구성 해석은 매우 제한적으로 수행되고 있다.

염화물 유입을 효과적으로 제어하기 위해서는 피복두께를 증가시키는 것이 가장 효과적으로 알려져 있으며, 이는 외부 염화물량의 변화에 민감하게 반응하여 내구수명 영향을 준다. 본 연구에서는 시간의존성에 대한 확산계수의 변화를 고려하여 결정론적인 방법과 확률론적인 방법에 따른 내구수명 변화를 분석하도록 한다. 또한 주요 설계변수인 피복두께와 표면염화물량의 변화가 내구수명에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다.

2. 내구수명 평가를 위한 시간의존성 확산계수의 적용 모델링

2.1 Fick's 2nd Law에 근거한 결정론적 방법

결정론적인 방법은 식 (1)과 같은 지배방정식을 사용하였다. 표면의 염화물량은 일정하다고 가정하는 Fick's 2nd Law에서는 염화물량을 직접적으로 사용자에게 제공하므로 적용하기 쉬운 장점이 있다. 그러나 겉보기 확산계수를 통하여 도출되므로 장기실험 또는 신타조사결과에 의존하는 문제점이 있기도 하다(CEB, 1997; RILEM, 1994).

$$C(x,t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{\bar{D}t}} \right) \right], \quad \bar{D} = D_{28} \left(\frac{t_{28}}{t} \right)^m \quad (1)$$

여기서, C_s 는 표면염화물량, x 및 t 는 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 시간지수인데, 혼화재의 사용에 따라 0.2~0.6사이의 값을 가정하여 시간에 따른 염화물 감소를 수치적으로 구현하고 있다(Thomas and Bentz, 2002).

결정론적인 방법에서는 콘크리트로 유입된 염화물량이 최외각 철근 위치에서 목표내구수명 동안 임계염화물량을 초과하지 않는 상태를 한계상태로 정하고 있다(JSCE, 2002, 2007; KCI, 2012).

2.2 MCS에 근거한 확률론적 방법

확률론적인 방법은 주로 MCS(Monte Carlo Simulation)을 이용하여 확률변수들에 대한 변동성을 고려한다. Fig. 1에서는 확률론적인 설계방법의 개요도를 나타내었는데, 열화외력(S_i)는 시간에 따라 증가하는 유입된 염화물량으로 하였으며, 저항내력(R_i)는 부식발생의 임계염화물량으로 하는 것이 일반적이다(Ferreira et al., 2004; DuraCrete Final Report, 2000). 식 (2)에서는 본 연구에서 적용되는 확률론적 설계의 지배방정식을 나타낸다.

$$P \left\{ C_{cr}(\mu, \sigma) < C_s(\mu, \sigma) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x(\mu, \sigma)}{D(\mu, \sigma)t} \right) \right] \right\} < P_{\max} \quad (2)$$

여기서, $C_{cr}(\mu, \sigma)$ 는 임계부식량의 확률변수이며, P_{\max} 는 목표내구수명동안 유지되어야 하는 예상되는 목표 내구성 파괴확률의 최대치이다. 각국에서는 7.0~10.0% 수준의 목표내구성 파괴확률을 제시하고 있는데(EN 1991, 2000; JSCE, 2007), 국내에서는 탄산화와 염해에 대하여 10.0%의 목표내구적 파괴확률을 정하고 있다(KCI, 2012).

MCS에서 시간의존성을 고려하기는 매우 어려운 문제이다. 그러나 일정한 정상상태 조건에서는 매개변수 $I(t)$ 를 이

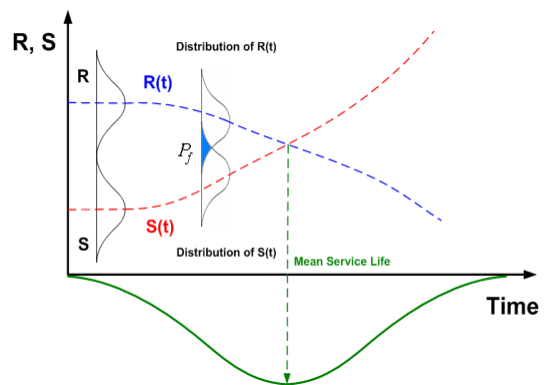


Fig. 1 Probabilistic method for durability design

용하여 식 (3)과 같이 일정시간에서의 균등한 확산계수를 모델링 할 수 있다(Poulsen, 1993).

$$D(t) = \int_0^t D(\tau) d(\tau) \quad (3)$$

식 (3)을 고려하면 식 (1)에서의 \bar{D} 는 m 을 상수로 가지는 $D(m)$ 으로 나타낼 수가 있으며 이는 식 (4a, 4b)와 같다.

$$D(m) = \frac{D_0}{1-m} \left(\frac{t_0}{t} \right), \quad (t < t_c) \quad (4a)$$

$$D(m) = \frac{D_0}{(1-m)} \left(\frac{t_{28}}{t_c} \right)^m \left[1 - m + m \frac{t_c}{t} \right], \quad (t \geq t_c) \quad (4b)$$

여기서, $D(m)$ 은 시간 t (sec)에서의 확산계수(m^2 /sec), D_0 는 t_0 에서의 확산계수, t_c 는 확산계수가 더 이상 감소하지 않는 시간을 나타내며, 일반적으로 t_c 는 30년으로 가정하고 있다

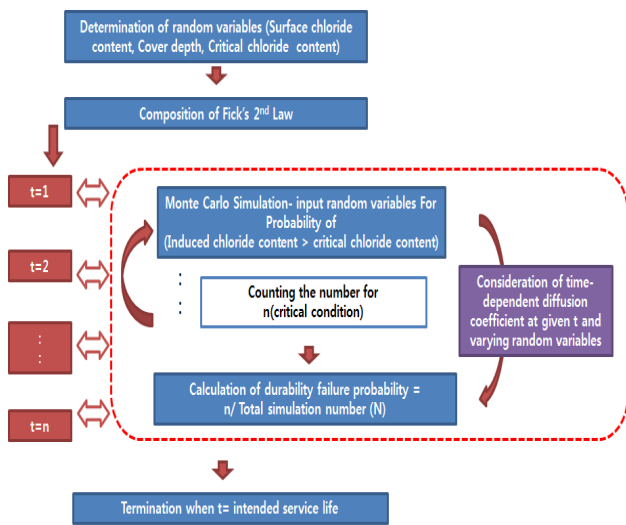


Fig. 2 Flowchart for calculation of durability failure probability

Table 1 Simulation conditions with variables

Time constant and time-dependent diffusion coefficient		
Diffusion coefficient at reference time (28days)	$2.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$	Normal distribution COV 0.266
	$5.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$	
	$7.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$	
Cover depth	75 mm	Normal distribution COV 0.128
	100 mm	
	125 mm	
Surface chloride content	5.0 kg/m^3	Normal distribution COV 0.338
	10.0 kg/m^3	
	15.0 kg/m^3	

(Thomas and Bamforth, 1999). 시간의존성 확산계수를 고려한 확률론적 방법의 해석방법은 Fig. 2와 같다.

3. 변수별 시뮬레이션에 따른 내구적 파괴확률의 변화

3.1 시뮬레이션 기본 조건

본 절에서는 시간의존성 확산성을 가진 내구성 설계방법 (결정론적 방법 및 확률론적 방법)과 외부조건(표면염화물량 및 피복두께)이 내구수명에 미치는 영향을 분석하기 위해, 대상 구조물을 Table 1과 같이 설정하였다. 해석을 위한 기본조건은 Table 1에서 bold로 표시된 상수를 기본으로 하였으며, 기존의 연구를 참고하여 각 인자의 확률특성 및 변동계수를 가정하였다(Song et al., 2009). 참고로 기본확산계수(D_{ref})는 $2.5 \sim 7.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ 로 가정하여 내구수명에 미치는 영향을 같이 분석하였다.

3.2 기본확산계수 영향에 따른 내구성파괴확률의 변화

시간의존성 확산성과 기본확산계수의 변화가 내구적 파괴확률에 미치는 영향을 고려하기 위하여 Table 1의 조건과 같이 기본확산계수를 $5.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ 에서 $10.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ 까지 2배로 증가시키면서 해석을 수행하였다. Fig. 3에서는 기본확산계수 변화에 따른 PDF(Probability of Durability Failure)를

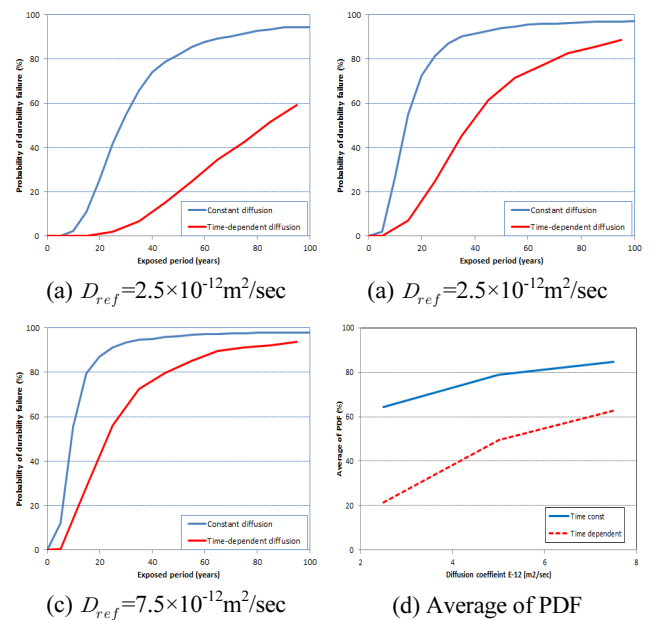


Fig. 3 Variation changes in PDF with diffusion coefficient at reference time

나타내었다. 확산계수의 증가에 따라 PDF의 변화가 빠르게 증가하고 있음을 알 수 있으며, PDF의 변화를 정량적으로 평가하기 위해, 100년간의 PDF를 평균하여 확산계수의 변화와 비교를 Fig. 3(d)에 나타내었다.

Fig. 3에서 알 수 있듯이 확산계수가 $7.5 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$ 로 증가할 경우, 시간의존성 확산계수를 사용한 경우 PDF는 21.5%에서 62.6%로 증가하였으며, 고정된 확산계수를 사용한 경우의 PDF는 64.2%에서 84.5%로 증가하였다. 고정 확산계수를 사용한 경우보다 시간의존성 확산계수를 사용한 경우, PDF의 증가가 더욱 뚜렷하다. 이는 고정된 확산계수는 감소하지 않으므로 염화물량이 계속해서 일정하게 유입되고 이로 인해 PDF가 커짐을 알 수 있다. 증가율은 시간의존성 확산을 이용한 경우에서도 크게 증가했는데 이는 PDF가 초기에는 낮고 기간이 증가함에 따라 비선형적으로 크게 증가하기 때문이다. 절대량을 비교하면 시간의존성 확산의 경우, 고정 확산의 경우에 비하여 74.1% 수준으로 평가되었다.

3.3 피복두께의 영향에 따른 내구성파괴확률의 변화

콘크리트 피복두께는 가장 일반적이며 1차적인 중요 방어 기제이다. 본 절에서는 75 mm에서 125 mm로 피복두께를 증가시키면서 PDF를 평가하였다. 시간의존성 확산계수를 고려한 경우 PDF의 증가는 매우 낮은 수준으로 평가되었으며 이는 내구수명의 증가로 연계된다. Fig. 4에서는 피복두께의 증가에 따른 PDF를 나타내었으며, Fig. 4(d)에서는 평균 PDF의 변화를 도시하였다.

Fig. 4에서 알 수 있듯이, 피복두께의 증가에 따라 PDF는 빠

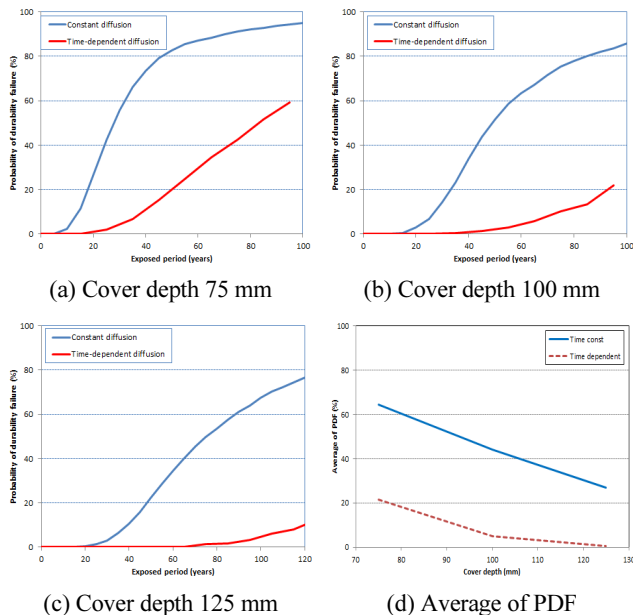


Fig. 4 Variation changes in PDF with cover depth

르게 감소하고 있으며, 시간의존성 확산계수를 사용했을 경우는 21.5%에서 0.57%로, 고정 확산계수를 사용했을 경우는 64.2%에서 26.8%로 감소하였다. 피복두께가 증가함에 따라 PDF의 변화가 크게 변동하므로 내구성 평가에 핵심적인 인자임을 알 수 있다.

3.4 표면염화물의 영향에 따른 내구성파괴확률의 변화

본 절에서는 표면염화물의 증가에 따른 PDF의 변화를 시간의존성 및 고정 확산계수를 이용하여 평가하였다. 일반적으로 표면염화물은 시간에 따라서 증가하고 10년 정도 후에 일정하다고 보고되고 있으나(JSCE, 2002), 본 연구에서는 결정론적 방법과 확률론적 방법을 비교하기 위해 공용 개시 초부터 표면염화물이 일정하다고 가정하였다.

Fig. 5에서는 표면염화물의 증가에 따른 PDF의 변화를 나타내었으며, Fig. 5(d)에서는 평균 PDF의 변화를 나타내었다.

Fig. 5에서 알 수 있듯이, 표면염화물량이 증가할수록 평균 PDF는 크게 증가하는데, 이는 경계조건이 큰 값을 가지므로 내부로의 유입이 증가하게 되는 것이다. 일반적으로 해수에 침지된 장기 시편의 경우 $18.0 \sim 23.0 \text{ kg/m}^3$ 의 표면염화물량을 가지고 있다. 5 kg/m^3 의 경우는 비말대 조건을, 10 kg/m^3 의 경우는 조석대 구간의 염화물량과 비슷한 수준이다(Broomfield, 1997). 표면염화물량이 5.0 kg/m^3 에서 15 kg/m^3 으로 증가함에 따라 평균 PDF는 고정 확산계수인 경우 64.2%에서 83.6%로, 시간의존성 확산계수인 경우는 21.5%에서 57.7%로 증가하였다. 증가율을 평가하면 두 가지 경우 모두 피복두께의 영향과 비슷하게 평가되었다.

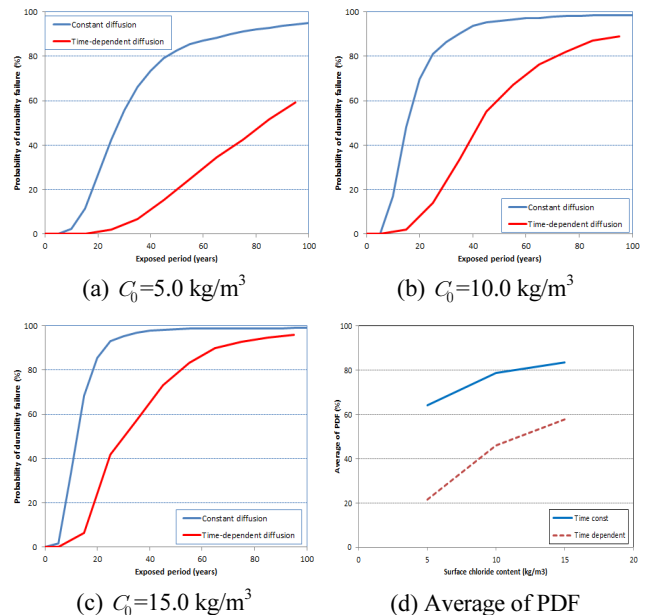


Fig. 5 Variation changes in PDF with surface chloride content

4. 시뮬레이션을 통한 내구수명에 대한 시간의존성 영향도 분석

4.1 내구수명 도출 개요

본 장에서는 결정론적인 방법을 통한 내구수명과 3.1절에서 설명한 내구적 파괴확률을 고려한 확률론 평가방법과의 비교를 수행하였다. 결정론적 방법으로는 범용 프로그램인 Life 365를 사용하였다. 해석조건은 Table 1에 나타난 평균값(기본 확산계수, 피복두께, 표면염화물량)을 각 해석 경우에 사용하였다. 결정론적 방법에서는 임계 염화물량을 시방서(JSCE, 2007; KCI, 2012)에서 제안하는 1.2 kg/m^3 을 사용하였으며, 확률론적 방법에서는 목표내구적 파괴확률을 10.0%로 설정하였다(KCI, 2012). 일반적으로 확률변수의 변동성 영향과 낮은 목표내구적 파괴확률로 인해, 확률론적 방법을 통해 도출된 내구수명은 결정론적인 방법보다 낮게 평가된다(Kwon et al., 2009).

4.2 영향인자 변화에 따른 내구수명 변화 분석

4.2.1 해석조건 및 평가 결과

각 해석조건에 따른 내구수명 방법과 그 결과를 Table 2에 나타내었다. 해석조건은 결정론적 방법에서의 시간의존성 유무, 그리고 확률론적 방법에서의 시간의존성 유무에 따라 총 4가지 경우의 내구수명 평가결과를 요약하였다.

Table 2 Analysis conditions and service life evaluation

Variables		Common analysis conditions			
		Service life			
		Deterministic		Probabilistic	
		Time constant	Time-dependent	Time constant	Time-dependent
Diffusion coefficient at reference time ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$)	2.5	26.8	76.0	13.2	38.5
	5.0	13.0	35.1	8.8	17.2
	7.5	8.6	21.3	4.7	9.8
Cover depth (mm)	75	26.8	76.0	13.2	38.5
	100	45.7	140.0	26.0	76.1
	125	71.6	222.4	38.1	120.0
Surface chloride content (kg/m^3)	5.0	26.8	76.0	13.2	38.5
	10.0	14.7	40.8	8.8	21.2
	15.0	12.7	31.1	7.2	17.5

4.2.1 기본확산계수 변화에 따른 내구수명

Table 2에 기입된 공통조건에 대해서 기본확산계수를 변화시키면서 4가지 조건에 대하여 내구수명을 도출하였다. Fig. 6에서는 기본확산계수의 변화에 따른 내구수명의 변화를 나타내고 있다.

Fig. 6에서 알 수 있듯이 시간의존성이 고려된 결정론적 방법에서 가장 큰 내구수명이 예측되었으며, 시간의존성이 고려되지 않은 확률론적 해석에서 가장 낮은 내구수명이 평가되었다. 시간의존성 해석은 일반적으로 결정론적 방법에만 적용되는데, 확률론적 해석에 적용함으로써 두 방법에서 도출되는 내구수명의 차이를 감소시킬 수 있다. 확산계수가 $2.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ 에서 $7.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ 로 증가함에 따라, 시간의존성을 고려하지 않은 결정론적 방법에서는 26.8년에서 8.6년으로, 시간의존성 결정론적 방법에서는 76.0년에서 21.3년으로 감소하였다. 또한 고정시간 확률론적인 방법에서는 13.2년에서 4.7년으로, 시간의존 확률론적 방법에서는 38.5년

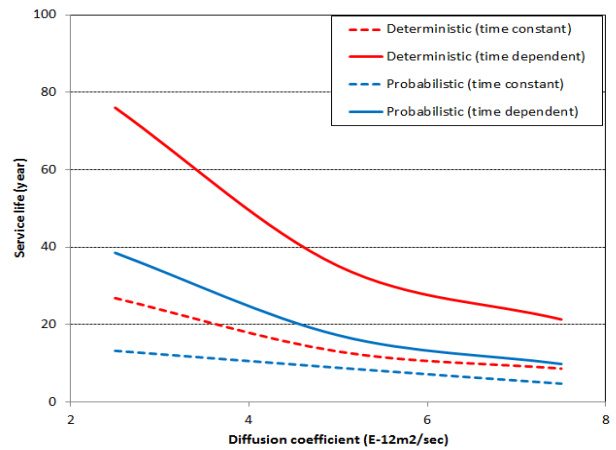


Fig. 6 Service life with varying diffusion coefficient at reference time

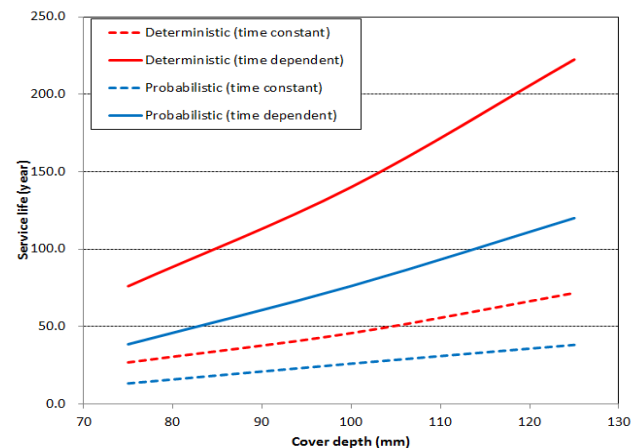


Fig. 7 Service life with varying cover depth

서 9.8년으로 감소하였다. 염화물 확산계수가 300% 증가할 때, 내구수명은 32.1%(고정 결정), 28.0%(의존 결정), 35.6%(고정 확률), 25.5%(의존 확률) 수준으로 감소하였다.

4.2.2 피복두께에 따른 내구수명

Fig. 7에서는 피복두께의 변화에 따른 내구수명의 변화를 나타내고 있다.

피복두께가 75 mm에서 125 mm로 증가하면서 내구수명은 크게 증가하였다. 내구수명은 확산고정 결정론방법에서는 26.8년에서 71.6년으로, 시간확산성 결정론 방법에서는 76.0년에서 222.4년으로 크게 증가하였다. 확률론적인 방법에서는 13.2년에서 38.1년으로(고정 확률), 38.5년에서 120.0년(의존 확률)으로 크게 증가하였다. 피복두께가 166.7% 증가할 때 내구수명은 267~311%로 크게 증가하였다. 각각 267.2%(고정결정), 292.6%(의존결정), 288.6%(고정확률), 311.7%(의존확률) 수준으로 크게 증가하였는데, 이는 피복두께가 매우 민감하게 내구수명과 관련 있음을 알 수 있다.

4.2.3 표면염화물량에 따른 내구수명

일반적인 비말대조건(5.0 kg/m³)의 수준에서 3배로 표면염화물량이 증가할수록 내부로 유입되는 염화물 이온이 증가하여, 내구수명이 감소한다. 표면 염화물량이 5.0 kg/m³에서 15.0 kg/m³으로 증가할 경우, 고정확산 결정론적 방법에서는 26.8년에서 12.7년으로, 시간확산 결정론적 방법에서는 76.0년에서 31.1년으로 크게 감소하였다. 확률론적인 방법에서는 고정확산인 경우 13.2년에서 7.2년으로 감소하였으며, 시간의존성 확산계수를 고려할 경우 38.5년에서 17.5년으로 크게 감소하였다.

표면염화물량이 300% 증가할 경우, 내구수명은 각각 47.4%(고정 결정), 40.9%(의존 결정), 54.5%(고정 확률), 45.5%(의

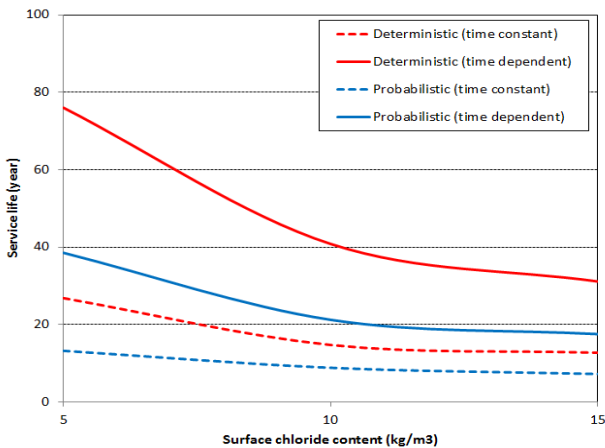
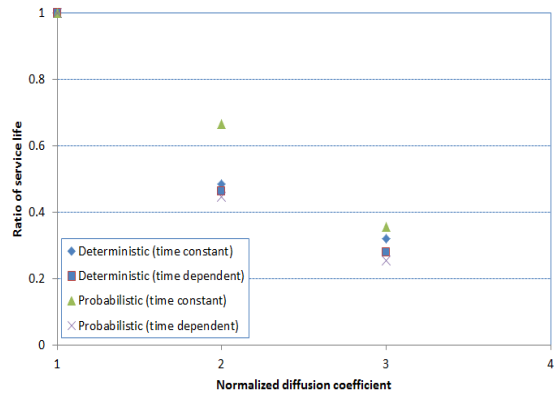


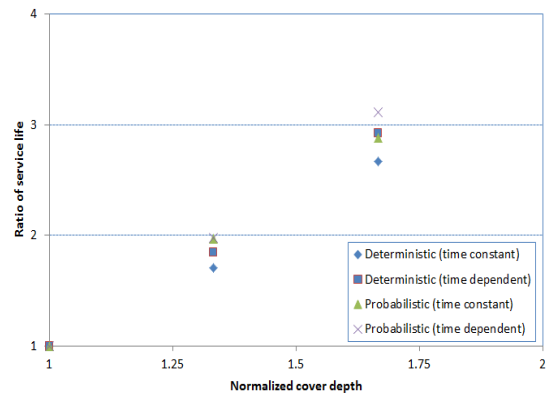
Fig. 8 Service life with varying surface chloride content

존 확률) 수준으로 감소하였다. Fig. 8에서는 표면염화물량에 따른 내구수명의 변화를 나타내고 있다.

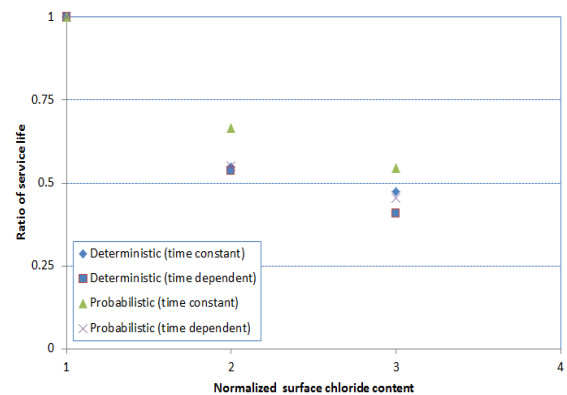
이상의 해석에서는 다양한 영향인자(기본 염화물 확산계수, 피복두께, 표면염화물량)등을 고려하여 결정론 및 확률론적 해석을 수행하여 내구수명을 평가하였다. 특히 각 방법에는 시간의존성 확산계수와 고정형 확산계수를 각각 분류하여 도출된 내구수명의 변화를 분석하였다.



(a) Normalized diffusion coefficient and ratio of service life



(b) Normalized cover depth and ratio of service life



(c) Normalized surface chloride content and ratio of service life

Fig. 9 Normalized parameters and changing service life

Table 3 Regression analysis results for the parameters

Regression type: $Y = A(X - 1) + 1$								
Case	Regression results of A							
	Deterministic				Probabilistic			
	Time constant		Time-dependent		Time constant		Time-dependent	
	A	R^2	A	R^2	A	R^2	A	R^2
Normalized diffusion coefficient	-0.375	0.902	-0.396	0.901	-0.324	0.999	-0.409	0.913
Normalized cover depth	2.429	0.990	2.816	0.993	2.845	0.997	3.126	0.997
Normalized surface chloride content	-0.300	0.824	-0.328	0.884	-0.248	0.918	-0.308	0.852

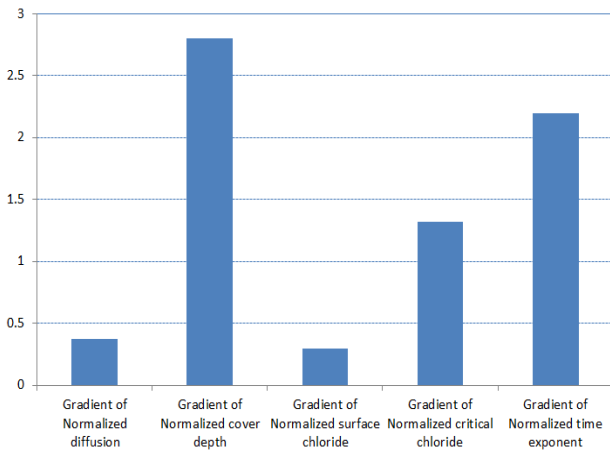


Fig. 10 Comparison of gradient of parameters

내구수명에 대한 영향인자의 민감도를 분석하기 위해 영향인자들의 증가비와 내구수명의 변화를 정규화하여 분석하였다. Fig. 9에서는 각 영향인자의 증가에 따른 내구수명의 변화 비율을 도시하였으며, 각각의 결과를 선형회귀분석하여 기울기를 평가하였다. 표면염화물량에 대한 회귀분석 결과는 2차 함수에 가까웠으나, 비교적 만족할만한 결정계수(R^2)을 가지고 있었으므로 선형회귀분석으로 영향도를 동일하게 파악하였다.

회귀분석결과는 Table 3에 나타내었으며 각 기울기(A)의 평균을 Fig. 10에 도시하였다.

모든 영향인자의 결정계수는 표면염화물을 제외하고는 0.9 이상의 높은 수준을 나타내고 있었다. 확산계수의 기울기 범위는 0.342~0.409 수준으로, 피복두께는 2.429~3.126수준으로, 표면염화물량은 0.248~0.328 수준을 나타내었다. Fig. 10에 도시된 기울기는 각 영향인자가 내구수명에 미치는 영향을 나타내는 지표가 될 수 있다. Fig. 10에서 알 수 있듯이 피복두께의 영향이 2.804로 가장 컸으며, 확산계수는 0.376, 표면염화물량은 0.296으로 비교적 낮게 평가되었다.

5. 결론

결정론 및 확률론적 방법에 따른 시간의존성 염화물 확산계수 및 외부 영향인자가 내구수명에 미치는 영향을 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 염화물 확산계수가 $2.5 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$ 에서 $7.5 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$ 로 증가함에 따라, 내구수명은 32.1%(고정 결정), 28.0%(의존 결정), 35.6%(고정 확률), 25.5%(의존 확률) 수준으로 감소하였다. 피복두께가 75 mm에서 125 mm로 증가함에 따라 내구수명은 267~311%로 크게 증가하였다. 각각 267.2%(고정 결정), 292.6%(의존 결정), 288.6%(고정 확률), 311.7%(의존 확률) 수준으로 크게 증가하였는데, 이는 피복두께가 핵심적인 내구수명 영향인자임을 알 수 있다. 또한 표면염화물량이 5.0 kg/m^3 에서 15.0 kg/m^3 으로 증가할 때, 내구수명은 각각 47.4%(고정 결정), 40.9%(의존 결정), 54.5%(고정 확률), 45.5%(의존 확률) 수준으로 감소하였다.
- 2) 영향인자의 증가비율과 내구수명의 변화비율을 고려하면 각 영향인자의 민감도를 비교할 수 있다. 확산계수의 변화 따른 내구수명의 기울기 범위는 0.342~0.409 수준으로, 피복두께는 2.429~3.126수준으로, 표면염화물량은 0.248~0.328 수준을 나타내었다. 기울기 변동성에서도 피복두께의 경우 확산계수 및 표면염화물에 비하여 8~10배 정도의 영향도를 나타내었다.

감사의 글

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

References

- Alonso, C., Castellote, M., and Andrade, C. (2002), Chloride Threshold Dependence of Pitting Potential of Reinforcements, *Electrochimica Acta*, 47(21), 3469-3481.
- Broomfield, J. P. (1997), Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair, E&FN, London, 1-15.
- CEB (1997), New Approach to Durability Design, 29-43.
- Chung, L., Jay Kim, J. H., and Yi, S. T. (2008), Bond Strength Prediction for Reinforced Concrete Members with Highly Corroded Reinforcing Bars, *Cement and Concrete Composites*, 30(7), 603-611.
- DuraCrete Final Report (2000), DuraCrete Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures.
- EN 1991 (2000), Eurocode 1 - Basis of Design and Actions on Structures.
- Ferreira, M., Arskog, V., Jalali, S., and Gjorv, O. E. (2004), Probability-Based Durability Analysis of Concrete Harbor Structures, *Proceedings of CONSEC04*, 999-1006.
- Hakan, Y., Ozgur, E., and Serhan, S. (2012), An Experimental Study on the Bond Strength between Reinforcement Bars and Concrete as a Function of Concrete Cover, Strength and Corrosion Level, *Cement and Concrete Research*, 42(5), 643-655.
- Hussain, S. E., Rasheeduzafar, S., Al-Musallam, A., and Al-Gahtani, A. S. (1995), Factors Affecting Threshold Chloride for Reinforcement Corrosion in Concrete, *Cement and Concrete Research*, 25(7), 1543-1555.
- JSCE (2002), Standard Specification for Concrete Structures, Japan Society of Civil Engineers.
- JSCE (2007), Standard Specifications and Guidelines, Japan Society of Civil Engineers.
- KCI (2012), Concrete Standard Specification Durability Part, Korea Concrete Institute.
- Kwon, S. J., Na, U. J., Park, S. S., and 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.
- Lee, S. H., and Kwon, S. J. (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.
- Maekawa, K., Ishida, T., and Kishi, T. (2003), Multi-Scale Modeling of Concrete Performance, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(2), 91-126.
- Poulsen, E. (1993), On a Model of Chloride Ingress into Concrete, Nordic Miniseminar-Chloride Transport, Department of Building Materials, Gothenburg.
- RILEM (1994), Durability Design of Concrete Structures, Report of RILEM Technical Committee 130-CSL, E&FN, London, 28-52.
- Song, H. W., Pack, S. W., and 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.
- Song, H. W., Pack, S. W., Lee, C. H., and Kwon, S. J. (2006), Service Life Prediction of Concrete Structures under Marine Environment Considering Coupled Deterioration, *Journal of Restoration Building and Monuments*, 12(4), 265-284.
- Tang, L., and Joost, G. (2007), On the Mathematics of Time-Dependent Apparent Chloride Diffusion Coefficient in Concrete, *Cement and Concrete Research*, 37(4), 589-595.
- Thomas, M. D. A., and Bamforth, P. B. (1999), Modeling Chloride Diffusion in Concrete: Effect of Fly ash and Slag, *Cement and Concrete Research*, 29(4), 487-495.
- Thomas, M. D. A., and Bentz, E. C. (2002), Life-365TM Service Life Prediction ModelTM and Computer program for Predicting the Service Life and Life-cycle Costs of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides, SFA, 2-28.

Received : 08/22/2016

Revised : 09/07/2016

Accepted : 09/27/2016

요 지 : 염해에 콘크리트 구조물의 내구수명 평가는 매우 중요한데, 결정론적 방법 및 확률론적 방법에서 평가된 결과는 큰 차이를 보이고 있다. 본 연구에서는 시간의존형 확산계수와 고정 확산계수를 고려하여 내구수명을 모사하였다. 기본확산계수, 콘크리트 피복두께, 표면염화물량을 3조건으로 분류하여 각 평가방법에 따라 변화하는 내구적 파괴확률과 내구수명을 평가하였다. 시간의존형 확산계수의 도입을 통하여 두 방법 간의 차이를 감소시킬 수 있었으며, 합리적인 해석결과를 유도할 수 있었다. 염화물 확산계수가 $2.5 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$ 에서 $7.5 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$ 으로 증가할 때 내구수명은 25.5~35.6%수준으로 감소하였으며, 피복두께가 75 mm에서 125 mm로 증가할 경우, 267~311%로 내구수명은 증가하였다. 또한 표면염화물량이 5.0 kg/m^3 에서 15.0 kg/m^3 으로 변화할 때, 내구수명은 40.9~54.5% 수준으로 감소하였다. 피복두께의 변화에 따른 내구수명의 변화는 기본확산계수 및 표면염화물에 비하여 8~10배정도 크게 평가되었으며 내구수명 확보를 위한 중요한 인자임을 알 수 있다.

핵심용어 : 염해, 내구수명, 확산계수, 표면염화물, 피복두께
