J Rec Const Resources 4(3)259-268(2016)
http://dx.doi.org/10.14190/JRCR.2016.4.3.259

Print ISSN : 2288-3320
Online ISSN : 2288-369X

시간의존성 염화물 확산계수를 고려한 확산 영향인자가 결정론적 및 확률론적 내구수명에 미치는 영향분석

Analysis for Effect of Diffusion Parameter with Time-dependent Diffusion Coefficient on Service Life Considering Deterministic and Probabilistic Method

권성준[1]*
Seung-Jun Kwon[1]*

(Received August 22, 2016 / Revised September 6, 2016 / Accepted September 13, 2016)

The service life evaluation in RC(Reinforced Concrete) structure exposed to chloride attack can be classified into deterministic and probabilistic method, and it significantly varies with design parameters. The present work derives PDF (Probability of Durability Failure) and the related service life considering time-dependent diffusion coefficient and internal parameters such as reference diffusion coefficient, critical chloride content, and time-exponent. When critical chloride content increases to 133.3%, the changing ratios of service life are 134.0~145.4% for deterministic method and 149.2%~152.5% for probabilistic method, respectively. In the case of increasing time-exponent to 200%, they increase to 323.8% for deterministic method and 346.0% for probabilistic method. Through adopting time-diffusion coefficient for probabilistic method, reasonable service life evaluation can be achieved, and it is also verified that increasing time-exponent through mineral admixture is very effective to extension of service life in RC structure.

키워드 : 염해, 내구수명, 확률론적 방법, 확산계수, 임계염화물량, 혼화재료, 시간지수

Keywords : Chloride attack, Service life, Probabilistic method, Diffusion coefficient, Critical chloride content, Mineral admixture, Time-exponent

1. 서 론

해안가에 노출된 RC(Reinforced Concrete) 구조물은 안전하게 시공되었다 하더라도, 공용시간에 따라 증가하는 표면염화물량과 내부로 유입된 염화물로 인해, 부식이 발생하게 된다. 철근에 발생한 부식은 초기에는 녹물의 발현, 균열 발생 등으로 진전되지만, 이후 콘크리트의 박락(spalling)과 철근 단면적 감소로 인한 내력 저하가 발생하게 된다(Broomfield 1997). 기존의 연구에서는 내부에서 발생된 부식은 팽창효과에 따라 부착강도가 일부 개선되지만, 부식량이 커짐에 따라서 콘크리트와의 일체성이 저하된다. 이는 RC의 기본가정인 일체성 감소로 인한 인장보강성능을 기대할 수 없게 되며, 구조적 성능이 크게 감소된다(Chung et al. 2008; Yalciner et al. 2012).

일반적으로 염해에 대한 RC 구조물의 내구수명 예측기법은 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 첫 번째는 결정론적 방법으로 염화물 이동을 정량적으로 구현하는 것이다. Meso-Level 관점에서는 주로 Fick's 2nd Law를 기본으로 하는데, 표면염화물량과 내부의 염화물 profile을 이용하여 회귀분석을 수행한 뒤, 최적의 상관성을 가지는 표면염화물량과 겉보기 확산계수를 구하는 방법이다. 이는 염화물 이동을 직접적으로 평가하는 방법이며, 임계염화물량, 콘크리트 피복두께, 염화물 확산계수를 주요 변수로 하고 있다. 이러한 방법은 외부 염화물량이 일정한 정상상태를 가정하고 있으며(Thomas and Bentz 2002; CEB 1997; RILEM 1994), 주로 장기 침지자료 및 실태조사를 통하여 도출된다.

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

[1]한남대학교 건설시스템공학과 (Department of Civil Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea)

Copyright ⓒ 2016 by Korean Recycled Construction Resources Institute

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

이외에도 열역학적 연성거동을 고려한 초기재령 거동 모델링이 염화물 이동에 고려되고 있다. 이러한 방법은 Nernst-Einstein Equation을 지배방정식으로 하여 자유염화물과 고정염화물의 상평형(isotherm), 수분 압력에 의한 염화물 이동(convection), 시멘트 수화물에 의하여 흡착되는 고정염화물의 반응성 등을 고려하여 염화물 이동 모델링에 사용한다(Maekawa et al. 2003; Song et al. 2006).

1990년대 이후부터 콘크리트의 공학적 불확실성을 고려하기 위해 확률론적(probabilistic) 또는 통계론적(stochastic) 방법이 대두되고 있다. 확률론적 또는 통계론적 방법은 결정론적 방법과 같은 염화물 이동 지배 방정식 이외에도 목표 내구적 파괴확률과 부식이 발생할 확률을 추가적으로 비교하여 엄격한 내구성 설계를 유도하고 있다(Kwon et al. 2009; Song et al. 2006). 이러한 확률론적 방법은 시간적, 공간적 특성을 고려하여 Spatial Variability를 고려한 다중스펙트럼 해석으로 발전하기도 하였다(Sudret 2008; Val and Trapper 2008; Stewart and Mullard 2007).

콘크리트의 확산계수는 시간이 경과함에 따라 감소하게 되는데, 이를 시간의존성 확산성이라고 한다. 이는 고로슬래그미분말(GGBFS: Ground Granulated Blast Furnace Slag)이나 플라이애쉬(FA: Fly Ash)를 사용한 경우, 공극률이 감소되고 흡착되는 자유염화물량이 증가함에 따라 확산성이 저해되는 것이다(Lee and Kwon 2012; Thomas and Bentz 2002; Tang and Joost 2007; Thomas and Bamforth 1999). 시간의존성 확산계수는 일반적으로 결정론적 방법에서는 차용되어 왔으나, 확률론적인 해석에 대해서는 매우 제한적으로 적용되었다. 이유는 각 시간영역에서 MCS (Monte Carlo Simulation)을 적용하고 시간이 변화함에 따라 변화하는 염화물 확산계수를 사용해야 되기 때문이다.

본 연구에서는 배합관련 인자인 기본확산계수, 확산계수의 시간의존성, 그리고 부식을 야기하는 임계염화물량의 변화에 따라 변동하는 내구적 불안전확률(PDF: Probability of Durability Failure)을 평가하고 결정론적 방법과 확률론적 방법을 각각 이용하여 내구수명을 도출하도록 한다. 또한 각 설계인자들이 내구수명에 미치는 영향을 내구수명 변화비율을 고려하여 분석하였다.

2. 시간의존성 확산계수의 모델링

2.1 확산계수의 시간의존성 모델링

확률론적 해석방법에서 시간의존성 확산계수를 고려하는 것은 어려운 일이다. 식 (1)에서는 일반적인 염화물 이동 지배방정식을 나타내었다.

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

여기서 C_s는 표면염화물량, x 및 t는 콘크리트 깊이 및 시간, erf는 오차함수를 나타낸다. $D(t)$는 시간에 따라 변화하는 시간 의존적 확산계수이며, 재령 28일 확산계수(D_{28})과 기준 시간(t_{28})을 포함하고 있다. m은 시간지수인데, 혼화재의 사용에 따라 0.2~0.6 사이의 값을 가정하여 시간에 따른 염화물 감소를 수치적으로 구현하고 있다(Thomas and Bentz 2002).

기존의 연구에서는(Poulsen 1993) 정상상태 조건에서는 매개변수 $I(t)$를 이용하여 식 (2)과 같이 일정기간에서의 균등한 확산계수를 모델링 하였다.

$$D(t) = \int_0^t D(\tau)d(\tau) \quad (2)$$

식 (2)을 고려하면 식 (1)에서의 $D(t)$는 m을 상수로 가지는 $D(m)$으로 나타낼 수가 있으며 이는 식 (3a) 및 식 (3b)와 같다.

$$D(m) = \frac{D_0}{1-m}\left(\frac{t_0}{t}\right),\ (t < t_c) \quad (3a)$$

$$D(m) = \frac{D_0}{(1-m)}\left(\frac{t_{28}}{t_c}\right)^m\left[1-m+m\frac{t_c}{t}\right],\ (t \geq t_c) \quad (3b)$$

여기서, $D(m)$은 시간 t(sec)에서의 확산계수(m^2/sec), D_0는 t_0에서의 확산계수, t_c는 확산계수가 일정해지는 시점을 나타내며, 일반적으로 30년으로 가정하고 있다(Thomas and Bentz 2002).

시간의존성 확산계수를 고려한 확률론적 방법의 해석방법은 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다.

2.2 결정론적 방법 및 확률론적 방법

전술한대로 결정론적인 방법은 식 (1)과 같은 Fick's 2nd Law를 주로 사용한다. 이러한 방법은 주로 장기 실태조사 및 침지실험을 기본으로 하므로 긴 시간을 필요로 하는데(CEB 1997; RILEM 1994), 최근 들어 촉진실험과의 상관성을 통하여 단기간에 내구수명 및 염해저항성을 평가하려는 연구가 진행 중이다. 일반적으로 결정론

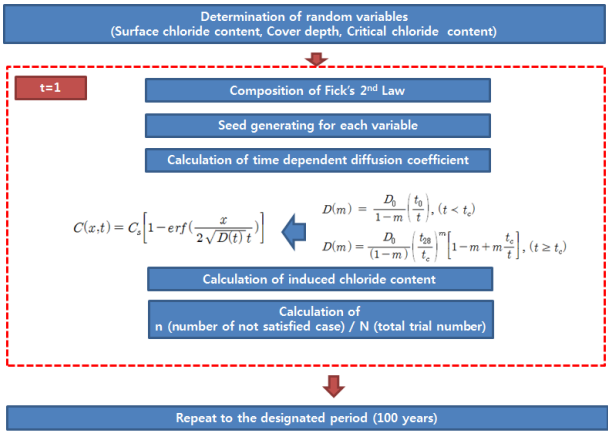


Fig. 1. Algorithm of PDF calculation with time-dependent diffusion

Table 1. Comparison of representative durability design methods (RILEM 1994)

Design method	Governing equation	Content
Deterministic	$R(t_g)-S(t_g)>0$	- Comparison with time-dependent external force($S(t_g)$) and resistant force($R(t_g)$)
Probabilistic	$P(P_f)_{tg}=P(R_{tg}-S_{tg}<0)<P_{fmax}$	- Setup of random variables - Inducing $P(P_f)_{tg}$ to be lower than P_{fmax}
Lifetime safety factor method	$t_d=\gamma_t\cdot t_g$	- Similar as structural design - Effective to many random variables

$P(P_f)_{tg}$: PDF in the intended service life (t_g)
P_{fmax}: Allowable maximum PDF
t_d: Design service life
γ_t: safety factor for service life

적인 방법에서는 내부에 매립된 철근위치에서의 유입된 염화물량이 임계염화물량(1.2kg/m^3)을 초과하지 않도록 규제하고 있다(JSCE 2007, 2002; KCI 2012). 주로 MCS(Monte Carlo Simulation)을 이용하여 확률변수들에 대한 변동성을 고려하여 부식이 발생할 확률을 목표 내구성 확률보다 낮도록 유도하는 것이 확률론적 설계의 주된 개념이다(Ferreira et al. 2004; DuraCrete Final Report 2000).

식 (4)에서는 확률론적 설계의 지배방정식을 나타내고 있다.

$$P\left\{C_{cr}(\mu,\sigma)<C_s(\mu,\sigma)\left[1-erf\left(\frac{x(\mu,\sigma)}{D(\mu,\sigma)t}\right)\right]\right\}<P_{\max} \quad (4)$$

여기서, $C_{cr}(\mu,\sigma)$는 임계부식량의 확률변수이며, $P_{\max}$는 목표 내구수명동안 유지되어야 하는 예상되는 목표 내구성 파괴확률의 최대치이다. 각국에서는 7.0~10.0% 수준의 목표 내구성 파괴확률을 제시하고 있는데(EN 1991 2000; JSCE 2007), 국내에서는 탄산화와 염해에 대하여 10.0%의 목표 내구적 파괴확률을 정하고 있다(KCI 2012). Table 1에서는 각 내구성 설계방법을 비교하였다.

3. 기본확산계수, 시간지수, 임계염화물량의 변화에 따른 내구적 파괴확률의 변화

3.1 해석의 기본가정

본 절에서는 시간의존성 확산성을 가진 내구성 설계방법(결정론적 방법 및 확률론적 방법)과 배합조건(기본확산계수, 임계염화물량, 시간지수)이 내구수명에 미치는 영향을 분석하기 위해, 해석조건을 Table 2와 같이 설정하였다. 기본조건은 Table 2에서 굵게 표시된 상수를 기본으로 하였으며, 기존의 연구를 참고하여 각 인자의 확률특성 및 변동계수를 가정하였다(Song et al. 2009). 피복두께는 75mm 표면염화물량은 5.0kg/m^{3}으로 고정하였으며, 기본확산계수, 임계염화물량, 시간지수는 3개로 분류하여 해석을 수행하였다.

Table 2. Simulation conditions with variables

Time constant and time-dependent diffusion coefficient		
Diffusion coefficient at reference time (28days)	**2.5×10^{-12}m^2/sec** 5.0×10^{-12}m^2/sec 7.5×10^{-12}m^2/sec	Normal distribution COV 0.266
Cover depth	75mm	Normal distribution COV 0.128
Surface chloride content	5.0kg/m^3	Normal distribution COV 0.338
Critical chloride content	**1.2kg/m^3** 1.4kg/m^3 1.6kg/m^3	Log Normal distribution COV 0.200
Time exponent	**0.2** 0.3 0.4	-

기본 확산계수의 범위는 2.5~7.5×10^{-12}m^2/sec의 범위는 일반적으로 품질이 좋은 콘크리트 수준에서 확인될 수 있는 28일 재령의 콘크리트 확산계수 수준이다. 시간의존성 지수에 대해서는 일반 OPC 콘크리트인 경우 0.2를 사용하도록 되어있으나 혼화재료(FA, GGBFS)를 사용할 경우 최대 0.6까지 증가시키도록 되어 있다. 또한 표면염화물량 5.0kg/m^{3}의 경우 비말대에서 흔하게 평가되는 표면염화물량 수준이며 해수중인 경우는 최대 18.0~23.0kg/m^3

수준으로 증가하게 된다.

본 해석 조건에서는 보통수준의 비말대 콘크리트에 노출된 구조물을 대상으로 PDF의 변화 및 내구수명에 대한 해석을 수행하였으며, 해석변수의 변화를 통하여 PDF 및 내구수명의 변화를 분석하도록 한다.

3.2 기본확산계수 변화에 따른 PDF

기본확산계수의 변화가 내구적 파괴확률에 미치는 영향을 고려하기 위하여 Table 2의 조건과 같이 피복두께 75mm, 표면 염화물량 5.0kg/m^3, 임계염화물량 1.2kg/m^3, 시간지수(m) 0.2를 가정하여 기본확산계수 변화에 따른 PDF를 분석하였다. Fig. 2에서는 기본 확산계수 변화에 따른 PDF를 나타내었는데, 확산계수의 증가에 따라 PDF의 변화가 빠르게 증가하고 있음을 알 수 있다. PDF의 변화를 정량적으로 평가하기 위해, 100년간의 PDF를 평균하여 확산계수의 변화와 비교를 Fig. 3에 나타내었다.

기본 확산계수가 2.5×10^{-12}m^2/sec에서 7.5×10^{-12}m^2/sec로 증가할 경우, 시간의존성을 고려한 PDF는 21.5%에서 62.6%로 증가하였으며, 고정된 확산계수를 사용한 경우는 64.2%에서 84.5%로 증가하였다. 시간의존성 확산성을 고려한 경우 시간에 따라 감소

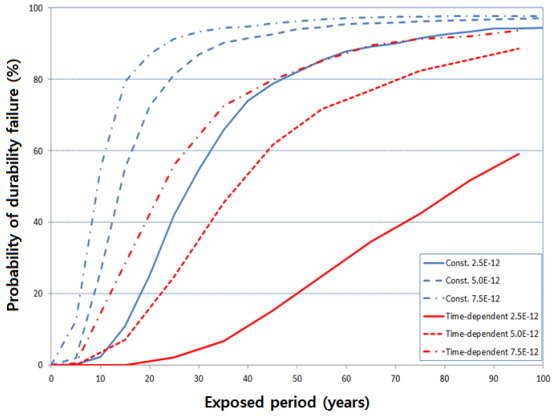


Fig. 2. Changes in PDF with reference diffusion coefficient

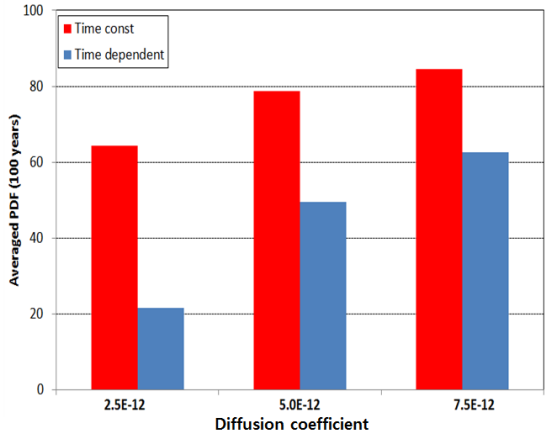
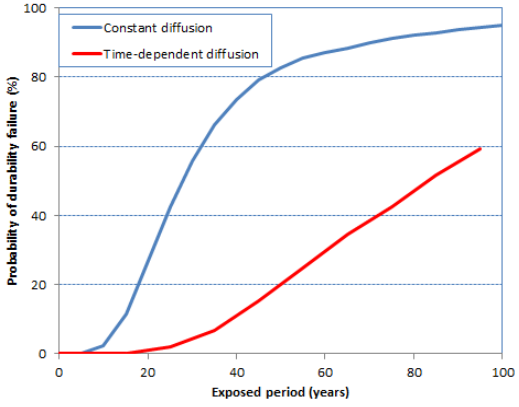
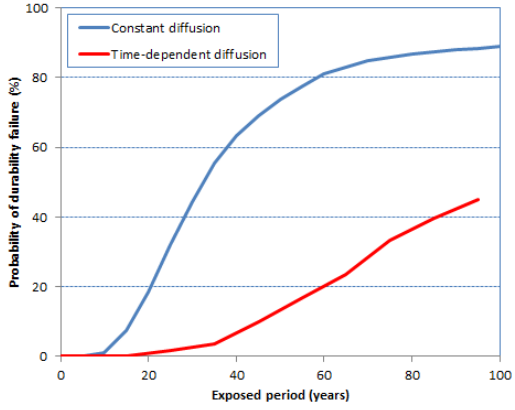


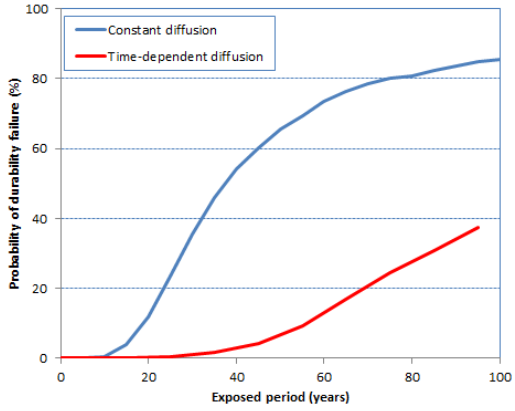
Fig. 3. Averaged PDF with reference diffusion coefficient (100 years)



(a) C_{cr}=1.2kg/m^3



(b) C_{cr}=1.4kg/m^3



(c) C_{cr}=1.6kg/m^3

Fig. 4. Changes in PDF with critical chloride content

하는 확산계수로 인해 PDF가 모든 경우에서 크게 감소하였다. 일정하게 증가하는 고정 확산성 PDF 보다 시간의존성에서 PDF 증가율이 커짐을 알 수 있는데, 이는 초기에는 PDF가 매우 낮지만 시간이 증가함에 따라 비선형적으로 크게 증가하기 때문이다.

3.3 임계염화물 변화에 따른 PDF

임계염화물은 부식을 매립된 철근의 부식을 야기하는 경계농도인데, 연구자들에 따라 큰 차이를 보이고 있다. 현재 각국의 시방서에서 채택하는 수준인 1.2kg/m^{3}은 매우 보수적인 수준으로 보통이 농도보다 큰 경우 부식이 발생한다고 보고되고 있다(Alonso et al. 2002; Hussain et al. 1995). Fig. 4에서는 임계염화물량이 1.2kg/m^{3}에서 1.6kg/m^{3}으로 증가하면서 변화는 PDF를 도시하였으며, Fig. 5에서는 100년간의 평균 PDF를 나타내었다.

Fig. 4에서 알 수 있듯이, 임계염화물량을 증가시킬수록 PDF는 감소하게 되는데, 이는 부식을 야기하는 임계 염화물량을 증가시킬수록 도달하는 기간이 증가하기 때문이다. Fig. 5와 같이 임계염화물량이 1.2kg/m^{3}에서 1.6kg/m^{3}으로 증가함에 따라 시간 고정형 확산계수를 이용한 평균 PDF는 64.2%에서 52.2% 감소하였으며, 시간의존형 확산계수의 경우는 21.5%에서 11.3%로 크게 감소하였다.

3.4 시간지수(m) 변화에 따른 PDF

FA나 GGBFS를 사용한 경우, 염화물의 확산성 저감 뿐 아니라, 자유염화물의 흡착이 커지므로 염해에 뛰어난 저항성을 보이게 된다. 일반적으로 OPC(Ordinary Portlnad Cement)를 사용할 경우 m은 0.2를 가정하지만(Thomas and Bentz 2002), FA나 GGBFS를 혼입할 경우 최대 0.6까지 시간지수를 증가시킬 수 있다. 본 절에서는 시간지수 m을 0.0에서 0.4로 증가시키면서 PDF 변화를 분석하였다.

Fig. 6에서는 m이 0.2에서 0.4로 증가하면서 기본확산계수(2.5×10^{-12}m^2/sec)가 감소하는 비율을 나타내었는데, m이 증가할수록 확산계수는 크게 감소하게 된다. m값이 0.2, 0.3, 0.4로 증가할수록 100년 경과후의 염화물 확산계수는 32.7%, 18.9%, 11.1% 수준으로 크게 감소하였다.

Fig. 7에서는 m이 0.0에서 0.4로 증가하면서 변화하는 PDF를

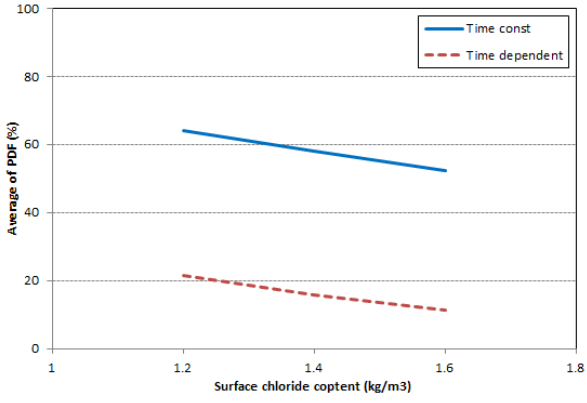


Fig. 5. Critical chloride content and average of PDF

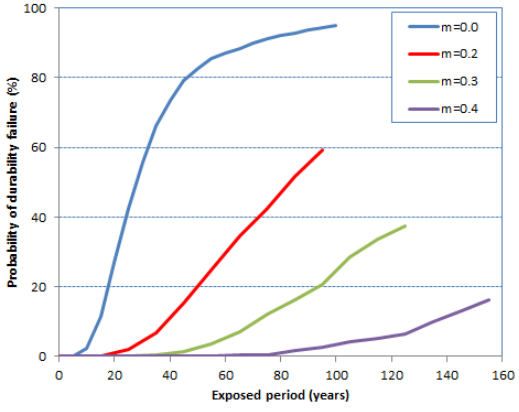


Fig. 7. Variation changes in PDF with time exponent

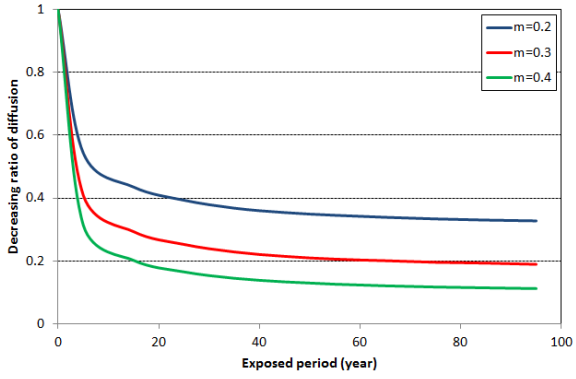


Fig. 6. Decreasing diffusion coefficient with time and m

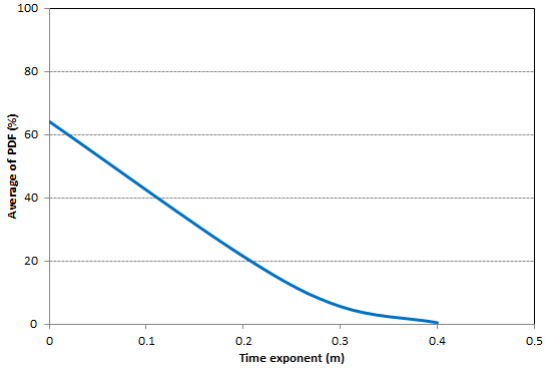


Fig. 8. Time exponent and average of PDF

도시하였으며, Fig. 8에서는 평균 PDF를 나타내었다.

시간의존성 확산계수가 증가할수록 평균 PDF는 빠르게 감소하였으며 이는 혼화재 사용을 통한 확산계수의 감소가 매우 효과적인 방어기재임을 알 수 있다. m이 0.0에서 0.4로 증가할 때, 평균 PDF는 64.2%에서 0.5%로 크게 감소하였다. 이는 일정한 피복두께를 가진 구조체에 대하여, 혼화재료를 사용한 콘크리트가 효과적으로 내구적 파괴확률을 감소시킴을 알 수 있다.

4. 기본확산계수, 임계염화물량, 시간지수변화에 따른 내구수명

4.1 PDF에 따른 내구수명 도출 개요

본 절에서는 고정 확산계수 및 시간의존 확산계수를 이용하여 전술한 2가지 방법에 따라 내구수명을 도출하였다. 결정론적 방법으로는 범용 프로그램인 Life 365를 사용하였으며, 해석조건은 Table 2에 나타난 평균값을 해석에 사용하였다. 결정론적 방법에서는 임계 염화물량을 시방서(JSCE 2002; KCI 2012)에서 제안하는 1.2kg/m^{3}을 사용하였으며, 확률론적 방법에서는 목표내구적 파괴확률을 10.0%로 설정하였다(KCI 2012). 구조안전성 설계는 선형 2차모멘트법(FOSM: First-Order Second Method)를 통하여 1.75~3.2정도의 신뢰도지수를 가지도록 설계하고 있다(Nawy 1990). 그러나 내구성 설계는 확률변수의 변동성과 낮은 목표 내구적 파괴확률로 인해, 결정론적인 방법보다 엄격하게 내구수명을 도출하게 된다(Kwon et al. 2009). Table 3에서는 해석조건과 도출된 내구수명을 2가지 방법에 대하여 정리하였다.

Table 3. Analysis conditions and service life evaluation

Common analysis conditions
·Diffusion coefficient at reference time: 2.5×10^{-12}m^2/sec
·Cover depth: 75mm ·Surface chloride content: 5.0kg/m^3
·Critical chloride content: 1.2kg/m^3 ·Time exponent: 0.2

Variables		Service life			
		Deterministic		Probabilistic	
		Time constant	Time-dependent	Time constant	Time-dependent
Diffusion coefficient at reference time (10^{-12}m^2/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
Critical chloride content (kg/m^3)	1.2	26.8	76.0	13.2	38.5
	1.4	30.4	91.2	16.2	47.2
	1.6	35.9	110.5	19.7	58.7
Time exponent	0.2	26.8 (m=0.0)	76.0	13.2 (m=0.0)	38.5
	0.3		136.6		69.0
	0.4		246.1		133.2

4.2 기본확산계수와 내구수명

다른 변수를 고정하고 기본확산계수를 2.5×10^{-12}m^2/sec에서 7.5×10^{-12}m^2/sec로 증가시키면서 두 가지 방법에 대한 내구수명을 Fig. 9에 나타내었다. 시간의존성이 고려된 결정론적 방법에서 가장 큰 내구수명이 도출되었으며, 시간의존성이 고려되지 않은 확률론적 해석에서 가장 낮은 내구수명이 평가되었다. 확산계수가 2.5×10^{-12}m^2/sec에서 7.5×10^{-12}m^2/sec로 300% 증가할 때, 내구수명은 32.1%(고정 결정), 28.0%(의존 결정), 35.6%(고정 확률), 25.5%(의존 확률) 수준으로 감소하였다. 시간의존성을 고려하지 않은 결정론적 방법에서는 26.8년에서 8.6년으로, 시간의존성 결정론적 방법에서는 76.0년에서 21.3년으로 내구수명이 각각 감소하였다. 또한 고정 확산계수를 사용한 확률론적인 방법에서는 13.2년에서 4.7년으로, 시간의존 확률론적 방법에서는 38.5년에서 9.8년으로 내구수명이 감소하였다.

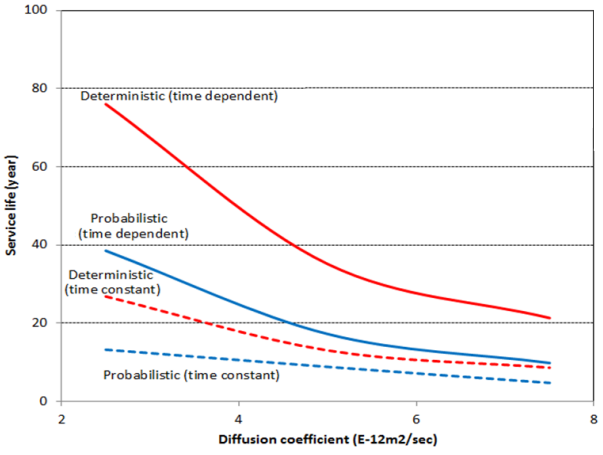


Fig. 9. Service life with reference diffusion coefficient

4.3 임계염화물과 내구수명

임계 염화물량은 환경조건, 배합조건에 따라 크게 변동하게 되는데, 1.6kg/m^3 수준은 매우 높은 임계 염화물 조건이다. 임계 염화물량을 1.2kg/m^{3}에서 1.6kg/m^{3}으로 증가시킬 경우, 추가로 유입될 수 있는 염화물량(0.4kg/m^3)만큼 내구수명이 증가하게 된다. 내구수명은 고정 확산 결정론 방법에서는 26.8년에서 35.9년으로, 시간의존 결정론 방법에서는 76.0년에서 110.5년으로 증가하였다.

또한 고정 확산 확률론적인 방법에서는 13.2년에서 19.7년으로, 시간의존 확률론 방법에서는 38.5년에서 58.7년으로 내구수명이 증가하였다.

임계 염화물량이 133.3% 증가할 때, 내구수명은 고정 확산 결정론 방법에서는 134.0%, 시간의존 확산계수를 사용한 결정론 방법에서는 145.4%의 증가비를 나타내었다. 고정 확산계수를 사용한 확률론 방법에서는 149.2%, 시간의존 확산계수를 사용한 확률론 방법에서는 152.5% 수준으로 각각 증가하였다. Fig. 10에서는 임계 염화물량의 변화에 따른 내구수명의 변화를 나타내고 있다.

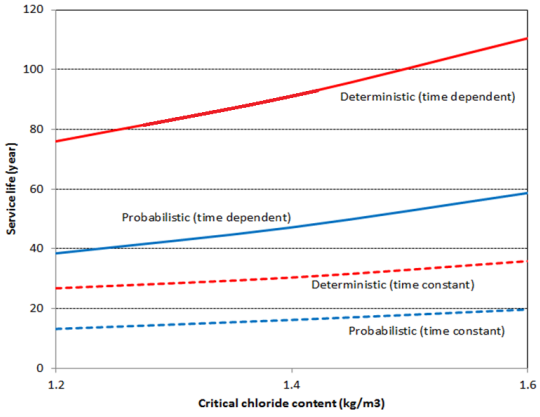


Fig. 10. Service life with critical chloride content

4.4 시간지수와 내구수명

식 (1)에 제시하고 있는 시간지수 m은 내구수명 평가에 매우 중요한 인자이다. 시간의존성을 고려하지 않을 경우, 지나치게 엄격한 내구수명 평가가 되므로 과다설계로 인한 재료 및 시공비의 지출이 발생하게 된다. 현재 내구수명 설계에도 구조 안전성 설계와 같은 환경지수 및 하중 감소계수 등이 추가로 고려되어 과다한 내구성 설계가 이루어지고 있는 현실이다. Fig. 11에서는 시간의존성 지수의 변화에 따른 내구수명의 변화를 나타내고 있다. 고정 확산계수를 가정할 경우, 결정론적인 방법과 확률론적인 방법은 각각 26.8년과 13.2년으로 일정하게 된다. 시간의존성 지수가 0.2에서 0.4로 증가할 경우 내구수명은 시간의존 확산계수를 고려한 결정론 방법에서는 76년에서 246.1년으로 크게 증가하였으며, 확률론적인 방법에서는 38.5년에서 133.2년으로 증가하였다. 시간지수가 200% 증가할 경우, 내구수명의 증가비율은 결정론적 방법에서 323.8%, 확률론적 방법에서 346.0%로 각각 평가되었다.

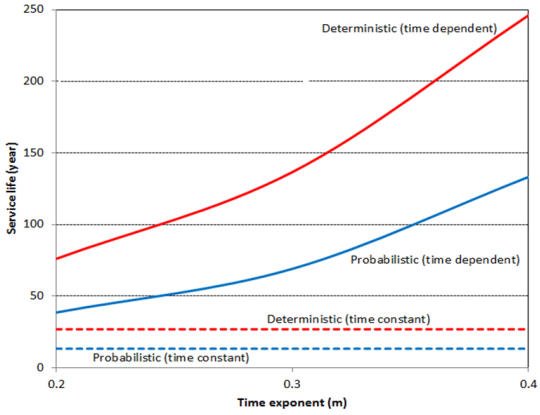


Fig. 11. Service life with time exponent

4.5 영향인자의 내구수명에 대한 민감도 분석

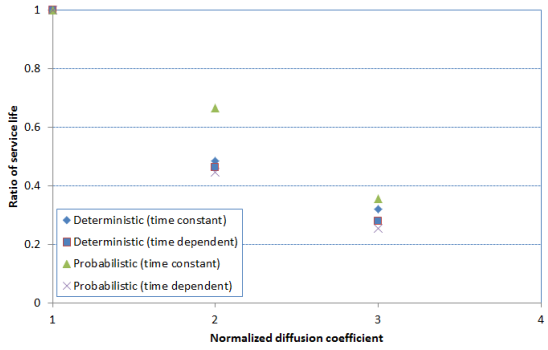
이상의 해석에서는 다양한 영향인자(기본 염화물 확산계수, 임계염화물량, 시간지수)를 고려하여 결정론 및 확률론적 해석을 수행하였으며, 이에 따라 내구수명을 평가하였다. 특히 각 방법에는 시간의존성 확산계수와 고정형 확산계수를 각각 분류하여 도출된 내구수명의 변화를 분석하였다. 각 영향인자들의 증가비와 내구수명의 변화를 정규화하여 분석하면 각 인자가 내구수명에 미치는 정도를 파악할 수 있다. Fig. 12에서는 각 영향인자의 증가에 따른 내구수명의 변화비율을 도시하였으며, 각각의 결과를 선형 회귀분석하여 기울기를 평가하였다. 회귀분석결과는 Table 4에 나타내었으며 각 기울기(A)의 평균을 Fig. 13에 도시하였다.

모든 영향인자의 결정계수는 0.90이상의 높은 수준을 나타내고 있었다. 확산계수변화에 대한 내구수명의 기울기 범위는 0.342~0.409 수준으로 평가되었다. 임계염화물량에 대한 기울기 범위는 0.976~1.530 수준으로 확산계수보다 컸으며, 시간지수는 2.109~2.284로 매우 큰 영향을 나타내고 있다. Fig. 13에 도시된 기울기는 각 영향인자가 내구수명에 미치는 영향을 나타내는 지표가 될 수 있으며, 확산계수의 시간지수가 가장 기본확산계수 및 임계염화물량 보다 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

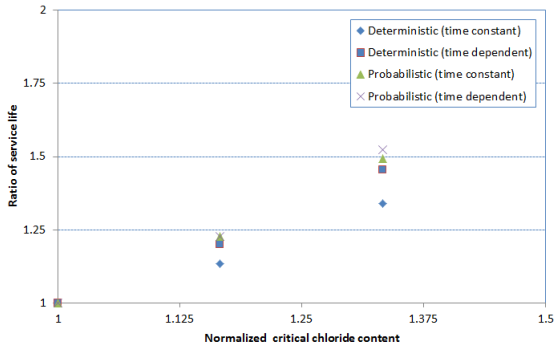
5. 결 론

시간의존성 염화물 확산계수 및 배합인자가 결정론 및 확률론적 내구수명에 미치는 영향분석을 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

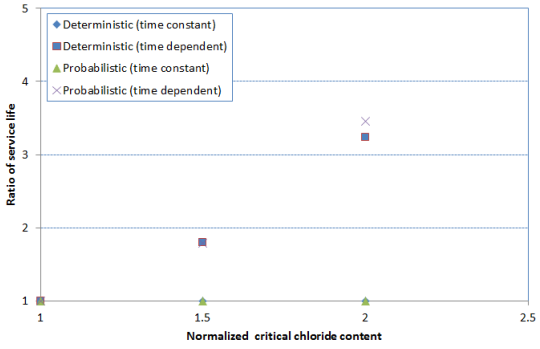
1. 시간의존성이 고려된 결정론적 방법에서 가장 큰 내구수명이 도출되었으며, 시간의존성이 고려되지 않은 확률론적



(a) Normalized diffusion coefficient and service life



(b) Normalized critical content and service life



(c) Normalized time effect and service life

Fig. 12. Normalized parameters and changing service life

해석에서 가장 낮은 내구수명이 평가되었다. 확산계수가 $2.5\times10^{-12}m^2/sec$에서 $7.5\times10^{-12}m^2/sec$로 300% 증가할 때, 내구수명은 32.1%(고정 결정), 28.0%(의존 결정), 35.6%(고정 확률), 25.5%(의존 확률) 수준으로 감소하였다.

2. 임계 염화물량이 133.3% 증가할 때, 내구수명은 고정된 확산계수를 사용한 결정방법에서는 134.0%, 시간의존성 확산계수를 사용한 결정방법에서는 145.4%의 증가비를 나타내었다. 또한 확률론적 방법에서는 고정 확산계수를 사용한 경우

Table 4. 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 critical chloride content	0.976	0.982	1.329	0.994	1.454	0.997	1.530	0.992
Normalized time exponent	-	-	2.109	0.967	-	-	2.284	0.951

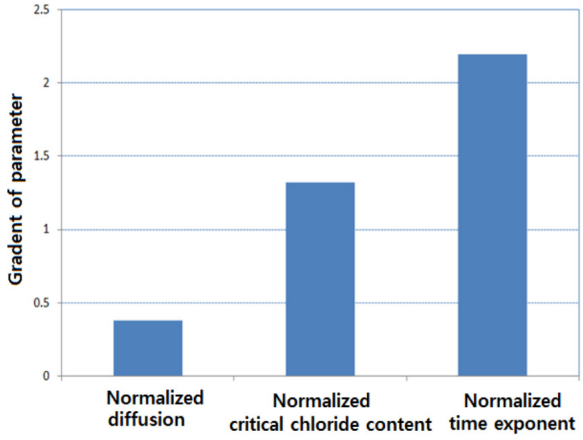


Fig. 13. Comparison of gradient of parameters

149.2%, 시간의존성 확산계수를 사용한 경우 152.5% 수준으로 각각 증가하였다. 시간지수가 200% 증가할 경우, 내구수명의 증가비율은 각각 결정론적 방법에서 323.8%, 확률론적 방법에서 346.0%로 평가되었다.

3. 확산계수의 변화비에 대한 내구수명의 변화비율을 0.342~0.409 수준으로, 임계염화물량에 대한 내구수명의 변화비율은 0.976~1.530 수준으로, 시간지수에 대한 변화비율은 2.109~2.284로 평가되었다. 초기의 확산계수가 높고 임계염화물이 낮다하더라도, 시간지수를 증가시킴으로서 내구수명을 가장 효과적으로 증가시킬 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구

재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2015R1A5A1037548).

References

Alonso, C., Castellote, M., Andrade, C. (2002). Chloride Threshold Dependence of Pitting Potential of Reinforcements, Electrochemica 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, CEB Bulletin 238, 29-43.

Chung, L., Jay Kim, J.H., 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, Document BE95-1347/R17, European Brite-Euram Ⅲ, Cur, Netherland.

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

Ferreira, M., Arskog, V., Jalali, S., Gjorv, O.E. (2004). "Probability-Based Durability Analysis of Concrete Harbor Structures," Proceedings of CONSEC04, Seoul, Korea, 1(1), 999-1006.

Hussain, S.E., Rasheeduzafar, S., Al-Musallam, A., 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.

JSCE. (2007). Standard Specifications and Guidelines.

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.

KCI. (2012). Concrete Standard Specification - Durability Part.

Lee, S.H., 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., Kishi, T. (2003). Multi-scale modeling of concrete performance, Journal of Advanced Concrete Technology, **1(2)**, 91-126.

Nawy, E.G. (1990). Reinforced Concrete-A Fundamental Approach-2nd Edition, Prentice Hall, USA, 69-72.

Poulsen, E. (1993). "On a Model of Chloride Ingress into Concrete, Nordic Miniseminar-Chloride Transport," Department of Building Materials, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.

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., Lee, C.H., 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.

Stewart, M.G., Mullard, J.A. (2007). Spatial time-dependent reliability analysis of corrosion damage and the timing of first repair for RC structures, Engineering Structure, **29(7)**, 1457-1464.

Sudret, B. (2008). Probabilistic models for the extent of damage in degrading reinforced concrete structures, Reliability Engineering & System Safety, **93(3)**, 410-422.

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., 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., 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.

Tang, L., Joost, G. (2007). On the mathematics of time-dependent apparent chloride diffusion coefficient in concrete, Cement and Concrete Research, **37(4)**, 589-595.

Val, D.V., Trapper, P.A. (2008). Probabilistic evaluation of initiation time of chloride induced corrosion, Reliability Engineering & System Safety, **93(3)**, 364-372.

Yalciner, H., Eren, O., Sensoy, 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.

시간의존성 염화물 확산계수를 고려한 확산 영향인자가 결정론적 및 확률론적 내구수명에 미치는 영향분석

염해에 노출된 콘크리트 구조물의 내구수명 평가는 크게 결정론적 방법과 확률론적 방법으로 분류할 수 있으며, 다양한 설계인자에 따라 내구수명은 크게 변화한다. 본 연구에서는 시간의존성 확산계수 및 내부영향인자(기본확산계수, 임계염화물량, 시간지수)를 고려하여 변화하는 내구적 파괴확률과 이에 따른 내구수명을 도출하였다. 임계 염화물량이 133.3% 증가할 때, 내구수명은 결정론적 방법에서 134.0~145.4%의 증가비를 나타내었으며, 확률론적 방법에서는 149.2%~152.5% 증가비를 나타내었다. 시간지수가 200% 증가할 경우, 내구수명의 증가비율은 결정론적 방법에서 323.8%, 확률론적 방법에서 346.0%로 증가하였다. 시간의존성 확산계수를 사용하여 과다설계를 방지할 수 있는 합리적인 확률론적 내구설계를 수행할 수 있었으며, 혼화재료를 사용하여 시간지수를 증가시키는 것이 매우 효과적인 내구수명 연장방안임을 알 수 있었다.