

탄산화에 노출된 GGBFS 콘크리트의 콜드 조인트 및 하중 재하를 고려한 확률론적 내구 수명 해석

김태훈¹, 권성준^{2*}

Probabilistic Service Life Analysis of GGBFS Concrete Exposed to Carbonation Cold Joint and Loading Conditions

Tae-Hoon Kim¹, Seung-Jun Kwon^{2*}

Abstract: Carbonation is a deterioration which degrades structural and material performance by permitting CO₂ and corrosion of embedded steel. Service life evaluation through deterministic method is conventional, however the researches with probabilistic approach on service life considering loading and cold joint effect on carbonation have been performed very limitedly. In this study, probabilistic service life evaluation was carried out through MCS (Monte Carlo Simulation) which adopted random variables such as cover depth, CO₂ diffusion coefficient, exterior CO₂ concentration, and internal carbonatable materials. Probabilistic service life was derived by changing mean value and COV (Coefficient of variation) from 100 % to 300 % and 0.1 ~ 0.2, respectively. From the analysis, maximum reduction ratio (47.7%) and minimum reduction ratio (11.4%) of service life were obtained in cover depth and diffusion coefficient, respectively. In the loading conditions of 30~60% for compressive and tensile stress, GGBFS concrete was effective to reduce cold joint effect on carbonation. In the tensile condition, service life decreased linearly regardless of material types. Additionally service life rapidly decreased due to micro crack propagation in the all cases when 60% loading was considered in compressive condition.

Keywords: Carbonation, Service life, Cold joint, Random variable

1. 서 론

콘크리트는 재료 수급성이 용이할 뿐만 아니라 경제적, 공학적 이점을 가지는 건설재료이며, 물 다음으로 가장 많이 사용되는 건설재료이다. 콘크리트 구조는 안정성을 확보하더라도 다양한 노출환경에서 사용 기간의 증가에 따른 열화가 발생한다. 또한 사용에 따라 구속조건에 의해 응력이 발생하고 이러한 응력은 열화 인자의 유입에 영향을 준다.

대도심지 또는 지하 구조물에서 주로 발생하는 탄산화는 1980년대 이후부터 꾸준히 문제가 야기되었다. 최근 들어 지속적인 하중 재하와 이산화탄소의 농도 증가로 탄산화에 의한 내구성 저하가 증가하고 있는 실정이다(Yoo et al., 2007; Kim et al., 2015; Verikari, 1988). 또한 이를 고려하여 각국의 탄산화에 관련된 규격 역시 엄격해지는 추세로 진전하고 있다. 탄산화는 콘크리트에 이산화탄소가 확산됨에 따라 공극

수의 pH가 감소하는 현상을 말한다. 이러한 열화기구는 매립된 철근을 부식에 대한 활성화 상태로 변화하게 만들고 이로 인해 전면적인 부식 형태가 발생한다. 특히 지하철 구조와 같은 지하구조물의 경우 600 ppm 이상의 이산화탄소의 농도와 60 ~ 70% 수준의 상대습도에 노출되는데, 이는 탄산화 진전에 매우 유리한 환경이다(CEB, 1997; Hwang et al., 2019; Papadakis et al., 1991). 탄산화 반응은 콘크리트의 품질과 외부 영향인자에 의해서 변화하는데, 건전부가 아닌 균열부 또는 미흡한 이어치기의 결과인 콜드 조인트와 같은 취약부는 탄산화를 촉진시킬 수 있는 요인으로 알려져있다(Choi et al., 2015; Cho et al., 2018; Yoo and Kwon, 2016).

콘크리트 취약부 중 콜드 조인트는 효과적인 시공을 위한 이어치기 중 앞서 타설된 콘크리트층의 경화가 완전히 시작된 후 타설이 진행됨으로 발생하는 불량한 시공 이음부이다. 기존의 실태조사를 보면 콜드 조인트면은 압축력에는 큰 영향을 보이지 않으나, 불일체면인 만큼 인장력과 전단력에 취약함을 나타내며 경우 국부적으로 열화속도가 증가하는 것으로 알려져 있다(ACI, 2001; JSCE, 2000). 다공체에 속하는 콘크리트의 내부 유효 공극과 그 안의 함수량은 이산화탄소를 비롯한 여러 열화 인자들이 내부로 확산되는 유입통로 역할

¹정희원, 한남대학교, 건설시스템공학과 석사과정

²정희원, 한남대학교, 건설시스템공학과 부교수

*Corresponding author: jjuni98@hannam.ac.kr

Hannam University, Daejeon, 34430, Republic of Korea

•본 논문에 대한 토의를 2020년 7월 31일까지 학회로 보내주시면 2020년 8월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

을 한다. 무거운 자중을 포함하여 콘크리트는 다양한 하중에 저항하는데 이 과정에서 유효 공극의 확장 및 축소와 같은 재료적 변동이 국부적으로 나타난다. 인장 하중이 재하될 경우 유효 공극은 확장되어 하중의 증가와 함께 열화 인자의 확산 속도는 선형적인 증가 경향을 보인다(Koh et al., 2019). 이와 달리 압축 하중이 재하될 경우 어느 정도 하중에서는 유효 공극은 축소가 되어 열화 인자의 확산 속도는 감소 경향을 보인다(Banthia et al., 2005). 하지만 파괴 하중에 가까워질수록 미세 균열과 같은 추가적인 유입통로의 발생으로 열화 인자의 확산 속도는 증가한다고 알려져 있다.

다양한 영향인자를 가지는 열화 현상인 탄산화에 대한 초기 연구는 축진 및 장기 폭로 실험을 통하여 도출된 실험 상수를 활용한 반경험식의 함수 형태에서 출발을 하였다(Izumi et al., 1986). 이후 1990년대부터 경화된 콘크리트를 대상으로 물리화학적 반응식을 고려하여 시작된 탄산화 모델링은 복잡한 수화 반응식과 철근 부식까지 연성적 모델링으로 발전되어 왔다(Maekawa et al., 2003; Maekawa et al., 2009). 현재는 건전부 뿐만 아니라 취약부에서 탄산화 영향 인자를 고려하여 탄산화 거동을 모델링한 기법이 꾸준히 제안되고 있다.

기존 탄산화에 대한 내구수명 평가는 결정론적 해석법으로 내구한계상태를 시간에 따라 증가하는 탄산화 깊이와 피복두께가 동일해지는 시점으로 정의하고 목표내구수명동안 피복두께가 성능을 유지하는 것으로 하여 이루어져왔다(KDS 14 20 40, 2016). 하지만 일반적인 결정론적 해석법은 콘크리트라는 복합체 특성상 재료 품질, 노출 환경, 시공 과정 등 뿐만 아니라 소요시간에 따른 구조물의 변동성에 대한 고려가 부족하다. 이러한 공학적인 불확실성 (Engineering Uncertainties)을 고려하기 위하여 최근 들어 다중확률변수를 고려한 확률론적 탄산화 해석기법이 내구설계부분에서 활용되고 있다(Amey et al., 1998; Lounis, 2003; Kwon, 2017, Defaux et al., 2006). 이러한 해석기법은 확률변수로 설정된 재료적, 외부 환경, 하중 조건 등의 영향인자의 확률분포를 고려하여 각각의 내구적파괴확률을 고려할 수 있다(Badaoui et al., 2013; Tasaka et al., 2009).

확률론적 관점에서는 내구한계 상태와 목표로 설정된 내구적 파괴확률이 중요하며, 부식이 발생하는 확률이 목표내구수명 내에서 목표내구확률보다 낮게 유지되는 기간을 내구수명으로 정의한다(Clifton, 1993; Kwon, 2019). 국내의 콘크리트 표준시방서에서는 탄산화에 대하여 한계 상태에 도달하는 신뢰도 지수(β)를 1.3 수준으로 제시하고 있다(KDS 14 20 40, 2016).

OPC (Ordinary Portland Cement)를 사용한 콘크리트 뿐 아니라 현재 광범위하게 사용되는 혼화재인 GGBFS (Ground Granulated Blast Furnace Slag)에 대한 연구도 활발하게 진행

중이다. GGBFS는 철강 제조시 발생하는 부산물로서 염해 저항성 개선, 수화열 저감, 유동성 증가 등 내구성능과 작업성능이 우수하다고 알려져 있다(Nath and Sarker, 2014; Yoon et al., 2019; Song et al., 2003). 하지만 치밀한 구조 형성에 내부 수산화 칼슘이 소모되어 탄산화에 취약하다고 알려져 있다(Izumi et al., 1986; Cho et al., 2018).

본 연구에서는 OPC 및 GGBFS 콘크리트를 대상으로 탄산화에 취약성을 드러내는 콜드 조인트를 고려한 확률론적 내구수명 평가를 진행하였다. 확률변수로 설정된 외부 이산화탄소 농도, 이산화탄소 확산계수, 내부 수화물 반응량, 피복두께에 대하여 변동성 (Mean and Coefficient of Variation)을 가정하여 변화하는 확률론적 내구수명을 분석하였다. 설정된 확률변수를 수치적으로 구현하기 위하여 MCS (Monte Carlo Simulation)기법을 사용하였다(Ann et al., 2010; Ang and Tang, 2007; Na et al., 2012). 또한 선행된 연구에서 콜드 조인트 조건 하에 도출된 하중이 탄산화 깊이에 미치는 영향을 고려하여 각 조건별 내구수명의 거동을 분석 및 비교하였다(Kwon, 2019; Koh et al., 2019).

2. 확률론적 해석을 위한 확률 변수 고려 및 해석 기법

2.1 확률론적 해석을 위한 지배방정식 구성

2.1.1 영향 인자가 고려된 탄산화 거동

탄산화에 있어서 영향 인자는 구조물의 외·내부적으로 다양하다. 기존의 연구는 여러 탄산화 영향 인자 중 이산화탄소의 확산계수, 외부 이산화탄소 농도, 탄산화 반응 수화물 등으로 구성된 탄산화 깊이 진행식을 식(1)과 같이 제안하였다(CEB, 1997).

$$d_c = \sqrt{2k_1k_2k_3\Delta c} \times \sqrt{\frac{D(T)_{CO_2}}{a} t} \times \left(\frac{t_0}{t}\right)^n \quad (1)$$

여기서, d_c 는 진행된 탄산화 깊이 (mm), k_1 은 국부적인 환경의 변동성에 대한 상수, k_2 는 양생에 대한 상수, k_3 은 국부적인 물-시멘트비에 대한 상수를 나타낸다. Δc 는 외부 이산화탄소 농도 (kg/m^3)를 나타내며, $D(T)_{CO_2}$ 는 온도를 고려한 이산화탄소의 확산계수 (m^2/sec)를, a 는 탄산화 반응 수화물로 구성된 함수로 이산화탄소 반응률을, n 은 건조 습윤 반복에 대한 상수를, t 와 t_0 는 각각 존치시간과 기준시간을 의미한다. 식(2)에서는 이산화탄소 확산계수는 다음과 같이 구성한다.

$$D(T)_{CO_2} = D_{ref} \cdot D(T) \quad (2)$$

여기서, 일반적으로 공극률과 포화도의 함수로 구성되는 D_{CO_2} 는 내구성 해석 프로그램 DUCOM을 통하여 도출하였으며, 식(3)과 같이 나타난다. 또한 온도영향을 고려하는 $D(T)$ 는 식(4)와 같다. 단위 시멘트량과 수화도, CaO 함량으로 구성된 a 는 식(5)와 같이 나타난다.

$$D_{CO_2} = \frac{\varnothing(1-S)^4 K_{CO_2}}{\Omega(1+N_k)} D_0^g + \frac{\varnothing S^4}{\Omega} D_0^d \quad (3)$$

여기서 Ω 는 단일 공극 ($\pi^2/4$), D_0^d (1.0×10^{-9} m²/s)와 D_0^g (1.34×10^{-9} m²/s)의 평균 Torturicity으로서 액상 및 기상 상태에서의 CO₂의 기본적인 확산을 나타낸다. 또한 N_k 는 Knudsen 수를, S 는 포화도를, K_{CO_2} 는 Henry의 법칙에 따른 평형 인자를 나타낸다(Lee et al., 2015; Maekawa et al., 2009).

$$D(T) = D_{CO_2} \exp \left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (4)$$

여기서, U 는 8,500 Cal/mol·K, R 은 기체상수로 8,314 J/K·mol, T_{ref} 는 기준온도로 298 K, T 는 노출 조건상의 절대 온도를 나타낸다.

$$a = 0.75 \cdot C \cdot CaO \cdot \alpha_H \cdot \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} \quad (5)$$

여기서, C 는 단위 시멘트량 (kg/m³), CaO 는 CaO 함량 (%)으로 0.65, α_H 는 수화도를 M_{CO_2} 과 M_{CaO} 는 각각 CO₂와 CaO 의 몰 중량을 나타낸다.

기존의 연구에서 참고된 식(1)을 사용하는 과정에서 계산의 단순화를 위하여 온도, 습도를 일정하게 가정하였다. 또한 구조물이 내부 상태임을 가정하여 k_1 을 1로, 그리고 n 을 0으로 정하였으며 외기로부터 구조물이 보호됨을 가정하여 k_3 를 1로, 구조물이 좋은 양생 과정을 걸쳐 타설됨을 가정하여 k_2 를 1로 정하였다. 이는 탄산화 진행에 적합한 지하구조물의 환경과 유사함을 나타내며, 각각의 정해진 요소로 식(1)은 식(6)으로 단순화되어 사용되었다(CEB, 1997).

$$d_c = \sqrt{\frac{2\Delta c D(T)_{CO_2}}{a}} t \quad (6)$$

식(6)에서 외부 이산화탄소 농도를 나타내는 Δc 는 식(7)과

같은 이상기체 방정식을 통하여 ppm에서 단위 체적에 따른 농도인 kg/m³으로 변환하여 사용하여야 한다.

$$ppm \times \frac{M_{CO_2}}{22.4 \cdot \frac{(273+T)}{273} \cdot \frac{760}{P}} = \frac{mg}{m^3} \quad (7)$$

여기서, ppm은 ppmv 즉 단위 체적에서의 농도, P 는 기압을 나타낸다.

2.1.2 하중 영향이 고려된 탄산화 거동

하중이 재하된 구조물은 구속 조건에 따라 인장 및 압축 하중 영향에 저항하며, 이는 하나의 부재인 경우에도 다른 탄산화 거동을 보일 수 있다. 기존의 연구에서는 이러한 탄산화에 대한 하중의 영향을 파악하기 위하여 건전부와 콜드 조인트 부로 분류한 후 하중을 재하하여 탄산화 확산계수의 거동을 분석하였다. 시편은 정확한 하중 재하를 위하여 압축의 경우 몰드형, 인장의 경우 실린더형으로 달리하였으며, 프레임을 체결하여 하중 재하 후 하중을 유지할 수 있게 하였다. 하중 재하의 경우 파괴 하중의 30%와 60%의 압축 및 인장 하중을 가하였으며, 프레임 결속 조건에서 KS F 2584에 의거한 축진 탄

Table 1 Changing ratio of carbonation velocity coefficient(Hwang et al., 2019)

Case	Loading type	Regression equation
OPC S	Compressive	$\alpha_{ratio} = 0.9444C^2 - 0.4833C + 1$
	Tensile	$\alpha_{ratio} = 0.4333C + 1$
OPC CJ	Compressive	$\alpha_{ratio} = 2.6481C^2 - 1.0389C + 1$
	Tensile	$\alpha_{ratio} = 0.6769C + 1.286$
GGBFS S	Compressive	$\alpha_{ratio} = 2.4915C^2 - 1.1467C + 1$
	Tensile	$\alpha_{ratio} = 0.2266C + 1$
GGBFS CJ	Compressive	$\alpha_{ratio} = 1.7332C^2 - 0.6964C + 1$
	Tensile	$\alpha_{ratio} = 0.4341C + 1.12$

S : Sound CJ : Cold joint C : Loading ratio about breaking load

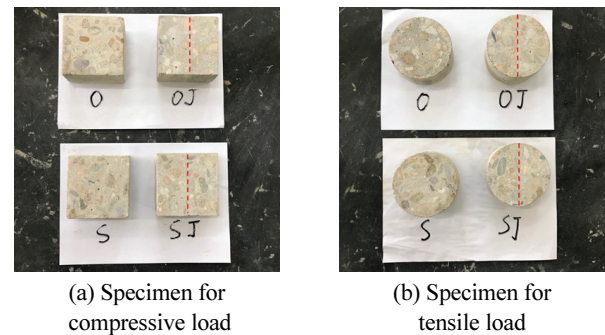


Fig. 1 Test procedures of inducing loads

산화 실험을 진행하였다. 상세한 실험과 이에 대한 내용은 기존의 문헌을 참고하는 것이 바람직하다(Hwang et al., 2019).

Table 1에는 압축 및 인장 하중의 영향을 받는 건전부와 콜드 조인트부에서의 탄산화 증가 비율을 나타내었다. 도출된 탄산화 증가 비율은 지배방정식에 적용하기 위해서는 식(6)의 탄산화 진행식을 식(8)과 같이 사용해야 한다. Fig. 1은 압축 및 인장 하중 재하를 위해 제작된 시편을 나타낸다.

$$d_c = \sqrt{\frac{2\Delta c D(T)_{CO_2}}{a}} t \times \alpha_{ratio} \quad (8)$$

여기서, α_{ratio} 는 콘크리트의 상태와 하중 영향에 따른 탄산화 증가 비율을 나타낸다.

2.2 MCS 기법 활용을 위한 확률 변수의 변동계수 고려

본 연구에서 사용한 확률론적 해석법은 결정론적 해석법에서의 탄산화 지배방정식은 따르지만, 내구수명을 다르게 정의한다. 확률론적 해석법에서는 설정한 기간, 즉 목표내구수명에서 탄산화로 인해 부식이 발생할 확률을 도출하고, 이러한 확률이 목표내구성확률 보다 적도록 유도한다. 식(9)는 이러한 확률 관계를 지배방정식으로 나타내었다.

$$P_f(t) = P(d_c(t) \geq C_d), T_{tar} = [P_f(t) \geq P_{tar}] \quad (9)$$

여기서, $P_f(t)$ 는 시간에 따라 증가하는 내구적과과확률을 나타내며 시간에 따라 증가하는 탄산화 깊이를 나타내는 $d_c(t)$ 가 설계피복두께를 나타내는 C_d 를 초과하는 확률을 의미한다. 식(7)을 구성하는 외부 이산화탄소 농도, 이산화탄소 확산계수, 피복두께 등은 정규분포를 따르며 각각의 평균과

표준편차, 변동계수를 가지는 확률변수로 고려하였다(Kwon, 2017). T_{tar} 는 내구수명을 나타내며, $P_f(t)$ 는 일반적으로 10% 수준으로 목표내구성확률을 나타내는 P_{tar} 를 초과하는 시점을 의미한다(EN-1991 2000).

본 연구에서는 제시된 확률론적 지배방정식을 기반으로한 MCS 기법을 통하여 확률변수의 변동성을 고려한 내구적과과확률을 평가하였다. 평가 시 4개의 설계변수는 각각 1,000개씩 무작위 샘플링되어 과정에 활용된다. Fig. 2는 진행된 확률론적 내구수명의 계산 흐름도를 나타낸다.

3. 인장 및 압축 응력 재하 수준을 고려한 확률론적 평가

3.1 배합 및 해석 조건

내구수명 평가를 진행하기 위해서 계획된 콘크리트 배합은 Table 2에 나타내었으며, Table 3은 확률론적 해석을 위해 설정된 각 확률변수의 모수를 나타내었다. 제시된 외부 이산화탄소 농도는 2018년도 한반도 연평균 이산화탄소 농도인 415 ppm으로 설정하였다(KMA, 2019). 각 설정된 확률변수 중 평균값 변화 시 내구수명 변동성을 분석하기 위해서 외부 이산화탄소 농도와 내부 수화물 반응량에 대해서 둘 다 1.25배와 1.5배의 변동성을 설정하였다. 또한 탄산화에 대한 콘크리트의 물리적, 화학적 변동성 영향을 고려한 내구수명 평가를 위하여 각각의 확률변수의 변동계수를 2.0배, 3.0배로 증가함을 설정하였다. 활용되는 지배방정식의 구성에 의하여 서로 영향을 주지 않는 독립적인 관계를 이루는 4가지 해석변수 등이 내구수명에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다.

Table 2 Mix proportions for probabilistic service

Case	Gmax (mm)	S / a (%)	W / B (%)	W	Unit weight (kg/m ³)			
					C	BFS	S	G
OPC	25	41.4	60	180	300	0	732	1056
GGBFS					180	120	724	1044

W: Water, C: Cement, GGBFS: Ground Granulated Blast Furnace Slag, S: Sand, G: Gravel

Table 3 Variables condition with design parameters (Normal distribution)

Type	D_{CO_2} ($\times 10^{-8}$ m ² /sec)	a (kg/m ³)	Δc ($\times 10^{-6}$ g/m ³)	Cover depth (mm)
OPC	N(6.21, 0.1)	N(107.8, 0.1)	N(767.75, 0.1)	N(60, 0.1)
GGBFS	N(2.70, 0.1)	N(44.8, 0.1)		

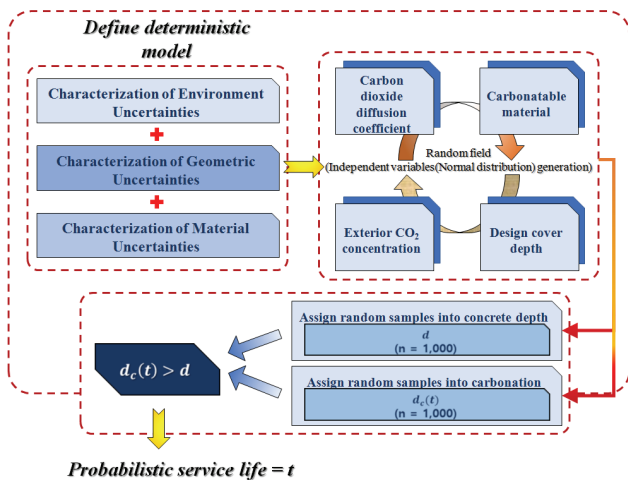


Fig. 2 Design progress for service life via MCS

3.2 확률변수에 따른 내구수명의 거동

3.2.1 외부 이산화탄소 농도 및 내부 수화물 반응량의 평균 값 변동에 따른 내구수명 거동

외부 이산화탄소 농도는 콘크리트 탄산화 발현의 전제 조건이자 현실에서 인위적으로 설정할 수 없는 환경 조건이다. 보고된 바에 따르면 연평균 415 ppm의 한반도 이산화탄소 농도는 대도시 지역의 경우 500 ppm 이상, 국부적으로 600 ppm 이상으로 분포가 균일하지 않다(Ecoseoul, 2013). 이에 내부 수화물 반응량은 콘크리트 내부로 확산되는 이산화탄소에 대해서 철근 부식에 저항할 수 있는 유일한 화학적 기재이다. 하지만 GGBFS와 같은 혼화재를 사용할 경우 포졸란 반응에 의해 내부 수화물 중 수산화칼슘이 소모되어 탄산화에 취약점을 나타낸다. 또한 콘크리트 품질과 양생에 따라 변동성을 가질 수 있어 자세한 분석을 요한다.

Fig. 3은 외부 이산화탄소 농도와 내부 수화물 반응량의 1.25배, 1.5배 변동성을 고려하였을 때의 내구적파괴확률의 변화와 도출된 내구수명을 나타낸다. 외부 이산화탄소 농도는 415 ppm을 기준으로 도출된 내구수명 87년 대비 519 ppm의 경우 80.46%, 623 ppm의 경우 66.67%의 내구수명 감소 경향을 보

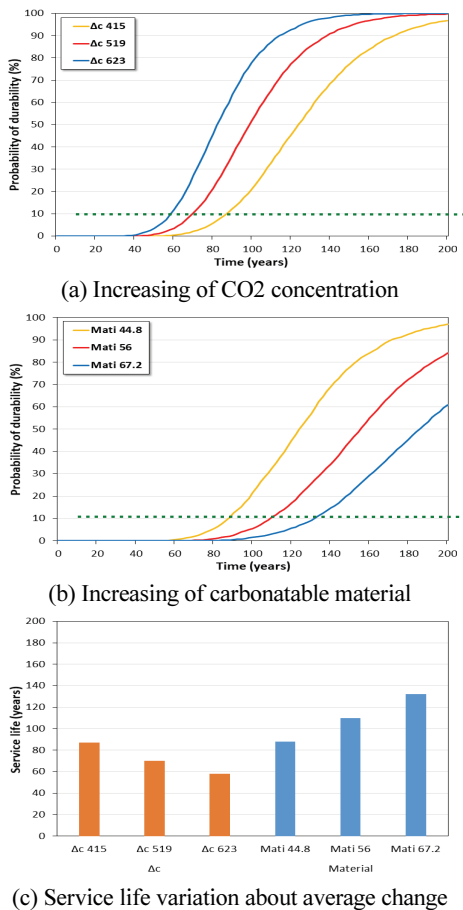


Fig. 3 Average variables of GGBFS

였다. 내부 수화물 반응량은 44.80 kg/m³을 기준으로 도출된 내구수명 87년 대비 56 kg/m³의 경우 125%, 67.20 kg/m³의 경우 150%의 내구수명 증가 경향을 보였다. 외부 이산화탄소 농도와 내부 수화물 반응량에 대한 내구수명 분석 결과 외부 이산화탄소 농도 증가는 최대 33.33%의 내구수명 감소를, 내부 수화물 반응량의 증가는 70.45%의 내구수명 증가를 나타내었다.

3.2.2 변동계수의 변화에 따른 내구수명 거동

탄산화에 대한 확률론적 내구수명 해석을 위해 Table 3에 나타난 확률변수의 변동계수를 2.0배와 3.0배 증가시켰을 때

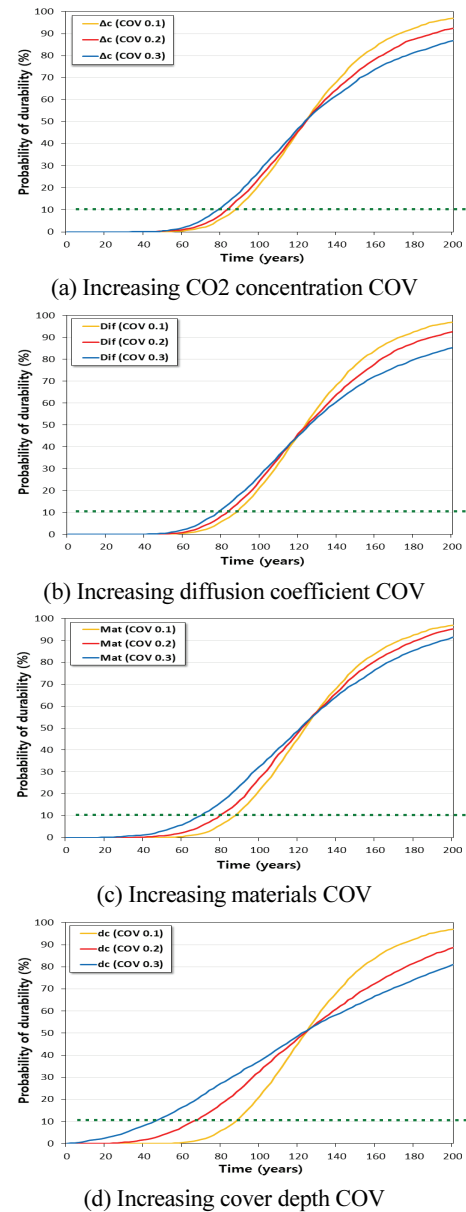


Fig. 4 COV variations for random variables

내구수명의 변화를 분석하였다. Fig. 4는 확률변수의 변동계수 변화에 따른 내구적파괴확률의 변화와 도출된 내구수명을 나타내었다.

노출 환경과 실질적으로 관련된 확률 변수인 외부 이산화탄소 농도의 변동계수에 변동성이 증가할수록 내구수명은 감소하는 경향을 나타내었다. 변동계수 0.1에서 도출된 내구수명 88년을 기준으로 변동계수가 0.2로 증가할 경우 95.45%, 0.3으로 증가할 경우 87.5%의 내구수명을 나타내었다. 이로 일시적인 외부 이산화탄소 농도의 변동성 증가는 최대 12.50%의 내구수명을 감소시킴을 나타내었다.

함수량, 유효 공극의 크기와 같은 콘크리트 자체 특성과 연관된 확률 변수인 이산화탄소 확산계수는 변동계수 0.1에서 도출된 내구수명 88년을 기준으로 변동계수가 0.2로 증가할 경우 94.32%, 0.3으로 증가할 경우 88.64%의 내구수명을 나타내었으며 최대 11.36%의 내구수명 감소를 나타내었다.

동일한 방법으로 내부 수화물 변동계수를 0.1에서 도출된 내구수명 88년을 기준으로 하면, 변동계수가 0.2로 증가할 경우 90.91%, 0.3으로 증가할 경우 79.55%의 내구수명을 나타내었다. 최대 20.45%의 내구수명 감소율을 알 수 있다.

피복두께에서는 변동계수 0.1에서 도출된 내구수명 88년을 기준으로 할 경우, 변동계수가 0.2로 증가할 경우 75%, 0.3으로 증가할 경우 52.27%의 내구수명을 나타내었다. 제시된 탄산화 확률변수의 변동계수에 변동성을 준 결과 콘크리트 피복두께의 변동계수가 0.3일 때 47.72%로 가장 큰 내구수명 감소를 나타내었다. 이는 다른 확률변수도 중요한 인자이지만 균질한 품질의 피복두께의 확보가 탄산화 저항에 가장 효과적으로 대응하는 것으로 나타났다.

3.2.3 하중 수준에 따른 내구수명 거동

본 연구에서는 콜드 조인트 조건이 고려된 콘크리트를 대상으로, 기존의 연구에서 제안된 탄산화 깊이 증감률을 적용하였다. 이후 압축 및 인장 하중 재하 시 목표내구성확률 10%를 기준으로 하는 내구수명의 변화를 확률론적으로 분석하였다(Hwang et al., 2019). Fig. 5는 재하 하중에 따라 변화하는 콜드 조인트 콘크리트의 내구수명 거동과 비교를 나타낸다.

압축 및 인장 하중을 받는 콜드 조인트 콘크리트의 경우 건전부 및 콜드 조인트부 모두 압축 하중 30%에서 가장 증가된 내구수명을 나타내었다. GGBFS 콘크리트는 최대 77년, OPC 콘크리트에서는 최대 63년으로 내구수명이 평가되었는데, 이는 Table 1과 같이 사용 하중 이하에서의 압축부 탄산화 진행이 낮기 때문이다. 하지만 압축 하중 60% 조건에서는 최대 27년의 내구수명이 감소하는데, 이는 하중의 증가에 따라 내부 미세균열이 진전되기 때문이다.

압축 및 인장 하중을 받는 콜드 조인트 콘크리트는 내구수

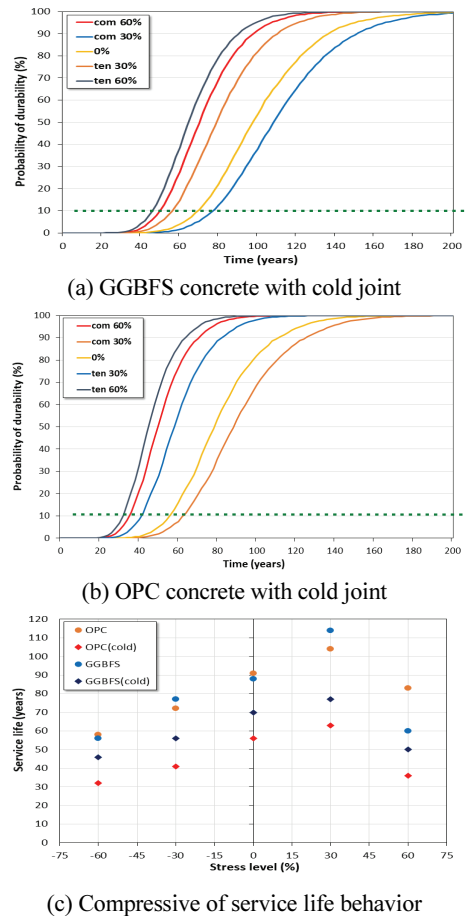


Fig. 5 Service life behavior with changing load

명의 거동은 유사하나 건전부 콘크리트에 비하여 낮은 내구수명을 나타내었다. 건전부 대비 GGBFS 콘크리트의 경우 압축 하중 30%에서 32.5%, OPC 콘크리트의 경우 압축 하중 60%에서 56.6%의 최대 내구수명 감소율을 나타내었다. 콜드 조인트 조건에서의 OPC 콘크리트는 모든 조건에서 GGBFS 콘크리트보다 낮은 내구수명을 보였으며, 이는 인장 하중 60%에서 143.75%의 최대 감소율을 보였다.

결정론적인 내구수명 평가방법에서는 내구성 파괴확률이 50%인 경우를 가정하여 피복두께와 탄산화 깊이를 계산을 하므로 내구수명이 크게 평가된다. 합리적인 변동계수와 환경 하중계수, 그리고 재료감소계수를 이용하면 확률론적인 방법으로 도출된 내구수명과 차이는 감소할 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 콘크리트 탄산화 확률 변수의 변동성과 하중 조건을 고려하여 콜드 조인트 조건을 고려한 GGBFS 및

OPC 콘크리트의 내구수명을 확률론적으로 평가하였으며, 본 논문을 통한 결론은 다음과 같다.

- 1) GGBFS 콘크리트는 이산화탄소 농도 415 ppm 적용시 내구수명을 100%로 하였을 때, 519 ppm 적용시 80.5%, 623 ppm 적용시 66.7%로 내구수명이 감소하였다. 내부 수화물 반응량에 대해서는 44.8 kg/m³을 기준으로 56 kg/m³에서 125%, 1.5배 증가한 67.2 kg/m³에서 150%의 증가된 내구수명을 나타내었다.
- 2) 외부 이산화탄소 농도, 이산화탄소 확산계수, 내부 수화물 반응량, 피복 두께 등 확률변수의 변동계수를 0.1을 기준으로 0.2, 0.3으로 변화시킴에 따라 내구수명은 최대 47.7%의 감소를 나타내었다. 변동계수 0.1을 기준으로 0.2의 경우 각각 95.5%, 94.3%, 90.9%, 75.0% 수준으로, 0.3에서는 각각 87.5%, 88.6%, 79.6%, 52.3% 수준으로 변동계수가 증가함에 따라 내구수명이 감소함을 나타내었다. 수화물 및 확산계수의 변동성이 작을수록 내구수명이 증가하였으므로 콘크리트의 품질관리가 중요함을 알 수 있다. 또한 피복 두께에서 가장 큰 내구수명 감소율이 도출되었는데, 이는 피복 두께의 확보가 탄산화에 대한 가장 효과적인 방법임을 알 수 있다.
- 3) 목표내구적과괴확률 10%을 고려하면, 콜드 조인트 조건에서, GGBFS 콘크리트는 OPC 콘크리트 기준 122.2 ~ 143.8%의 증가된 내구수명을 나타내었다. 또한 하중 0%를 기준으로하면, 압축 파괴 하중 30%에서는 110%의 증가율을, 압축파괴하중 60%에서는 30% 대비 35.1%의 감소율을 나타내었다.
- 4) 건전부 및 콜드 조인트 콘크리트의 하중 재하에 따른 내구수명 변화거동은 유사하나, 압축 하중이 30%에서 60%로 증가할 경우, GGBFS 콘크리트의 건전부 및 콜드조인트에서는 35.1 ~ 47.4%, OPC 콘크리트의 건전부 및 콜드조인트에서는 20.2 ~ 42.9% 수준으로 감소하였다. 또한 인장영역에서 콜드조인트부에서는 낮은 하중 수준에서도 선형적으로 내구수명의 감소가 크게 발생하므로 유지관리 시 이에 대한 주의가 필요하다.

감사의 글

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

References

1. ACI 224. 3R - 95. (2001), Joints in Concrete Construction, American Concrete Institute.
2. Ang, A. H. S., Tang, W. H. (2007), Probability Concepts in Engineering Planning and Design : Emphasis on Application to Civil and Environmental Engineering, Wiley, 199-231.
3. Amey, S. L., Johnson, D. A., Miltenberger, M. A., Farzam, H. (1998), Predicting the service life of concrete marine structures : an environmental methodology, *ACI Structural Journal*, 95(2), 205-214.
4. Ann, K. Y., Park, S. W., Hwang, J. P., Song, H. W., Kim, S. H. (2010), Service life prediction of a concrete bridge structure subjected to carbonation, *Construction and Building Materials*, 24(8), 1494-1501.
5. Badaoui, A., Badaoui, M. H., Kharchi, F. (2013), Probabilistic analysis of reinforced concrete carbonation depth, *Materials Sciences and Applications*, 4(3A), 205-215.
6. Banthia, N., Biparva, A., Mindess, S. (2005), Permeability of concrete under stress, *Cement and Concrete Research*, 35(9), 1651-1655.
7. CEB. (1997), New Approach to Durability Design, 96-102.
8. Clifton, J. R. (1993), Predicting the service life of concrete, *ACI Materials Journal*, 90(6), 611-617.
9. Cho, S. J., Yoon, Y. S., Kwon, S. J. (2018), Carbonation behavior of GGBFS - based concrete with cold joint considering curing period, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 6(4), 259-266.
10. Choi, S. J., Kang, S. P., Kim, S. C., Kwon, S. J. (2015), Analysis technique on water permeability in concrete with cold joint considering micro pore structure and mineral admixture, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, 1-10.
11. Defaux, G., Pendola, M., Sudret, B. (2006), Using spatial reliability in the probabilistic study of concrete structures : The example of a RC beam subjected to carbonation inducing corrosion, *Journal de Physique IV(Proceedings)*, 136, 243-253.
12. EN - 1991. (2000), Eurocode 1 : Basic of Design and Actions on Structures, European Committee for Standardization.
13. Ecoseoul. (2013), Map of CO2 concentrations in seoul. Available at: http://www.ecoseoul.or.kr/xe/?document_srl=1893070.
14. Hwang, S. H., Yoon, Y. S., Kwon, S. J. (2019), Carbonation behavior of GGBFS concrete considering loading conditions and cold joint, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 31(4), 365-373.
15. Hwang, S. H., Yoon, Y. S., Kwon, S. J. (2019), Carbonation Behavior Evaluation of OPC Concrete Considering Effect of Aging and Loading Conditions, *Journal of the Korea Institute for structural maintenance and inspection*, 23(1), 122-129.
16. Izumi, I. Kita, D., Maeda, H. (1986), Carbonation, Kibodang Publication, 35-88.
17. JSCE. (2000), Concrete Cold Joint Problems and Countermeasures, Concrete Library Japan 387 Society of Civil Engineering, 103.
18. Kwon, S. J. (2017), Simulation on Optimum Repairing Number of Carbonated RC Structure Based on Probabilistic Approach, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 5(3), 230-238.
19. Kwon, S. J. (2019), Probabilistic Service Life Evaluation for OPC

- Concrete under Carbonation Considering Cold Joint and Induced Stress Level, *Journal of the Korea Institute for structural maintenance and inspection*, 23(6), 45-52.
20. KDS 14 20 40. (2016), Concrete Structure durability design standard, Korea Design Standard, 13-14.
 21. KMA. (2019), Report of Global Atmosphere Watch 2018, National Institute of Meteorological Science, Jeju, 26-27.
 22. Kim, G. Y., Choe, G. C., Nam, J. S., Choi, H. G. (2015), Durability design of concrete structure based on carbonation, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 27(5), 21-24.
 23. Koh, T. H., Kim, M. K., Yang, K. H., Yoon, Y. S., Kwon, S. J. (2019), Service life evaluation of RC T-girder under carbonation considering cold joint and loading effects, *Construction and Building Materials*, 226, 106-116.
 24. Lee, Y., Kwon, S. J., Park, K. T. (2015), Simplified A carbonation model considering Ca(OH)₂ solubility and porosity reduction, *Journal of the Korea Institute for structural maintenance and inspection*, 19(1), 128-138.
 25. Lounis, Z. (2003), Probabilistic modeling of chloride contamination and corrosion of concrete bridge structures, *Proceeding of Fourth International Symposium on Uncertainty Modeling and Analysis*, IEEE, Washington, 447-451.
 26. Maekawa, K., Ishida, T., Kishi, T. (2003), Multi-scale modeling of concrete performance - integrated material and structural mechanics, *Advanced Concrete Technology*, 1(1), 91-119.
 27. Maekawa, K., Ishida, T., Kishi, T. (2009), Multi-Scale Modeling of Structural Concrete, Taylor & Francis, 86-105.
 28. Na, U. J., Kwon, S. J., Chaudhuri, S. R., Shinozuka, M. (2012), Stochastic model for service life prediction of RC structures exposed to carbonation using random field simulation, *Journal of the Korea Society of Civil Engineers*, 16(1), 133-143.
 29. Nath, P., Sarker, P. K. (2014), Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition, *Construction and Building Materials*, 66, 163-171.
 30. Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., Fardis, M. N. (1991), Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete, *ACI Materials Journal*, 88(2), 186-196.
 31. Song, H. W., Kwon, S. J., Lee, S. W., Byun, K. J. (2003), A study on resistance of chloride ion penetration in ground granulated blast furnace slag concrete. *Journal of the Korea Concrete Institute*, 15(3), 400-408.
 32. Tasaka, S., Shinozuka, M., Chaudhuri, S., Na, U. J. (2009), Bayesian inference for prediction of carbonation depth of concrete using MCMC, *Memoirs of Akashi National College of Technology*, 52, 45-50.
 33. Vesikari, E. (1988), Service Life of Concrete Structures with regard to Corrosion of Reinforcement, Technical Reports 533, VTT Technical Report Center of Finland, 29-128.
 34. Yoon, Y. S., Cheon, J. H., Kwon, S. J. (2019), Quantification of chloride diffusivity in steady state condition in concrete with fly ash considering curing and crack effect, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 7(2), 109-115.
 35. Yoo, S. W., Kwon, S. J. (2016), Effects of cold joint and loading conditions on chloride diffusion in concrete containing GGBFS, *Construction and Building Materials*, 115, 247-255.
 36. Yoo, S. W., Bang, G. S. Jung, S. H., Chang, S. P. (2007), Study on the carbonation properties of fly ash concrete by the new rapid carbonation experimental system, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 27(4A), 601-607.

Received : 03/20/2020

Revised : 04/22/2020

Accepted : 06/24/2020

요 지 : 탄산화는 콘크리트 내부로 이산화탄소가 확산되어 매립 철근에 부식을 유발함으로써 콘크리트 구조물의 구조적, 재료적 성능을 저하시키는 열화 현상이다. 결정론적인 방법을 통한 내구수명 평가는 일반적이지만, 하중 및 콜드 조인트 효과를 고려한 확률론적 내구수명 평가에 대한 연구는 매우 제한적이다. 본 연구에서는 확률 변수를 피복 두께, 이산화탄소 확산계수, 외부 이산화탄소 농도, 내부 수화물 반응량으로 정의하고 취약부와 하중 조건을 고려한 확률론적 내구수명 도출을 MCS (Monte Carlo Simulation) 기법을 통해서 진행하였다. 각 확률 변수의 평균을 1.0 ~ 3.0배로 변화시키고, 변동계수를 0.1 ~ 0.2까지 변화시키면서 내구수명을 평가하였다. 분석한 결과 피복 두께에서 47.7%의 내구수명 감소율을, 이산화탄소 확산계수에서 11.4%의 내구수명 감소율을 나타내었다. 파괴 하중에 30% 및 60%의 압축 및 인장 하중을 고려한 결과, 콜드 조인트가 고려된 경우 GGBFS 콘크리트가 OPC 콘크리트보다 탄산화에 대한 높은 저항성을 보였으며, 인장 영역에서는 사용 재료에 상관없이 선형적으로 내구수명 감소가 평가되었다. 또한 압축 하중 60% 조건에는 미세 균열의 진전으로 인해, 모든 조건에서 빠르게 내구수명이 감소하였다.

핵심용어 : 탄산화, 내구수명, 콜드 조인트, 확률 변수
