

콜드조인트 및 재하 응력을 고려한 탄산화에 노출된 OPC 콘크리트의 확률론적 내구수명평가

권성준^{1*}

Probabilistic Service Life Evaluation for OPC Concrete under Carbonation Considering Cold Joint and Induced Stress Level

Seung-Jun Kwon^{1*}

Abstract: Steel corrosion due to carbonation in RC (Reinforced Concrete) structures easily occurs in urban cities with high CO₂ concentration. RC structures are always subjected to external loading with various boundary conditions. The induced stress level causes changes in diffusion of harmful ion like CO₂. In this work, a quantification of carbonation progress with stress level is carried out and carbonation prediction is derived through the relations. Determining the design parameters like cover depth, CO₂ diffusion coefficient, carbonatable materials, and exterior CO₂ concentration as random variables, service lives under carbonation with design parameter's variation are obtained through MCS(Monte Carlo Simulation). Additionally the service life with different stress level is derived and the results are compared with those from deterministic method. Cover depth and cement hydrates are evaluated to be very effective to resist carbonation, and the proposed method which can consider the effect of stress on service life can be applied to maintenance priority determination.

Keywords: Carbonation, Service life, Probabilistic method, Design parameter

1. 서 론

콘크리트 구조물은 다양한 노출환경에서 사용되고 있으며, 내적, 외적인 구속조건이 항상 있으므로 공용 중 응력의 영향을 받게 된다. 최근 들어 대도시의 이산화탄소 농도가 증가하고 있으며, 이는 콘크리트의 탄산화에 따른 철근 부식 가능성이 증가되고 있다(Yang et al., 2013; Lee et al., 2017). 탄산화는 외부로부터 이산화탄소가 유입되고 이로 인해 내부 공극수의 pH가 감소하여 부식이 발생하기 쉬운 열화기구를 의미한다(Ishida and Maekawa, 2000). 탄산화 진행의 정량화에 대해서는 많은 연구가 진행되어 왔다. 초기에는 간단한 배합 설계 인자를 통한 반 경험식 등이 탄산화 깊이를 구현하기 위해 사용되었으나, 1990년대 이후부터는 수화반응과 탄산화 반응에 따른 정량적인 탄산화 거동 모델이 제안되기 시작했다(CEB, 1997; Izumi et al., 1986; Papadakis et al., 1991). 이후 초기 재령 거동 모델링이 같이 도입되면서 임의 시간 및 공간에서의 수화반응과 수분이동 모델을 고려한 탄산화 모델이

제안되었으며, 최근까지도 이러한 수치해석접근은 지속적으로 개발되고 있다(Song and Kwon, 2007; Maekawa et al., 2008; Kwon et al., 2014).

균열부 및 타설 이음부 같은 취약부에서의 탄산화 거동은 주로 실태조사를 기반으로 발전하고 있는데, 배합 추정 및 노출환경의 정량화에 대한 문제가 꾸준히 제기되고 있다. 또한 공학적인 불확실성에 대한 문제로 결정론적인 접근 방법 외에 확률론적인 연구를 통하여 내구수명 및 유지관리에 대한 연구가 진행되고 있다(Kwon and Na, 2011; Na et al., 2012).

결정론적인 방법에서는 정량적인 탄산화 진행식의 유도를 통하여 탄산화 깊이가 피복두께를 초과하는 시점까지를 내구수명으로 정의하는 것이 일반적이다(CEB, 1997; Izumi et al., 1986; KCI, 2012). 그러나 확률론적인 방법에서는 피복두께, 외부환경조건, 탄산화 반응에 대한 설계변수를 확률변수로 정의하고 부식이 발생할 확률, 즉 탄산화 깊이가 피복두께를 넘어서는 확률을 목표임계확률보다 낮도록 유지하는 기간을 내구수명을 정의한다(CEB, 1997). 최근 들어 시공간적 확률 분포를 고려한 Spatial Variability에 대한 연구도 진행되고 있으나, 수치해석 방법이 복잡하고 많은 확률변수 정의의 어려움으로 인해 내구수명을 평가하는데 있어서 실질적으로 사용되고 있지는 못한 실정이다(Na et al., 2012; Defaux et al., 2006; Duprat and Sellier, 2006). 콘크리트 구조물은 다양한 경

¹ 정회원, 한남대학교 건설시스템 공학과 부교수

*Corresponding author: jjuni98@hannam.ac.kr

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

•본 논문에 대한 토의를 2019년 12월 1일까지 학회로 보내주시면 2020년 1월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

계조건을 가지게 되는데, 위치에 따라 인장 및 압축응력을 받게 되며 구속에 의하여 균열이 발생하게 된다. 콘크리트와 같은 다공성 매체는 공극을 통하여 외부의 이온 및 수분이 유입하게 되는데, 일반적으로 사용하중 수준의 압축응력이 발생할 경우 이온과 가스의 침투는 감소하게 된다(Yang et al., 2018; Bae and Lim, 2012; Banthia et al., 2005). 이는 물질이동의 주된 경로인 유효공극이 감소하기 때문이며, 콘크리트 내부의 열화 인자의 침투는 인장응력이 발생할 경우 선형적으로 증가하는 것으로 알려져 있다(Choinska et al., 2007; Tegger et al., 2013). 균열부나 시공이음부에 대한 탄산화에 대한 연구는 실험 및 해석적으로 많이 연구되었으나(Kwon et al., 2004; Kwon et al., 2007), 응력수준에 따른 탄산화 진행에 대한 연구는 실험적으로 제안되고 있는 수준이며, 이를 확률론적인 기법을 이용하여 내구수명의 변화를 평가한 연구는 매우 제한적이다(Hwang et al., 2019; Cho et al., 2018).

본 연구에서는 기존의 실내 실험 자료를 통하여 도출된 OPC(Ordinary Portland Cement) 콘크리트의 응력에 따른 탄산화 변동성을 분석하고 이에 따라 탄산화 영향변수를 정량화하였다. 이후 탄산화 변동성을 고려한 탄산화 속도계수식을 도출하고 이산화탄소 농도, 설계피복두께, 이산화탄소 확산계수, 탄산화 저항 수화물을 확률변수로 정의하여 MCS(Monte Carlo Simulation)를 수행하였다. 도출된 내구수명은 결정론적 방법으로 도출된 내구수명과 비교 하였으며, 각 영향인자의 변동성이 내구수명에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다.

2. 영향인자에 따른 탄산화 거동 변화 및 확률 분포 구성

2.1 응력 수준의 변화에 따른 탄산화 속도의 변화

기존의 연구결과에서는(Hwang et al., 2019) 축진 탄산화 실험을 통하여 인장 및 압축 재하수준에 따른 탄산화 속도계

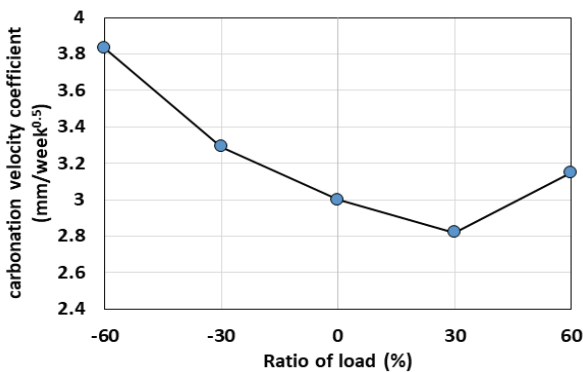


Fig. 1 Carbonation velocity variations with loading conditions

수의 변화를 분석하였는데, 압축응력을 인가하였을 때는 30% 수준에서는 탄산화 침투 깊이가 감소하다가 이후 60% 하중 인가 시 증가하였다. 인장응력을 도입할 경우는 초기부터 탄산화 깊이가 증가하였는데, 이러한 열화 증가 경향은 염화물 침투와 동일하다(Yang et al., 2018). Fig. 1에서는 응력변화에 따른 탄산화 속도계수 변화율을 나타내고 있다.

2.2 내구수명 평가 및 MCS(Monte Carlo Simulation)를 통한 확률 변동성 구성

2.2.1 탄산화에 노출된 콘크리트 구조의 내구수명 평가

CEB에서는 외부 이산화탄소 농도와 확산계수, 그리고 탄산화 반응성 수화물을 이용하여 탄산화 깊이 예측식을 제안하였는데 이는 식(1)과 같다(CEB, 1997).

$$d_c = \sqrt{2k_1 k_2 k_3 \Delta c} \times \sqrt{\frac{D_{CO_2}}{a} t \left(\frac{t_0}{t}\right)^n} \quad (1)$$

여기서, d_c 는 탄산화 깊이(mm), k_1 는 국부적인 환경변동에 대한 상수, k_2 는 양생에 대한 상수, k_3 는 국부적인 물-시멘트 비에 대한 상수이다. 또한 Δc 는 이산화탄소 농도(kg/m³), D_{CO_2} 는 이산화탄소 확산계수(m²/s), a 는 이산화탄소 반응률로서 탄산화와 반응하는 수화물의 함수로 구성된다. n 은 건조습윤반복에 대한 상수, t_0 는 기준시간, t 는 존치시간을 나타낸다.

여기서, D_{CO_2} 는 공극률과 포화도의 함수로 구성이 되는데, 본 연구에서는 내구성 해석 프로그램인 DUCOM으로 이산화탄소 확산계수를 도출하였다. 또한 a 는 식(2)에 나타내었는데, 단위시멘트량과 수화도, 그리고 CaO의 함수로 구성된다.

$$a = 0.75 \cdot C \cdot CaO \alpha_H \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} \quad (2)$$

여기서 C 는 단위시멘트량(kg/m³), CaO 는 CaO 혼입량(%)으로서 0.65, α_H 는 수화도, M 은 각각 CO₂ 및 CaO의 몰 중량을 나타낸다.

일정한 습도 상태를 가정하면 식(1)은 식(3)과 같이 간략화시킬 수 있으며, 이 식은 MCS의 탄산화 진행 기본식으로 사용할 수 있다.

$$d_c = \sqrt{\frac{2\Delta c D(T)}{a} t} \quad (3)$$

여기서 $D(T)$ 는 온도를 고려한 이산화탄소의 확산계수로 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 U 는 8500(Cal/mol·K), R 은 기체상수(8.314J/K·mol), T_{ref} 는 기준온도(298K), T 는 노출된 조건의 절대 온도를 나타낸다.

2.2.2 MCS를 통한 확률변수 구성

결정론적 방법과는 다르게 확률론적인 방법에서는 목표내구성 확률에 따라 내구수명이 결정된다. 식(5)에서는 확률론적 방법의 지배방정식을 나타낸다.

$$P_f(t) = P(C_p(t) \geq C_d), T_{ser} = [P_f(t) \geq P_{int}] \quad (5)$$

여기서 $P_f(t)$ 는 시간에 따라 증가하는 내구성 파괴확률로서 시간에 따라 증가하는 탄산화 깊이($C_p(t)$)가 설계 피복두께(C_d)를 초과하는 확률을 나타낸다. 또한 T_{ser} 은 내구수명으로 $P_f(t)$ 가 목표내구성 확률인 P_{int} 를 초과하는 시점을 나타낸다. 식(5)에서 탄산화 진행식은 식(3)으로 정의할 수 있으며, P_{int} 는 일반적으로 10% 수준으로 설정하고 있다(EN-1991, 2000). 본 연구에서는 식(5)에서 이산화탄소 확산계수, 피복두께, 표면 이산화탄소의 농도, 탄산화 반응 수화물을 확률변수로 설정하였으며, MCS를 수행하여 확률론적인 내구수명을 평가하였다. Fig. 2에서는 탄산화 영향인자를 고려한 확률론적 내구수명을 나타내는 확률 계산 흐름도를 나타낸다.

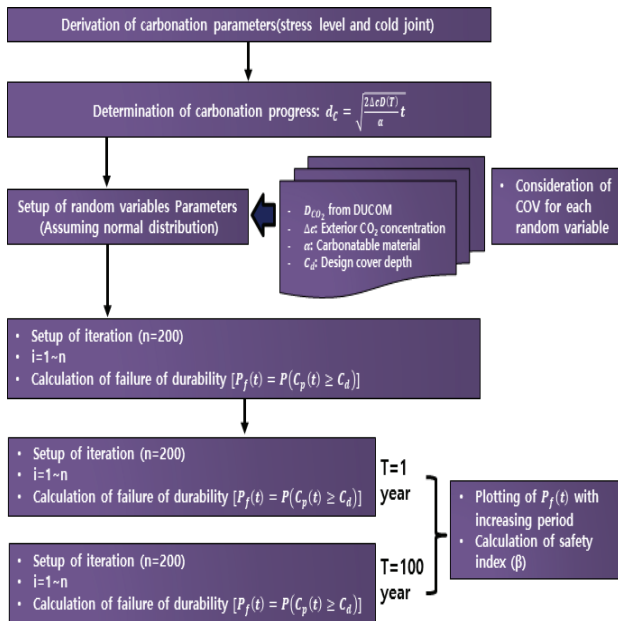


Fig. 2 Design flow for service life in this study

3. 인장 및 압축 응력 수준을 고려한 탄산화에 대한 내구수명 평가

3.1 배합 및 해석 조건

축진 탄산화 실험을 수행한 OPC 콘크리트 배합은 Table 1에 나타내었으며, 이를 기본으로 D_{CO_2} 와 α 를 DUCOM을 통하여 도출하였다. 도심지 환경은 400ppm($\approx 740 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^3$)을 고려하였으며(Ecoseoul, 2013), 일반 RC 교의 상부 슬래브 피복두께인 40mm를 고려하여 내구수명을 평가하였다. 단위 체적내의 이산화탄소 농도(ppmv)를 kg/m^3 로 적용하기 위해서 이상기체 상태방정식을 이용하였는데, 이는 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{ppmv} \cdot \frac{M_{CO_2}}{22.4 \cdot \frac{(273+T)}{273} \cdot \frac{760}{P}} = \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} = \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 10^{-6} \quad (6)$$

여기서 ppm은 ppmv 즉 단위체적에서의 농도를 나타내며, P 는 기압을 나타낸다.

3.2 영향 인자에 따른 내구수명의 변화

3.2.1 영향 인자 변화에 따른 내구수명 변동성 분석

Table 2를 통하여 도출된 탄산화 속도계수와 결정론적 방법에 의한 내구수명은 응력에 노출되지 않은 상태에서 $9.254 \times 10^{-7} \text{ m/s}^{0.5}$ 와 59.2년의 내구수명을 가진 것으로 평가되었다. 배합에 관련된 사항은 평가 전에 결정되었으므로 피복두께에 대해서는 1.25배와 1.5배를, 외부 이산화탄소 농도에 대해서는 1.5배와 2.0배를 고려하여 내구수명의 변동성을 분석하였다. 또한 품질관리 및 환경변수의 변동성 영향을 평가하기 위해 4개의 확률변수의 변동계수(COV)를 1.5배 및 2.0배 증가

Table 1 Mix proportions for this study(Cho et al., 2018)

	G _{max} (mm)	S/a (%)	W/C (%)	Unit weight(kg/m ³)			
				W	C	Fine Agg.	Coarse Agg.
OPC	25	41.4	60	180	300	732	1056

W : Water, C : Cement

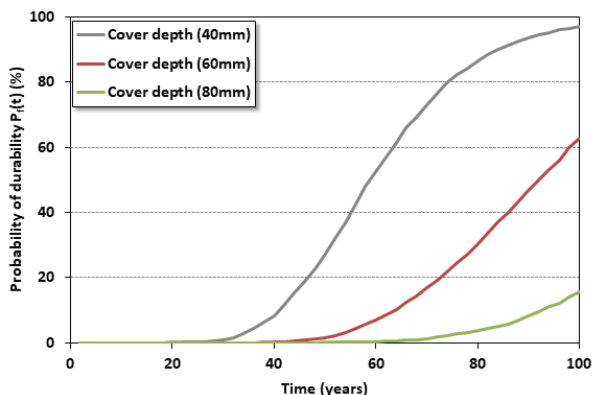
Table 2 Analysis conditions for service life with design parameters (Normal distribution)

Type	D_{CO_2} ($\times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{sec}$)	α (kg/m^3)	Δc ($\times 10^{-6} \text{ kg/m}^3$)	Cover depth (mm)
Mean, OPC	N(6.21, 0.1)	N(107.8, 0.1)	N(740, 0.1)	N(40, 0.1)

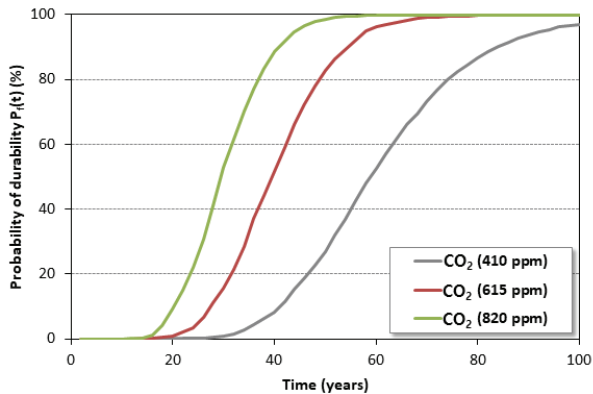
시키면서 내구수명 변화를 분석하였다.

3.2.2 평균값의 변화에 따른 내구수명 변화(변동계수 일정 조건)

피복두께의 증가는 가장 확실한 내구수명 연장 기재이지만 (CEB, 1997), 경제적인 문제를 야기하고 시공성과 재료적인 균열 문제를 야기할 수 있으므로 이에 대해서는 신중하게 평가해야 한다. 피복두께가 1.25배, 1.5배 증가함에 따라 내구수



(a) Increasing of cover depth



(b) Increasing of CO₂ concentration

Fig. 3 Probability of durability failure with changes of cover depth and CO₂ concentration

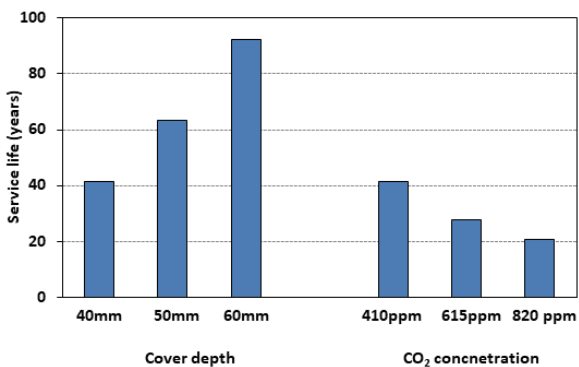
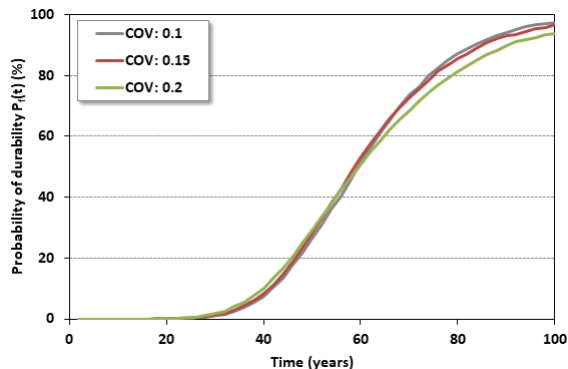
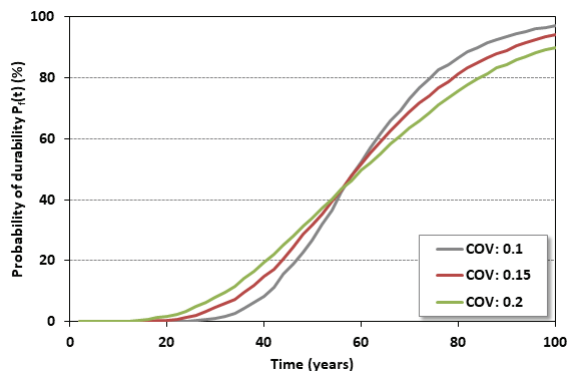


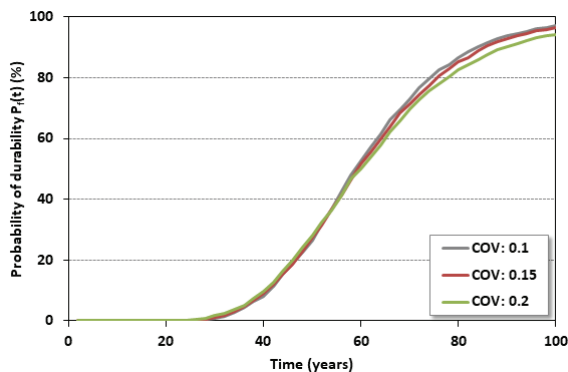
Fig. 4 Service life variation with changes of cover depth and CO₂ concentration



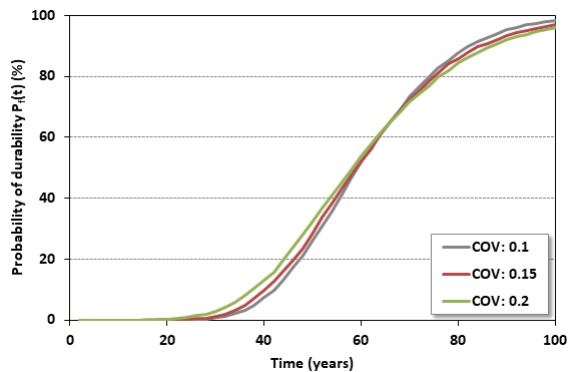
(a) CO₂ diffusion coefficient



(b) Cover depth



(c) CO₂ concentration



(d) Carbonatable material

Fig. 5 $P_f(t)$ variation with increasing COV

명은 153%, 224% 수준으로 증가하였다. 20년 전까지만 해도 300~400 ppm 수준의 도심지 CO₂ 농도는 일부 구간에서 500~600 ppm 수준으로 증가하고 있다(Ecoseoul, 2013). 410ppm에서 615ppm, 820ppm으로 증가함에 따라 내구수명은 67%, 50% 수준으로 감소하였다. Fig.3에서는 피복두께와 CO₂ 농도 변화에 따른 $P_f(t)$ 를 나타내고 있으며, 이와 관련된 내구수명 변화를 Fig. 4에 정리하였다.

3.2.3 변동계수의 변화에 따른 내구수명의 변화

본 절에서는 Table 2의 조건을 기준으로 각 확률변수의 변동계수를 0.10에서 0.20, 0.30 으로 증가시키면서 $P_f(t)$ 와 내구수명의 변화를 분석하도록 하였다. Fig. 5에서는 $P_f(t)$ 의 변화를 도시하였으며, 이와 관련된 내구수명의 변화는 Fig. 6에 나타내었다.

CO₂ 확산계수의 변동성이 커질수록 내구수명은 조금씩 감소하였는데, COV가 0.10에서 0.20으로 증가할 때 내구수명은 39년으로 94.4% 수준으로 감소하였다. 그러나 피복두께의 경우 COV의 증가에 따라 내구수명이 31.8년으로 감소하였으며, 이는 77.0% 수준이다. 특히 피복두께의 시공오차는 내구수명 변화에 가장 큰 영향을 준다고 할 수 있다.

외부 인자인 이산화탄소의 변동성이 0.20로 증가할 때, 내구수명은 97.3% 수준(40.2년)으로 약간 감소하였으며, 반응성 수화물 변동성이 0.20으로 증가할 때, 내구수명은 37.6년으로 91.0% 수준으로 감소하였다. 이는 확산계수의 변동성보다 내부 반응성 수화물, 즉 수산화칼슘의 생성이 더욱 크게 내구수명에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 피복두께의 관리와 적절한 양생을 통한 콘크리트의 품질관리가 중요함을 알 수 있다.

3.2.4 응력 수준에 따른 내구수명의 변화

본 절에서는 기존 연구를 통하여 도출된 인장 및 압축응력을

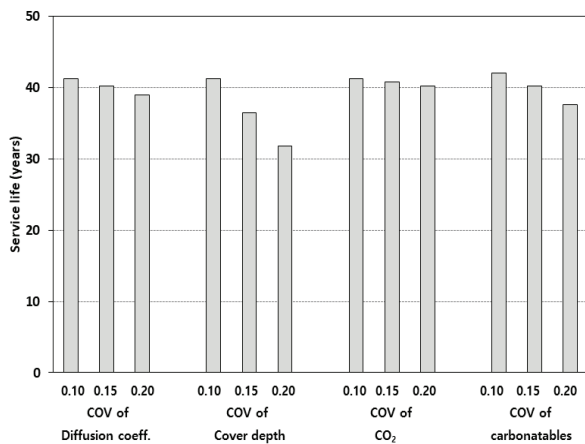


Fig. 6 Service life variation with different COV

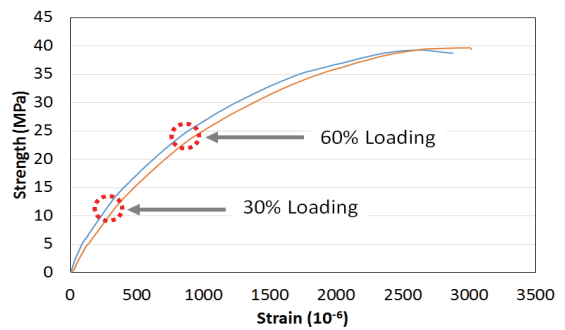
받는 조건에서의 탄산화 깊이 변화율을 고려하여 이와 관련된 확률론적 내구수명을 분석하도록 한다. 기존의 실험 (Hwang et al., 2019; Koh et al., 2019)에서는 인장 및 압축 파괴하중의 30% 및 60%로 하중을 고정하여 축진 탄산화 실험을 수행하였다. 정확히 목표하중을 재하하는 것은 어려운 일이므로 시편의 압축 및 인장강도와 응력-변형률 그래프를 통해 파괴하중의 30%, 60%±5%에 해당하는 오차 기준을 적용하였다. 인장 시편에 대해서는 실린더 시편을, 압축 시편에 대해서는 몰드형 시편을 사용하였으며, 해당 하중을 인가한 후, 제작된 프레임을 결속하여 하중을 유지하였다. 콘크리트 시편 및 프레임에 스트레인 게이지를 부착하여 하중 인가에 따른 변형률을 관측하였다. 하중 제하(unloading)시 슬립이 일부 발생하였으나 이후 변형률에 큰 차이는 발생하지 않았다.

Fig.7에서는 하중 재하사진, 응력-변형률 관계, 재하 후 12시간 동안 강재 프레임의 변형률 변화를 나타내고 있다.

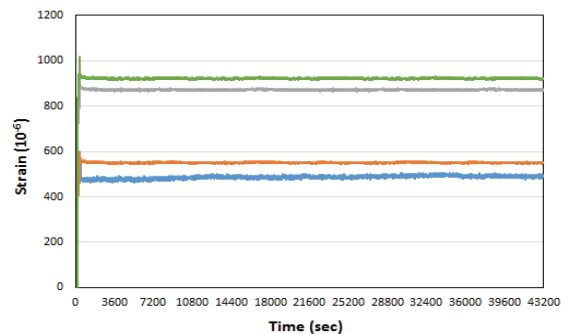
위와 같은 기존의 연구에서 도출된 인장 및 압축응력이 탄



(a) Photos of inducing loads



(b) Stress-Strain curve for this study



(c) Strain variation after inducing loading for 12 hours

Fig.7 Summary of test procedures (Hwang et al., 2019)

산화에 미치는 영향은 식(7)과 같이 나타낼 수 있다(Hwang et al., 2019; Koh et al., 2019).

$$A_C = 0.9444 C_1^2 - 0.4833 C_1 + 1$$

under compressive region (6a)

$$A_T = 0.4333 T_1 + 1$$

under tensile region (6b)

여기서 C_1 및 T_1 은 파괴응력에 대한 압축 및 인장응력비(%)를 나타낸다.

결정론적인 방법을 통한 수명예측에서는 압축응력이 증가할수록 59.2년에서 66.8년으로 증가한 뒤(30% 재하 시) 이후 53.4년으로(60% 재하 시) 감소하게 된다. 또한 인장부에서는 지속적으로 탄산화 깊이가 증가하므로 30% 재하 시 47.2년, 60% 재하 시 37.9년으로 감소하게 된다.

탄산화 깊이 변화율을 고려하여 $P_f(t)$ 를 고려하면 인장부 및 압축부의 확률론적인 내구수명을 도출하여 결정론적인 방

법과 비교할 수 있다. 확률론적인 방법을 사용했을 경우 동일한 경향을 가지지만 압축영역에서는 압축영역에서 46.5년으로 증가하다가 37.8년 수준으로 감소하였으며, 인장영역에서는 60% 하중 도입 시 26.3년으로 감소하였다. Fig. 8에서는 조건에 따른 $P_f(t)$ 의 변화와 이와 관련된 내구수명을 도시하였다. 확률론적인 방법의 경우 10%의 낮은 목표내구확률을 설정하고 있고, 결정론적 방법에서는 재료감소계수 및 환경계수 등을 사용하지 않았다. 즉 결정론적 방법에서는 파괴확률 50%를 가정한 것이므로 두 방법간의 차이가 크게 발생하였다. 적절한 신뢰도 지수를 고려하여 환경계수 및 감소계수를 고려하면 비슷한 수준의 내구수명을 설정할 수 있다.

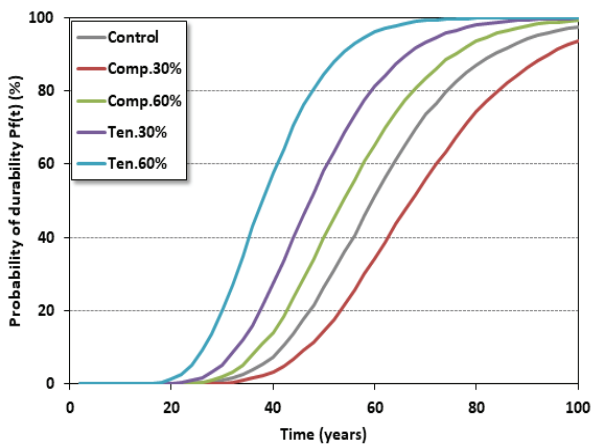
두 가지 방법에서의 차이는 응력조건에 따라 11.6년에서 20.3년으로 차이가 발생하였는데, 압축부 30% 조건에서 확률론적 방법이 가장 보수적으로 평가되었다.

콜드조인트는 단면의 국부적인 상태이므로 이를 응력과 연결지어 전체 구조물 또는 부재의 내구수명을 정의할 수는 없다. 또한 균열부 또는 콜드조인트와 같은 결함부를 피복두께나 배합특성의 확률 변수로 합쳐서 정의하기도 어려운 상태인데, 이는 현재 국내 설계기준에서 내구수명에 대한 결정론 또는 확률론적인 설계 방법이 명확하게 제시하지 못하기 때문이다. 본 해석기법의 결과는 내구수명의 정의보다는 유지관리 우선 순위 또는 전체 보수비 산정 등을 위한 자료로 사용되는 것이 바람직하다.

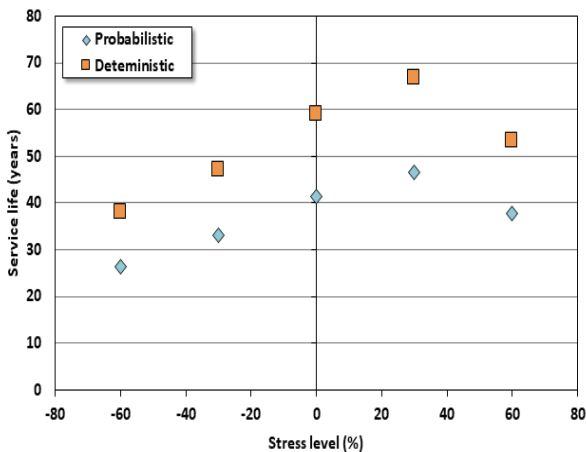
4. 결론

본 연구에서는 기존의 실험결과를 이용하여 응력에 따른 탄산화 속도계수식을 도출하였으며, 이에 따른 내구적 파괴 확률과 이와 관련된 내구수명을 평가하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 하중이 없는 초기 조건과 40mm의 피복두께를 가정하였을 때, 41.3년의 내구수명을 나타내었으나, 피복두께가 125%, 150% 증가함에 따라 내구수명은 153%, 224% 수준으로 증가하였다. 또한 외부의 CO₂ 농도가 150%, 200% 증가함에 따라 내구수명은 67%, 50% 수준으로 감소하였다. 내구적 파괴확률 및 내구수명의 변동에 대해서는 피복두께 평균의 변화가 가장 큰 영향을 미치고 있다.
- 2) CO₂ 확산계수, 피복두께, 이산화탄소 농도, 반응성 수화물의 변동계수를 0.10에서 0.20으로 증가시킬 경우, 확산계수의 경우 94.4%로, 피복두께의 경우 77.0% 수준으로, 이산화탄소의 경우, 97.3% 수준으로, 반응성 수화물의 경우 91.0% 수준으로 내구수명이 감소하였다. 이는



(a) $P_f(t)$ variation with period



(b) Service life with stress level (+: compressive, -: Tensile)

Fig.8 Service life variation with different stress levels

콘크리트 품질관리를 통한 수화물 및 정확한 시공에 따른 피복두께가 내구수명에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

- 3) 내구수명 변화는 확률론적인 방법을 사용했을 경우 결정론적인 방법과 동일한 경향을 가지며, 확률론적인 방법의 경우 압축영역에서는 압축영역에서 46.5년으로 증가하다가 37.8년 수준으로 감소하였다. 또한 인장영역에서는 60% 하중 도입 시 26.3년으로 감소하였다. 합리적인 내구수명을 평가하기 위해서는 적절한 환경계수 및 감소계수가 결정론적 방법에 필요하며, 응력효과를 고려한 탄산화 진행이 필요함을 알 수 있다.

감사의 글

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

References

1. Banthia, N., Biparva, A., and Mindess, S. (2005), Permeability of concrete under stress, *Cement and Concrete Research*, 35(9), 1651-1655.
2. Bae, Y. W., and Lim, N. G. (2012), Resistance of chloride penetration of fiber reinforced concrete under loading condition, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 28, 2867-2874.
3. CEB. (1997), New Approach to Durability Design, 96-102.
4. Choinska, M., Khelidj, A., Chatzigeorgiou, G., and Pijaudier-Cabot, G. (2007), Effects and interactions of temperature and stress-level related damage on permeability of concrete, *Cement and Concrete Research*, 37(1), 79-88.
5. Cho, S. J., Yoon, Y. S., and 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.
6. Defaux, G., Pendola, M., and Sudret, B. (2006), Using spatial reliability in the probabilistic study of concrete structures: The example of a reinforced concrete beam subjected to carbonation inducing corrosion, *Journal de Physique IV*, 136(1), 243-253.
7. Duprat, F. and Sellier, A. (2006), Probabilistic approach to corrosion risk due to carbonation via an adaptive response surface method, *Probabilistic Engineering Mechanics*, 21(3), 207-216.
8. EN-1991. (2000), Eurocode 1: Basis of Design and Actions on Structures, European Committee for Standardization(Comité Européen de Normalisation, CEN).
9. Ecoseoul. (2013), Map of CO2 concentrations in Seoul. Available at: http://www.ecoseoul.or.kr/xe/?document_srl=1893070.
10. Hwang, S. H., Yoon, Y. S., and 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.
11. Izumi, I., Kita, D., and Maeda, H. (1986), Carbonation, Kibo press Publication, Tokyo, 35-88.
12. Ishida, T., and Maekawa, K. (2000), Modeling of PH profile in pore water based on mass transport and chemical equilibrium theory, *Doboku Gakkai Ronbunshu*, 2000(648), 203-215.
13. Koh, T.-H., Kim, M.-K., Yang, K.-H., Yoon, Y.-S., and Kwon, S.-J. (2019), Service Life Evaluation of RC T-girder under Carbonation Considering Cold joint and Loading Effects, *Construction and Building Materials*, 229, 106-116.
14. Kwon, S. J., Song, H. W., Byun, K. J., and Lee, S. H. (2004), Analysis of Carbonation Behavior of Cracked Concrete in Early - Age, *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, 24(5A), 1011-1022.
15. Kwon, S. J., Park, S. S., Nam, S. H., and Cho, H. J. (2007), A Study on Survey of Carbonation for Sound, Cracked, and Joint Concrete in RC Column in Metropolitan City, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 11(3), 116-122.
16. Kwon, S. J., and Na, U. J. (2011), Prediction of Durability for RC Columns with Crack and Joint under Carbonation Based on Probabilistic Approach, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 5(1), 11-18.
17. KCI. (2012), Concrete Specification- Durability Part, Korea Concrete Institute, Seoul, 637-672.
18. Kwon, S. J., Lee, B. J., and Kim, Y. Y. (2014), Concrete mix design for service life of RC structures under carbonation using genetic algorithm, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014, 1-13.
19. Lee, J., Lee, B. C., Cho, Y. K., Park, K. M., and Jung, S. H. (2017), Carbonation Properties of Recycled Aggregate Concrete by Specified Concrete Strength, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 5(1), 85-93.
20. Maekawa, K., Ishida, T., and Kishi, T. (2008), Multi-Scale Modeling of Structural Concrete, Taylor & Francis, Florida, 86-105.
21. Na, U. J., Kwon, S. J., Chaudhuri, S. R., and Shinozuka, M. (2012), Stochastic Model for Service Life Prediction of RC Structures Exposed to Carbonation using Random Field Simulation, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 16(1), 133-143.
22. Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., and Fardis, M. N. (1991), Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete, *Materials Journal*, 88(2), 186-196.
23. Song, H. W., and Kwon, S. J. (2007), Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure, *Cement and Concrete Research*, 37(6), 909-915.
24. Tegguer, A. D., Bonnet, S., Khelidj, A., and Baroghel-Bouny, V. (2013), Effect of uniaxial compressive loading on gas permeability and chloride diffusion coefficient of concrete and their relationship, *Cement and Concrete Research*, 52, 131-139.
25. Yang, K. H., Song, J. K., and Song, K. I. (2013), Assessment of CO2 reduction of alkali-activated concrete, *Journal of Cleaner Production*, 39, 265-272.
26. Yang, H. M., Lee, H. S., Yang, K. H., Ismail, M. A., and Kwon, S. J. (2018), Time and cold joint effect on chloride diffusion in

concrete containing GGBFS under various loading conditions, *Construction and Building Materials*, 167, 739-748.

27. Yang, K. H., Mun, J. H., Yoon, Y. S., and Kwon, S. J. (2018), Effects of loading conditions and cold joint on service life against chloride ingress, *Computers and Concrete*, 22(3), 319-326.

Received : 06/19/2019

Revised : 08/20/2019

Accepted : 09/05/2019

요 지 : 이산화탄소 농도가 높은 도심지의 경우 탄산화로 인한 철근부식이 발생하기 쉬우며 이는 콘크리트 구조물의 내구수명을 감소시킨다. 콘크리트 구조물의 경우 다양한 구속조건을 가지며 항상 외부의 재하하중을 받고 있다. 도입된 응력수준은 이산화탄소와 같은 유해인자의 확산을 변화시키며 탄산화 깊이의 변동성을 야기한다. 본 연구에서는 응력재하수준에 따른 탄산화 변동성을 정량화하였으며, 이를 이용하여 탄산화 예측식을 도출하였다. 내구성 설계인자인 피복두께, 이산화탄소 확산계수, 탄산화 반응 수화물, 그리고 외부 이산화탄소 농도를 확률 변수로 정의하였으며, MCS를 통하여 영향인자의 변동성에 따른 내구수명을 도출하였다. 또한 응력수준에 따라 변화하는 내구수명을 도출하였으며, 이를 결정론적인 방법의 결과와 비교하였다. 피복두께 및 내부 수화물 생성이 내구수명 변동성에 가장 큰 영향을 미쳤으며, 응력수준을 고려한 내구수명평가는 유지관리 우선순위 설정에 합리적으로 적용할 수 있다.

핵심용어 : 탄산화, 내구수명, 확률론적 방법, 설계인자
