

초기 염화물량의 증가와 배합 및 설계 변수 특성을 고려한 콘크리트 내구수명의 변동성 Service Life Variation Considering Increasing Initial Chloride Content and Characteristics of Mix Proportions and Design Parameters

박선경¹ · 권성준^{2*}Sun-Kyung Park¹ · Seung-Jun Kwon^{2*}

(Received May 18, 2021 / Revised August 5, 2021 / Accepted September 13, 2021)

It is very important for structure designer to understand the service life variation since a wide range of service life is evaluated with changing exposure conditions and design parameters. Recently, for zero-carbon, waste plastic has been used for fuel for clinker production and this yields increase in chloride content in cement. This study is for evaluation of changing service life in the concrete with increasing initial chloride content due to usage of plastic-SRF(Solid Refuse Fuel) considering various exposure conditions and design parameters. For this, 4 levels of initial chloride content were assumed, and the service life was assessed using LIFE 365 program considering various environmental conditions including 3 levels of surface chloride content. As for analysis parameters, critical/initial chloride content, blast furnace slag powder replacement ratio, W/B(Water to Binder) ratio, cover depth, and unit mass for binder are adopted. Service life decreases with increasing initial chloride content and a significant reduction of service life is not evaluated permitting up to 1,000ppm of initial chloride content. With increasing slag replacement ratio, a longer service life can be secured since blast furnace slag powder has the effect of reducing the diffusion of external chloride ions and fixing the free chloride. It is thought that increasing initial chloride content up to European standard is helpful for enhancing sustainability and reducing carbon emission. Though the reduction in service life due to an increase in the initial chloride content is not significant in slag-concrete with low surface chloride content, careful consideration for mixing design should be paid for the exposure environment with high surface chloride content.

키워드 : 탄소 중립, 내구수명, 고로슬래그 미분말, 초기 염화물량, 혼소재

Keywords : Zero-carbon, Service life, Blast furnace slag powder, Initial chloride content, SRF(Solid Refuse Fuel)

1. 서론

염화물 이온이 철근 부식에 미치는 영향과 이에 따른 염해 저항성에 대한 연구는 지속적으로 수행되고 있다. 염화물 이온은 초기 재령 콘크리트에서 수화열 증가, 모세관 공극의 감소에 따른 건조 수축 증가에 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 또한 경화 후에는 동결융해 저항성의 감소가 보고되고 있으나, 콘크리트 내부의 철근 부식을 촉진시키는 것이 성능 저하의 가장 큰 원인이다(Song et al. 2001; Park et al. 2011; Cao et al. 2019; Broomfield 1997; Yoon et al. 2018).

많은 연구들이 염화물 이온의 침투 및 확산, 그리고 철근 부식에 대하여 다루고 있으며(Zhou 2014; Yang et al. 2019), 각국에서는 목표 내구수명을 만족하는 내구성 설계를 유도하여 설계식을 제안하고 있다(JSCE 2007a; JSCE 2007b; CEN 2004). 국내에서는 일본의 성능 평가형 설계 방법을 사용하고 있는데, Fick's 2nd 방정식과 지역에 따른 외부 염화물량을 고려하고 있다(KCI 2021).

장기적으로는 공학적인 불확실성을 고려한 확률론적 설계 방법이 요구되지만 현 수준에서는 주로 결정론적 설계 방법이 사용되고 있다. 결정론적 설계 방법은 목표 내구수명동안 외부로부터 유입된 염화물 이온이 철근 부식을 야기하는 임계 염화물량보다 높지 않도록

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

¹한남대학교 건설시스템공학과 석사과정 (Department of Civil and Environment Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea)

²한남대학교 건설시스템공학과 교수 (Department of Civil and Environment Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea)

록 유도하는 방법이다(Sudret et al. 2005; Kwon et al. 2009). 중요한 설계인자 중 하나인 임계 염화물은 부식을 야기하는 허용 가능한 염화물량으로 노출 환경, 포화도, 양이온과 평형 조건을 가지는 pH, 사용재료 등 많은 영향인자를 가지고 있다(Ann and Song 2007; Angst et al. 2009). 미국과 국내의 경우 1.2kg/m³의 일정한 값을 사용하다가 최근 들어 단위 결합재 질량의 0.4% 수준으로 설정하고 있다(KCI 2021). 또한 일본의 경우 결합재의 종류 및 물-결합재 비의 특성을 고려하여 총량이 아닌 중량의 개념으로 정량화하여 임계 염화물식을 제안하고 있다(Noguchi et al. 2016).

최근 들어 탄소 중립에 대한 중요성이 크게 증가하면서(KICET 2020; CEMBUREAU 2020) 클링커 제조 시 혼소재(SRF: Solid Refuse Fuel)의 사용이 적극적으로 고려되고 있다. 여기서, 혼소재란 고체폐기물 중 발열량이 4,000kcal/kg 이상인 폐합성수지류 등의 가연성 물질을 연료화한 고체연료를 말한다. 폐필름류 및 플라스틱 제품은 5,000~10,000kcal/kg 수준의 높은 발열량을 가지고 있으므로 좋은 연료가 될 수 있지만, 출하 시멘트의 염화물 함유량을 증가시킬 수 있다. 이는 킬른 내부에서 SRF 내 염소 화합물 등으로부터 염화물 이온이 비산되어 클링커로 혼입하여 발생한다. 따라서 시멘트 소성 시 내부로 유입되는 고온의 염화물 이온에 대한 처리가 요구된다. 내부로 유입된 염화물은 시멘트에 고정화 염으로 존재하게 되며, 이러한 염분은 탄산화 또는 산에 의한 열화에 따라 해리되어 자유 염화물로 존재할 수 있다. 이미 일본에서는 폐플라스틱이 혼소될 경우의 염화물량을 분석하였는데(JCI 2018), 시멘트 소성 공정에서 염화물량이 적게 발생하도록 염소 함량이 적은 혼소재를 선별 작업을 통하여 연료로 활용할 경우 탄소 중립 및 에너지 저감에 효과적일 수 있음을 시사하였다. 또한 유럽시멘트협회(CEMBUREAU)에서도 내구성 향상 뿐 아니라 탄소 중립을 위해서도 고로슬래그 시멘트 또는 이를 활용한 콘크리트에 집중하고 있다(CEMBUREAU 2020). 고로슬래그 미분말의 경우, 수십 년을 거쳐서 장기강도 증진, 화학적 저항성 개선 등이 보고되었다(Jau and Tsay 1998; Kouloumbi et al. 1994). 고로슬래그 미분말은 구체 공극 구조의 개선으로 외부 염화물 이온의 확산 저감에 효과적이면서도 다른 결합재에 비하여 염화물 구속능이 크므로, 자유 염화물을 많이 고정시킬 수 있는 장점이 있다(Erdem and K i rca 2008).

본 연구에서는 국내외의 시방 사항을 참고하여 염해 내구수명 해석을 수행하였으며 폐플라스틱과 같은 혼소재의 활용 등으로 증가하는 초기 염화물량을 고려하여 내구수명 변동성을 분석하였다. 또한 다양한 설계인자에 따라 개략적으로 변화하는 내구수명의 분포를 평가 및 정량화하였다.

2. 초기 염화물 및 임계 염화물량의 변동성

2.1 초기 염화물의 유입 경로 분석

일반적으로 2000년대까지 초기 염화물은 해사의 사용과 염화물 기반 혼화제가 주된 초기 염화물의 혼입 과정이었다. 해사의 경우 세척을 통하여 품질관리를 할 수 있으며, 화학적 혼화제의 경우 염화물량을 환산하여 평가할 수 있다. 클링커 소성 시 혼입되는 혼소재에서 야기되는 염화물 이온에 대한 분석은 최근에 수행되었다(JCI 2018; Tomosawa 2018). 기존의 연구에서 페플라스트릭과 산업부산물을 사용한 경우, 시멘트 평균 1ton 당 페플라스트릭 사용량은 311kg 정도이며, 클링커를 기반으로 76.5ppm 수준의 염화물 함유량을 나타내었다. 또한 슬러지를 클링커용 원료로 사용하는 경우와 폐유 및 폐플라스트릭을 소성 연료로서 사용할 경우를 모두 고려할 때 염화물 증가량은 157.7ppm 수준으로 보고되었다(JCI 2018). 기존의 문헌 분석 시 단위 시멘트량을 550kg/m³, 해사는 잔골재 중 65%를 사용하고 평균 염화물량을 0.014%로 고려할 경우, 초기 염화물량은 시멘트 질량 대비 350~400ppm 수준으로 고려되었다. 2003년 이후 시멘트 내 200ppm 수준이 350ppm으로 약간 완화되었으나, 이 역시 시멘트 사용량을 고려하면 매우 엄격한 수준이다(JCI 2018).

현재 국내에서는 시멘트 내에 포함된 염화물량에 대하여 명확한 기준은 없으나, 일본의 기준인 350ppm을 준용하고 있다. 각각의 콘크리트 내의 염화물 이온의 허용량을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Allowable maximum initial chloride content of concrete

Type	Korea	Japan	China	USA	EU	Australia
i	0.3 kg/m ³	0.3 kg/m ³	binder × 0.3%	binder × 0.3% (wet) binder × 1.0% (dry)	binder × 0.2% (wet) binder × 0.3% (dry)	binder × 0.2~0.4 %
ii	0.3 kg/m ³	0.3 kg/m ³	binder × 0.3%	binder × 0.06%	binder × 0.1%	binder × 0.1%
iii	-	350ppm	600ppm	-	1,000ppm	
iv	Constant to unit concrete volume	Constant to unit concrete volume	Proportional to mass (hardened conc)	Proportional to mass (hardened conc)	Proportional to mass (hardened conc)	Proportional to mass (hardened conc)

i: Standard of general reinforced concrete

ii: Standard of prestressed concrete

iii: Cement chloride standard

iv: Chloride content control

2.2 임계 염화물에 따른 철근부식 개시

전술한 바와 같이 콘크리트 내 강재의 부식 발생 임계 농도 영향 인자는 콘크리트의 특성으로서, 염화물 이온의 구속도, 세공 용액의 pH, 콘크리트의 확산 저항성, 비저항, 물-결합재 비, 결합재 종류 등이다. 외부 환경요인으로는 온도, 습도, 하중 조건, 실외 노출 여부, 산소 가용성 등이 영향을 미친다. 연구자별 임계 염화물 농도 범위 조사 결과 값이 다양하게 분포된 것 또한 이러한 이유에 근거하며, 각국의 염분 허용기준이 다른 요인이기도 하다 (Cao et al. 2019).

기존의 국내의 기준에서는 보통 1.2kg/m³의 임계 염화물량을 고려하였으나, 최근 국내에서는 결합재 질량비로 개선되었으며, 일본 건축학회에서는 단위 결합재량 및 종류를 고려하여 물-결합재 비의 함수로 설정하였다(Noguchi et al. 2016). 이에 따라 플라이애시나 고로슬래그 미분말을 사용한 경우, 내구수명이 과도하게 증가하는 것을 방지하고 현실적인 결과를 제공할 수 있다. Fig. 1에서는 각 연구자가 제안한 임계 염화물량의 범위를 도식화하였다.

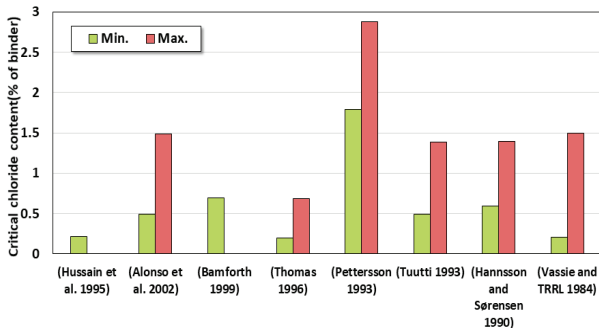


Fig. 1. Summary of previous results on critical chloride content

3. 초기 및 임계 염화물을 고려한 내구수명 평가

3.1 겉보기 확산계수를 이용한 염화물 해석

본 연구에서는 유한 차분법을 기반으로 한 LIFE 365 ver.2를 사용하여 염해에 대한 내구수명 해석을 수행하였다. 본 연구에서 사용한 염해 내구수명 해석 지배 방정식은 Fick's 2nd law의 해이며 이를 아래의 식 (1)에 나타내었다.

$$C_d - C_i = (C_s - C_i) \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_d t}} \right) \right\} \quad (1)$$

여기서, C_d 는 위치 x (m), 시간 t (year)에서의 염화물 이온 양

(kg/m³), C_i 는 초기 염화물 이온 양(kg/m³), C_s 는 표면 염화물량(kg/m³), erf 는 오차함수, D_d 는 유효 겉보기 염화물 확산계수(m²/year)를 나타낸다.

위의 지배 방정식을 통해 구조물의 염해 내구수명을 산정하는 경우, 보강재가 매립되어 있는 위치, 즉 피복두께에서의 염화물량이 임계 염화물량에 도달하는 기간을 내구수명으로 산정한다. 해석 변수 중 겉보기 염화물 확산계수는 재령 및 혼화재료의 치환율에 지배적이며, 내구수명에 큰 영향을 미치는 인자이다. 국내 내구성 설계 기준에서는 시간의존적 감소를 고려하기 위해 식 (2)와 (3)에 따라 염화물 확산계수를 산출한다(KCI 2021).

$$D_p = \frac{D_R}{1-m} \left(\frac{t_R}{t} \right)^m \quad (t < 30 \text{ years}) \quad (2)$$

$$D_p = \frac{D_R}{1-m} \left\{ (1-m) + m \frac{t_c}{t} \right\} \left(\frac{t_R}{t_c} \right)^m \quad (t \geq 30 \text{ years}) \quad (3)$$

여기서, D_R 은 기준 시간에서의 염화물 확산계수, t_R 은 기준 시간(28일 ≃ 0.077년), t_c 는 확산계수 감소한계(30년), m 은 혼화재 특성을 고려한 시간의존성지수를 나타낸다.

식 (2) 및 (3)에서 시간의존성지수는 OPC 콘크리트의 경우 0.2의 고정값을, 고로슬래그 미분말 및 플라이애시 치환 혼합 콘크리트의 경우 식 (4)에 의해 도출된다. 본 연구에서 사용한 LIFE 365의 해석 결과 개요를 Fig. 2에 나타내었다.

$$m = 0.2 + 0.4(FA/50 + SG/70) \leq 0.6 \quad (4)$$

여기서, FA 는 플라이애시의 치환율(%), SG 는 고로슬래그 미분말의 치환율(%)을 나타낸다.

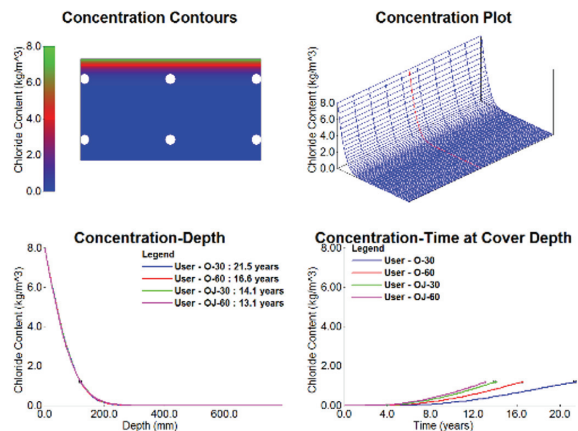


Fig. 2. Prediction results with LIFE 365 program

3.2 설계 기준에 따른 해석 조건

Table 2에 본 연구의 해석 조건을 정리하여 나타내었다. 해석에 사용한 조건은 이후 각 절에서 해석 결과와 함께 추가 설명하도록 한다. 초기 염화물량은 단위 결합재 당 ppm 농도로 고려하였으며, 임계 염화물량은 개정 전/후의 국내 및 일본의 설계 기준에 따라 설정하여 Table 2에 정리하였다. 고로슬래그 미분말의 혼입율은 내구수명에 미치는 영향을 평가하고자 3 수준으로 고려하였는데, 일반적인 슬래그 시멘트의 슬래그 혼입비율을 포함하였다. 본 연구는 혼소재의 사용으로 인한 초기 염화물량을 고려하고 다양한 설계인자에 따른 내구수명의 변동성을 고찰하는 것이 목적이므로 국내 내구성 설계 기준에 제시된 환경계수와 내구성 감소계수(KCI 2021)를 고려하지 않고 내구수명 해석을 수행하였다.

Table 2. Analysis conditions of service life for chloride attack

Initial chloride content (ppm)	0		
	300		
	700		
	1,000		
Cover depth (mm)	50		
	60		
	70		
Surface chloride content (kg/m ³)	5 (West coast and South coast rainfall areas)		
	13 (East coast tidal zone and spray areas)		
	18 (West coast and South coast tidal zone)		
	50		
W/B ratio	0.3		
	0.45		
	0.55		
Unit mass for binder (kg/m ³)	300		
	400		
	500		
Blast furnace slag powder replacement ratio(%)	0		
	30		
	50		
Critical chloride content	i	1.2kg/m ³	
	ii	0.4%	
	iii	OPC mix	$C_{im}=-3.0(W/B)+3.4$
		GGBFS mix	$C_{im}=-2.6(W/B)+3.1$

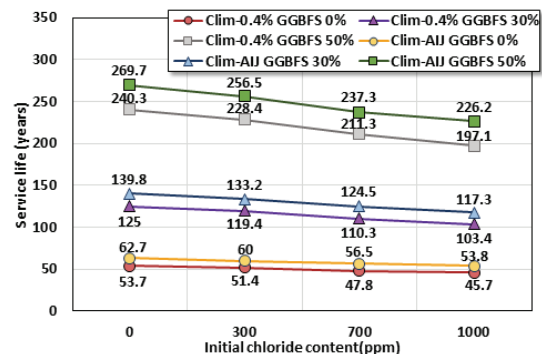
- i: Standard for domestic concrete specification before revision (Ministry of Land, Infrastructure and Transport 2009)
- ii: Revised standard for domestic concrete specification(KCI 2004)
- iii: Standard for Japanese concrete specification (Architectural Institute of Japan 2016)

3.3 배합 및 노출 환경에 따른 내구수명의 평가

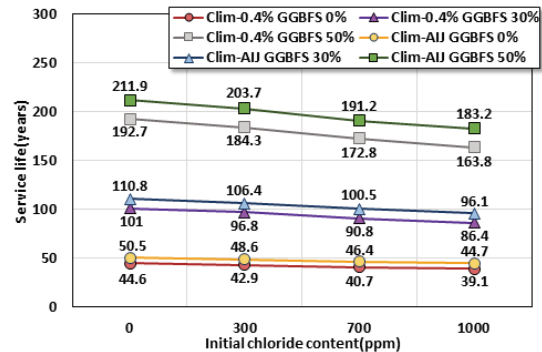
3.3.1 표면 염화물량이 높은 경우(13.0~18.0kg/m³)

본 절에서는 대표적으로 피복두께와 표면 염화물이 변화하는 조건에 대한 내구수명 변화를 분석하였다. 표면 염화물 함유 수준이 높은 매우 엄격한 염해 환경 조건인 표면 염화물량이 13.0kg/m³과 18.0kg/m³인 경우를 고려하였으며, 피복두께 80mm, 단위 결합재량 500kg/m³인 조건에서의 결과 값을 비교하여 Fig. 3에 제시하였다.

표면 염화물량이 증가할수록 내구수명은 선형적으로 감소하였다. 초기 염화물량 0ppm에서 1,000ppm으로 증가하는 조건에서 내구수명은 AIJ(Architectural Institute of Japan) 기준 슬래그 혼입량 30% 및 50% 경우 모두 16% 정도 감소하였다. 현재 우리나라에서 준용하고 있는 임계 염화물량(단위 결합재량의 0.4%, kg/m³)은 각 경우에 AIJ 기준보다 15~20년 정도 내구수명을 낮게 평가하여 매우 보수적인 결과로 나타난다. 고로슬래그 미분말 사용 시, 1,000ppm인 조건이더라도 일본 기준식에서는 269.7년, 국내 기준식에서는 197.1년으로 평가되었다.



(a) Surface chloride content: 13.0kg/m³



(b) Surface chloride content: 18.0kg/m³

Fig. 3. Analysis results of service life considering high levels of surface chloride content

표면 염화물이 18.0kg/m³인 경우에는 슬래그 30% 및 50% 혼입 경우, AIJ 기준으로 110.8년에서 96.1년으로, 211.9년에서 183.2년으로 감소하였다. 감소폭은 1,000ppm을 적용하더라도 14.7년과 28.7년 수준으로, 큰 차이는 발생하지 않았다.

3.3.2 표면 염화물량이 낮은 경우(5.0~13.0kg/m³)

표면 염화물량 5.0~13.0kg/m³ 범위 중 피복두께는 60mm, 물-결합재 비가 0.45, 단위 결합재량이 400kg/m³인 경우를 선정하여 평가한 내구수명 해석 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

표면 염화물량이 5.0kg/m³인 경우는 해수에 직접적인 영향을 받지 않는 경우로, AIJ 기준으로 평가했을 시 내구수명은 슬래그 50% 치환 시 155.6년에서 112.3년으로, 슬래그 30% 치환 혼입 콘크리트에서 82.5년에서 60.8년으로 감소하였다. 피복두께 60mm, 물-결합재 비 0.45의 조건에서는 1,000ppm을 가정해도 내구수명 100년을 합리적으로 확보할 수 있다. 슬래그를 혼입하지 않은 경우 및 고정된 임계 염화물(단위 결합재량의 0.4%)을 사용한 경우 가장 낮은 내구수명을 나타내었다.

표면 염화물량이 13.0kg/m³인 경우는 AIJ 기준을 적용했을 경우, 초기 염화물량이 증가함에 따라 슬래그 50% 혼입 시 7.9년, 30% 혼입 시 2.6년의 감소폭을 나타내었다. AIJ 기준으로 슬래그를 50% 사용 시 초기 염화물량이 1,000ppm으로 증가함에 따라 내구수명은 57.4년에서 49.5년으로 감소하였으며, 30% 사용 시 32.8년에서 30.2년으로 감소하였다. 초기 염화물량을 낮은 수준인 300ppm으로 고려하면 이러한 차이는 더욱 감소하게 된다. 현재 국내에서 적용하고 있는 일본의 시멘트 염화물량 기준(350ppm)을 일부 상향시키는 것도 페플라스틱 활용과 같은 자원순환을 고려할 경우 시도해볼 수 있는 방안으로 판단된다. 그러나 표면 염화물량이 과도하게 높거나 피복두께가 낮은 경우에는 배합 선정 시 신중한 조사가 필요하다.

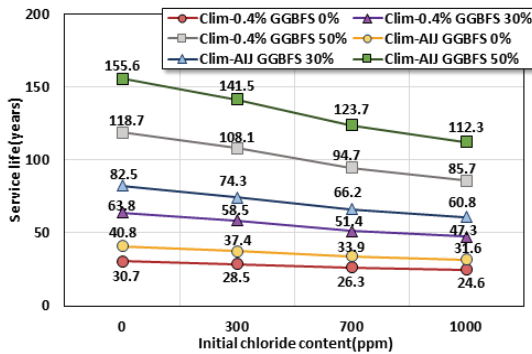
4. 초기 및 임계 염화물 변화에 따른 내구수명 정량화

4.1 정량화 개요

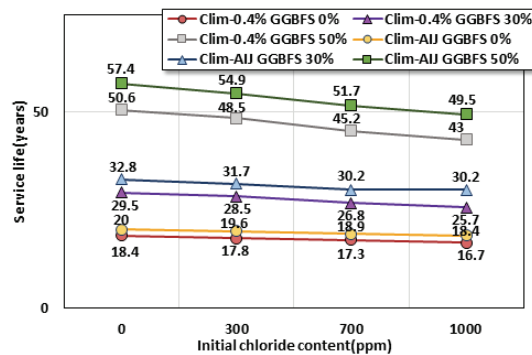
다양한 표면 및 임계 염화물량을 고려하여 내구수명의 변동성을 정량화하는 것은 어려운 일이다. 본 연구에서는 표면염화물량을 5, 13, 18kg/m³으로 분류하고 각 조건에 맞는 내구수명의 변동성을 정규분포로 가정하여 확률분포곡선을 도출하였다. 해석 결과를 분석하면 형태학적으로 정규분포의 형태를 따르고 있었으며, 변동영향을 시각화하기 위해 정규분포함수를 고려하였다. Fig. 5에서는 대표적으로 피복두께가 70mm, 표면 염화물량이 13kg/m³, 물-결합재 비가 0.45인 경우를 고려하였으며, 초기 염화물량의 증가 및 단위 결합재량의 변화에 따른 내구수명 변동성을 도시하였다. 초기 염화물량이 0ppm인 경우 결합재량의 증가에 따라 내구수명 평균값은 53.8, 56.8, 59.8년을, 표준편차는 17.2, 17.6, 19.1을 나타내었으며, 1,000ppm에서는 47.4, 48.2, 48.8년의 내구수명을, 15.3, 15.0, 15.9의 표준편차 값을 보였다. 결합재량의 변화에 따라 임계 염화물이 변동되지만 초기 염화물량의 증가로 내구수명이 점진적으로 감소되고 있음을 알 수 있다.

4.2 피복두께에 따른 내구수명의 정량화

본 절에서는 내구수명의 변동성을 고려하기 위해 단위 결합재량 300~500kg/m³을 한 가지 수준으로, 세 가지 수준의 임계 염화물량 변화를 하나의 수준으로 설정하여 고정 염화물에 따른 내구수명의 평균 및 변동계수를 피복두께의 증가에 따라 분석하였다.

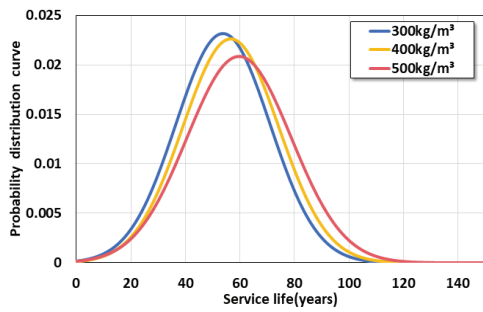


(a) Surface chloride content: 5.0kg/m³

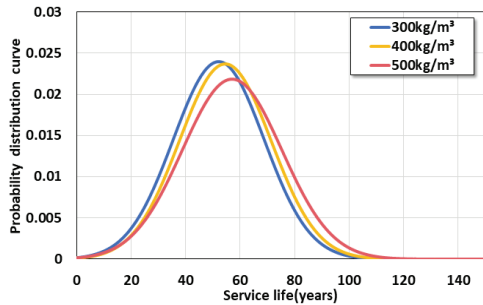


(b) Surface chloride content: 13.0kg/m³

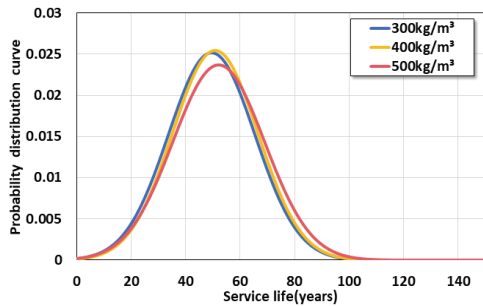
Fig. 4. Analysis results of service life considering low levels of surface chloride content



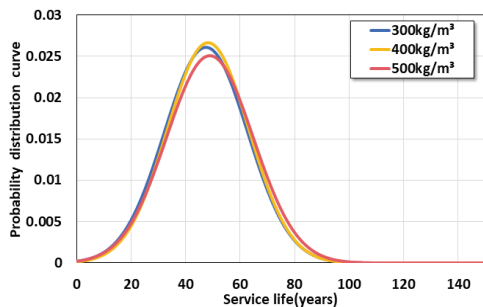
(a) 0ppm



(b) 300ppm



(c) 700ppm



(d) 1,000ppm

Fig. 5. Probabilistic variation of service life with increasing initial chloride content

4.2.1 표면 염화물량이 낮은 경우(5.0kg/m³)

표면 염화물량이 5.0kg/m³인 경우, 3 수준의 물-결합재 비를 고려한 피복두께의 증가에 따른 내구수명의 평균 및 변동계수의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 모든 경우에서 초기 염화물이 증가할 수록 내구수명의 평균값이 감소하는 경향을 보인다. 그러나 슬래그 30% 사용 및 초기 염화물량 0ppm인 조건을 고려하면 피복두께에 의한 내구수명의 변화는 약 178년으로 나타났으며, 이러한 거동은 나머지 3 수준의 초기 염화물량에서도 동일하게 나타나는 것으로 보아 피복두께의 증가가 내구수명의 증가에 높은 영향을 미친다고 사료된다.

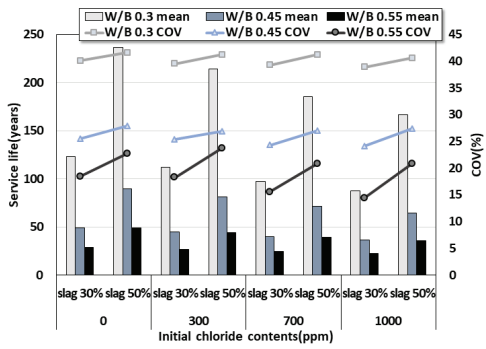
변동계수는 피복두께의 증가에 따라 일정한 경향을 나타내었으며 초기 염화물량이 0ppm인 경우, 물-결합재 비의 증가에 따라 변동계수는 감소하는 경향이 나타났다. 또한 물-결합재 비 0.3 및 슬래그 치환율 50%인 조건에서는 피복두께가 증가함에 따라 변동계수가 최대 약 20% 감소하였다.

4.2.2 표면 염화물량이 중간인 경우(13.0kg/m³)

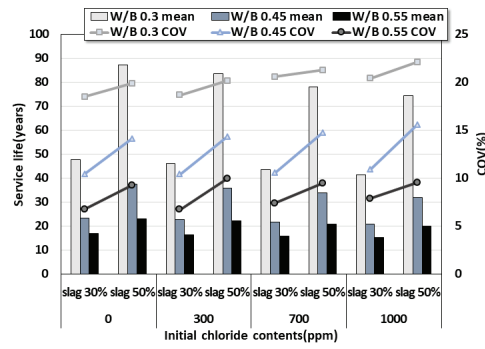
표면 염화물량이 13.0kg/m³인 경우의 피복두께 증가와 평균 및 변동계수의 관계를 Fig. 7에 나타내었다. 표면 염화물량이 낮은 경우보다 내구수명이 현저히 낮게 나타났으며, 피복두께의 증가로 인한 내구수명의 거동은 4.2.1절과 마찬가지로 나타났다. 또한 표면 염화물량이 낮은 경우에 반해 물-결합재 비가 증가함에 따라 변동계수가 감소하였으며, 표면염화물량이 낮은 경우(4.2.1절 결과)보다 변동성이 5~25% 이내로 작은 값을 가지는 것을 확인할 수 있다.

4.2.3 표면 염화물량이 높은 경우(18.0kg/m³)

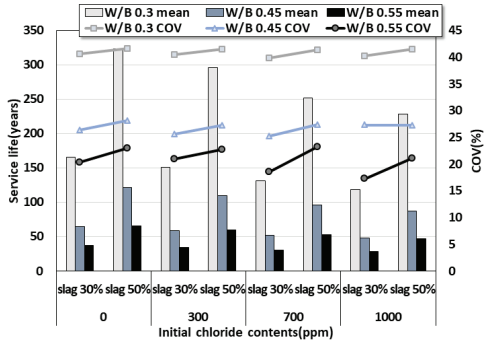
표면 염화물량이 높은 경우, 4.2.1절 및 4.2.2절의 해석 결과와 비교하였을 때 Fig. 8과 같이 피복두께의 증가에 따라 내구수명의 감소가 뚜렷이 나타났다. 피복두께 80mm와 50mm인 경우의 내구수명 차이는 초기 염화물량이 1,000ppm, 물-결합재 비가 0.45, 슬래그 치환율이 50%일 때 약 37년의 내구수명 감소가 생기는데, 표면 염화물량이 5.0kg/m³인 경우보다 내구수명의 감소 경향은 작게 나타났다.



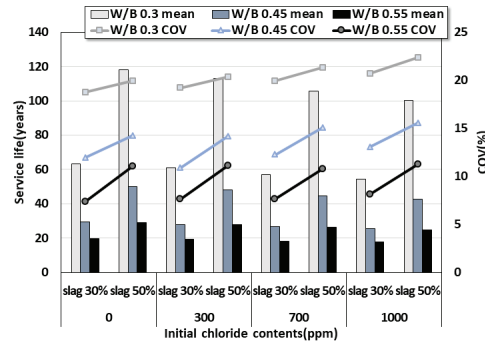
(a) 50mm



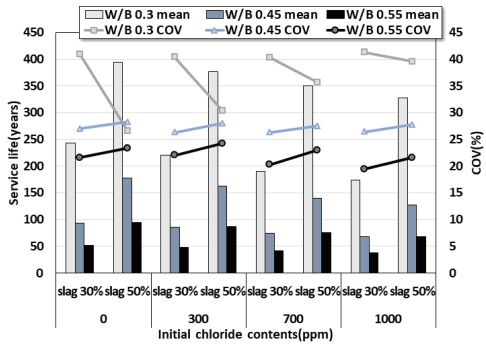
(a) 50mm



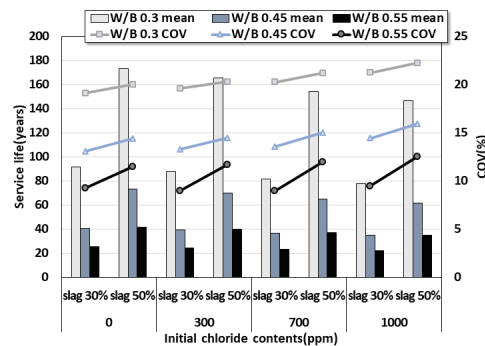
(b) 60mm



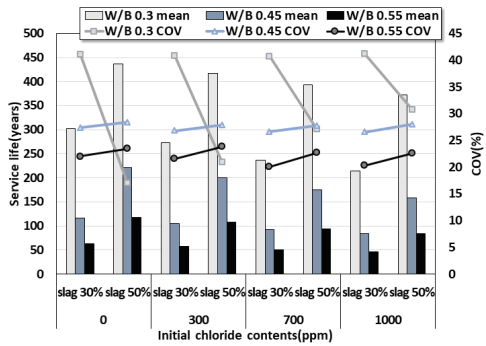
(b) 60mm



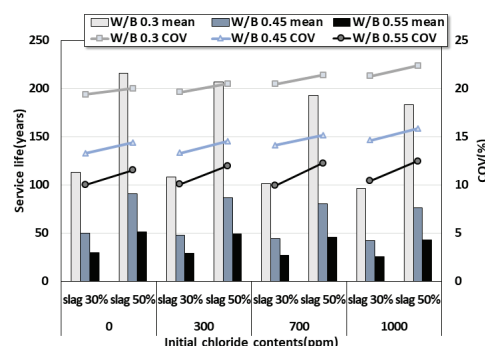
(c) 70mm



(c) 70mm



(d) 80mm



(d) 80mm

Fig. 6. Average and COV in service life with increasing cover depth in the case of 5.0kg/m³ of surface chloride content

Fig. 7. Average and COV in service life with increasing cover depth in the case of 13.0kg/m³ of surface chloride content

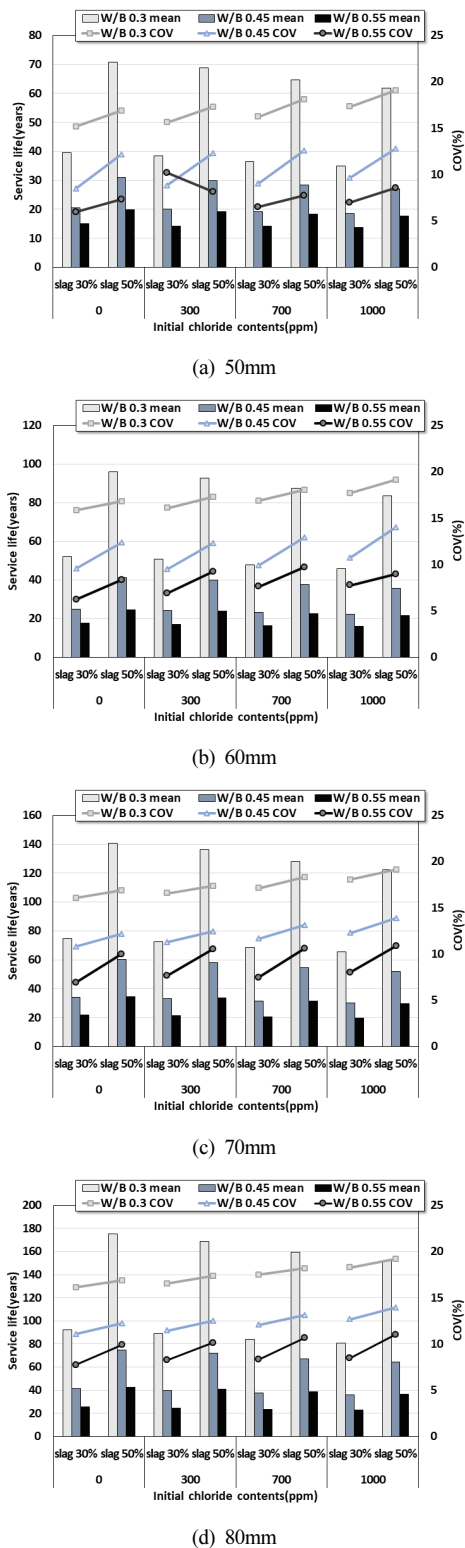


Fig. 8. Average and COV in service life with increasing cover depth in the case of 18.0kg/m³ of surface chloride content

5. 결론

본 연구에서는 초기 염화물량의 증가를 고려하여 환경 및 설계 조건에 따라 396번의 해석을 수행하였으며, 이에 대한 내구수명을 평가하였다. 또한 환경 조건 및 피복두께에 따른 내구수명의 평균 및 표준편차를 분석하여 변동성을 평가하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서 분석한 내구수명의 변동성을 비교한 결과, 일본 건축학회의 임계 염화물식을 사용하면 초기 염화물량을 1,000ppm까지 증가시켜도 내구수명이 크게 감소하지 않음을 알 수 있다. 폐기물을 연료로 사용할 경우 시멘트 내의 염화물 함유량을 증가시킬 수 있다는 문제점이 있으나 합리적인 염화물 허용량을 고려할 경우 순환자원의 활용은 내구수명 확보는 물론 탄소 중립에 효과적이라 사료된다.
- 2) 3 수준의 표면 염화물량을 고려하였을 경우, 전체적으로 초기 염화물량의 증가에 따라 내구수명이 감소하는 거동을 확인할 수 있다. 그러나 초기 염화물량의 기준을 최대 1,000ppm까지 허용하여도 고로슬래그의 30% 치환 혼입인 경우 피복두께가 80mm이면 약 100년 이상의 내구수명을 확보할 수 있었다. 또한 동일 조건 하에서 슬래그 50% 치환 혼입의 경우를 비교한 결과, 내구수명은 200년 이상으로 증가하였다. 다양한 염화물 조건에 따른 내구수명 해석결과 표면 염화물량이 높은 경우 내구수명은 감소하지만 다른 조건(5kg/m³, 13kg/m³)보다 내구수명의 변동성은 낮게 평가되었다.
- 3) 내구수명을 합리적으로 평가하기 위해서는 시멘트 결합재 비율 및 배합특성을 고려한 임계염화물 허용치가 필요하다. 또한 폐플라스틱 등을 혼소재로 활용할 경우 초기 염화물량이 증가하지만, 혼화재 및 피복두께를 고려한 재료 및 설계 조건이 강화된다면 탄소 중립 및 자원순환에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

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

References

- Architectural Institute of Japan. (2016). Recommendations for Durability Design and Construction Practice of Reinforced Concrete Buildings – 2nd ed., Architectural Institute of Japan, Tokyo, Japan, 129–130.
- Alonso, C., Castellote, M., Andrade, C. (2002). Chloride threshold dependence of pitting potential of reinforcements, *Electrochimica Acta*, **47(21)**, 3469–3481.
- Angst, U., Elsener, B., Larsen, C.K., Vennesland, Ø. (2009). Critical chloride content in reinforced concrete—a review, *Cement and Concrete Research*, **39(12)**, 1122–1138.
- Ann, K.Y., Song, H.W. (2007). Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete, *Corrosion Science*, **49(11)**, 4113–4133.
- Bamforth, P.B. (1999). The derivation of input data for modelling chloride ingress from eight-year UK coastal exposure trials, *Magazine of Concrete Research*, **51(2)**, 87–96.
- Broomfield, J.P. (1997). *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair*, E&FN, London, 1–15.
- Cao, Y., Gehlen, C., Angst, U., Wang, L., Wang, Z., Yao, Y. (2019). Critical chloride content in reinforced concrete—an updated review considering Chinese experience, *Cement and Concrete Research*, **117**, 58–68.
- CEMBUREAU. (2020). *Cementing the European Green Deal: Reaching Climate Neutrality along the Cement and Concrete Value Chain by 2050*, The European Cement Association, Brussels, Belgium, 22–25.
- CEN. (2004). *Eurocode 2: Design of Concrete Structure: EN-1992-1-1*; European Committee for Standardization (Comité Européen de Normalisation, CEN), Brussels, Belgium.
- Erdem, T.K., Kırca, Ö. (2008). Use of binary and ternary blends in high strength concrete, *Construction and Building Materials*, **22(7)**, 1477–1483.
- Hansson, C.M., Sørensen, B. (1990). *The Threshold Concentration of Chloride in Concrete for the Initiation of Reinforcement Corrosion*, ASTM International, Philadelphia, PA, USA, 3–16.
- Hussain, S.E., 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.
- Jau, W.C., Tsay, D.S. (1998). A study of the basic engineering properties of slag cement concrete and its resistance to seawater corrosion, *Cement and Concrete Research*, **28(10)**, 1363–1371.
- JCI. (2018). *Report on the Changes in Portland Cement Quality*, Japan Concrete Institute.
- JSCE. (2007a). *Standard Specification for Concrete Structures—Design*; JSCE Guidelines for Concrete 15, Japan Society of Civil Engineering(JSCE), Tokyo, Japan.
- JSCE. (2007b). *Standard Specification for Concrete Structures—Materials and Construction*; JSCE—Guidelines for Concrete 16, Japan Society of Civil Engineering(JSCE), Tokyo, Japan.
- KCI. (2021). *KDS 14 20 40 – Design Standard for Durability of Concrete Structure*, Korea Concrete Institute [in Korean].
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2009). *Concrete Standard Specification for Republic of Korea*, 324 [in Korean].
- KCI. (2004). *Concrete Standard Specification Durability Edition*, 10 [in Korean].
- KICET. (2020). *Investigation on Eco-Friendly Cement Manufacturing Technology and Industrial Status*, Korea Institute of Ceramic Engineering & Technology, 1–13 [in Korean].
- Kouloumbi, N., Batis, G., Malami, C. (1994). The anticorrosive effect of fly ash, slag and a Greek pozzolan in reinforced concrete, *Cement and Concrete Composites*, **16(4)**, 253–260.
- 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, *Structural Safety*, **31(1)**, 75–83.
- Noguchi, T., Kanematsu, M., Fukuyama, T. (2016). Revision of the “Recommendations for durability design and construction practice of reinforced concrete buildings” of the Architectural Institute of Japan, *Concrete Journal*, **54(11)**, 1091–1096.
- Park, S.S., Kwon, S.J., Song, H.W. (2011). Analysis technique for restrained shrinkage of concrete containing chlorides, *Materials and Structures*, **44(2)**, 475–486.
- Pettersson, K. (1993). *Chloride Threshold Value and Corrosion Rate in Reinforcement Concrete*, E&FN Spon, London, UK, 461–471.
- Song, H.W., Cho, H.J., Park, S.S., Byun, K.J., Maekawa, K. (2001). Early-age cracking resistance evaluation of concrete structures, *Concrete Science and Engineering*, **3(10)**, 62–72.
- Sudret, B., Defaux, G., Pendola, M. (2005). Time-variant finite element reliability analysis—application to the durability of cooling towers, *Structural Safety*, **27(2)**, 93–112.
- Thomas, M. (1996). Chloride thresholds in marine concrete, *Cement and Concrete Research*, **26(4)**, 513–519.
- Tomosawa, F. (2018). “Changes in durability standards for reinforced concrete”, *International Conference on the Durability Improvement of Cement and Concrete*, Architectural Institute of

- Japan,
- Tuutti, K. (1993). Effect of Cement Type and Different Additions on Service Life, *Concrete* 2000, 1285–1295.
- Vassie, P., TRRL. (1984). Reinforcement corrosion and the durability of concrete bridges, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, **76(3)**, 713–723.
- Yang, T., Guan, B., Liu, G., Li, J., Pan, Y., Jia, Y., Zhao, Y. (2019). Service life prediction of chloride-corrosive concrete under fatigue load, *Advances in Concrete Construction*, **8(1)**, 55–64.
- Yoon, Y.S. (2021). Evaluation of Service Life for RC Girder under Chloride Ingress with Probabilistic Analysis Considering Stress and Cold Joint Effect, Ph.D Thesis, Hannam University, 87–90 [in Korean].
- Yoon, Y.S., Ryu, H.S., Lim, H.S., Koh, K.T., Kim, J.S., Kwon, S.J. (2018). Effect of grout conditions and tendon location on corrosion pattern in PS tendon in grout, *Construction and Building Materials*, **186**, 1005–1015.
- Zhou, S. (2014). Modeling chloride diffusion in concrete with linear increase of surface chloride, *ACI Materials Journal*, **111(5)**, 483.

초기 염화물량의 증가와 배합 및 설계 변수 특성을 고려한 콘크리트 내구수명의 변동성

노출 환경 및 설계 변수의 변화에 따라 내구수명은 큰 범위를 가지고 변화하게 되므로 설계자 입장에서는 내구수명의 변동성을 이해하는 것은 중요하다. 최근 들어 탄소 중립을 위하여 플라스틱 혼소재가 클링커 생산 시 원료로 사용되고 있는데, 이러한 경우, 시멘트의 염화물 함유량은 증가하게 된다. 본 연구의 목적은 플라스틱 혼소재를 사용하여 초기 염화물량이 증가할 경우, 다양한 노출 환경과 설계 변수를 고려하여 내구수명이 어떤 수준으로 변화하는지에 대한 연구이다. 이를 위해 4 수준의 초기 염화물량을 설정하였으며, 3 수준의 표면 염화물량을 포함한 다양한 환경 조건에 따라 내구수명을 LIFE 365 프로그램을 이용하여 평가하였다. 해석 변수로서 임계 염화물량, 고로슬래그 미분말 치환 혼입율, 물-결합재 비, 피복두께, 단위 결합재량, 초기 염화물량을 설정하였다. 초기 염화물량이 증가함에 따라 내구수명은 감소하는 경향을 보이지만 이 값을 1,000ppm까지 허용해도 내구수명의 큰 감소는 나타나지 않았다. 또한 슬래그 치환율을 증가시킬 경우 더 높은 내구수명을 확보할 수 있는데, 이는 고로슬래그 미분말이 외부 염화물 이온의 확산 저감과 동시에 자유 염화물을 고정시키는 효과가 있기 때문이다. 초기 염화물량의 허용 농도를 유럽기준과 같이 증가시키는 것도 지속가능성 향상과 탄소량을 저감시키는 데 도움이 될 것으로 판단된다. 또한 표면 염화물량이 낮고 혼화재(슬래그)를 사용한 경우, 초기 염화물량의 영향은 상대적으로 낮았지만 표면염화물량이 높은 경우, 노출환경을 고려한 신중한 배합설계가 필요하다.