

장기재령 FA 콘크리트에 대한 염화물 거동 및 확률론적 염해 내구수명 평가

Evaluation of Chloride Behavior and Service Life in Long-Term Aged FA Concrete through Probabilistic Analysis

윤용식¹ · 권성준^{2*}Yong-Sik Yoon¹ · Seung-Jun Kwon^{2*}

(Received August 3, 2020 / Revised September 22, 2020 / Accepted September 22, 2020)

In this study, accelerated chloride diffusion tests were performed on OPC(Ordinary Portland Cement) and FA(Fly Ash) concrete considering three levels of W/B(Water to Binder) ratio on 1,095 curing days. The accelerated chloride diffusion coefficient and the passed charge were evaluated in accordance with Tang's method and ASTM C 1202, and the resistance performance to chloride attack improved over time. FA concrete showed excellent resistance performance against chloride penetration with help of pozzolanic reaction. As the result of the passed charge, FA concrete showed durability improvement, "low" grade to "very low" grade, but OPC concrete changed "moderate" grade to "low" grade at 1,095 curing days. After assuming the design variables used for durability design as normal distribution functions, the service life of each case was evaluated by the probabilistic analysis method based on MCS(Monte Carlo Simulation). In FA concrete, the increase of probability of durability failure was lower than that of OPC concrete with increasing time, because the time-dependent coefficient of FA concrete was up to 3.2 times higher than OPC concrete. In addition, the service life by probabilistic analysis was evaluated lower than the service life by deterministic analysis, since the target probability of durability failure was set to 10%. It is considered that more economical durability design will be possible if the more suitable target probability of durability failure is set for various structures through researches on actual conditions and indoor tests under various circumstances.

키워드 : 염해, 내구수명, 확률론적 해석, 결정론적 해석, 플라이애시

Keywords : Chloride attack, Service life, Probabilistic analysis, Deterministic analysis, Fly ash

1. 서론

대표적인 RC(Reinforced Concrete) 구조물의 열화 현상 중 하나인 염해의 경우, 모체인 경화된 콘크리트에 직접적인 영향을 미치는 현상은 아니지만 콘크리트 내부로 염화물 이온(Cl⁻)이 확산하여 보강재가 매립된 위치, 즉 피복두께까지 도달하면 철근의 부식이 개시되게 된다(Metha and Monteiro 2009; Moon et al. 2002). RC 구조물이 지지하는 대부분의 인장력은 철근이 부담하므로 철근의 부식이 발생하면 외부에서 작용하는 인장력을 지지하지 못하여 구조적 문제가 발생하며, 피복 콘크리트가 박락하여 구조물의

미관 및 안전성에 영향을 준다(Oh et al. 2016; Yoon et al. 2018). 해안 지역에 시공되는 RC 구조물의 경우, 직접적으로 염화물 이온에 침지되는 경우뿐만 아니라 비래염분에 의하여도 피해가 발생하고 있으며, 특히 조수간만의 영향으로 인해 해수의 건습이 반복되는 경우 물리적-화학적 기구가 동시에 발생하여 염소 이온의 확산이 가속화되는 것으로 알려져 있다(Lee et al. 2017). 이러한 염해에 의한 열화 현상을 제어하고자 다양한 연구가 수행되어왔으며 그 중에서도 콘크리트에 혼화재료를 혼입하여 사용하는 방법이 효과적으로 알려져 있다(Kim et al. 2019; Yang et al. 2018; Kouloumbi et al. 1994).

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

¹한남대학교 토목환경공학과 박사과정 (Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea)

²한남대학교 토목환경공학과 부교수 (Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea)

콘크리트의 대표적인 혼화재료 중 하나인 플라이애시(FA: Fly Ash)는 화력 발전소에서 석탄을 연소시킬 때 발생하는 특정 입도 범위(1 μ m~100 μ m)의 미분말을 의미하며, OPC(Ordinary Portland Cement)의 대체제로서 사용된다(KS L 5405 2016). 플라이애시를 콘크리트에 혼입하면 장기 강도 및 내구성능이 개선되며, 특히 염해 저항성능이 크게 개선되는 것으로 알려져 있다(Nath and Sarker 2011). 이는 플라이애시의 주요 특성 중 하나인 포졸란 반응에 기인하며 구형의 입자를 갖고 있으므로 워커빌리티 및 블리딩 개선 등을 기대할 수 있다(Bilodeau et al, 1998).

국내 콘크리트구조 내구성 설계기준에서는 염해에 대한 내구성능을 평가하기 위해 Fick's 2nd law를 지배방정식으로 사용하고 있으며, 철근이 피복된 위치에서의 염화물량이 임계염화물량에 이르는 기간을 내구수명으로 정의하고 있다(KDS 14 20 40 2016). 또한 1990년대 이후부터 RC 구조물의 내구수명을 확률론적으로 해석하려는 시도가 이루어져왔으며, 이 해석 기법에서는 공학적 불확실성을 고려할 수 있는 장점이 있다(Stewart and Mullard 2007; Kwon et al, 2009). 확률론적 해석 기법에서는 구조물의 목표 내구수명 동안 철근이 위치한 지점에서, 유입된 염화물량이 임계 염화물량보다 높을 확률을 목표 내구적 파괴확률보다 낮도록 유도한다(Kwon 2016). 사용 기간 동안 증가하는 내구적 파괴확률(PDF: Probability of Durability Failure)을 평가한 후 설정된 목표 내구적 파괴확률에 따라 내구수명을 산정하며, 염해에 대해서는 일반적으로 7%~10%의 목표 내구적 파괴확률을 설정하고 있다(CEB 2006; EN 1991 2000).

본 연구에서는 플라이애시 치환율 2 수준(0%, 30%), 물-결합재비(W/B: Water to Binder) 3 수준(0.37, 0.42, 0.47)을 고려한 콘크리트 배합의 장기 염해 내구성능 및 압축강도를 평가하였다. 대상 재령일은 1,095일이며 이전 재령일의 시험 결과를 다룬 선행 연구(SERI 2003; Yoon and Kwon 2018; Yoon et al, 2019) 결과와의 비교 고찰을 통해 재령에 따라 변화하는 내구적·역학적 거동을 분석하였다. 또한 촉진 염화물 확산 시험 결과와 기존의 염해 내구수명 산정 이론식들을 기반으로 내구수명에 대한 결정론 및 확률론적 해석을 수행하였다. 설계 변수들을 정규분포 함수로 가정하여 각 배합의 사용 기간에 따른 파괴확률 거동을 분석하였으며, 결정론 및 확률론적 내구수명 평가 결과를 정량적으로 분석하였다.

2. 실험 계획 및 방법

2.1 사용 배합 및 재료

본 연구에서는 3가지 수준의 물-결합재 비와 30%의 플라이애시

치환율을 고려하여 콘크리트 배합을 수행하였다. 결합재로서 분말도 3,500cm²/g급의 2종 플라이애시 미분말과 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 본 연구에서 사용한 배합표를 Table 1에, 사용 골재 및 고성능 감수제의 특성을 Table 2 및 Table 3에, 결합재로 사용된 포틀랜드 시멘트 및 플라이애시의 특성을 Table 4에 나타내었다.

Table 1. Concrete mixture for this study

Type	W/B	Unit weight(kg/m ³)					S.P (% of wt.)
		W	C	FA	S	G	
OPC	0.37	168	454	0	767	952	1.10
	0.42	168	400	0	787	976	1.00
	0.47	168	357	0	838	960	0.95
FA 30	0.37	168	318	136	745	952	1.40
	0.42	168	280	120	768	953	1.20
	0.47	168	250	107	820	939	1.00

W : Water, C : Cement, FA : Fly Ash, S : Sand, G : Gravel
S.P : Super Plasticizer

Table 2. Properties of sand and gravel

Items	G _{max}	Specific gravity	Absorption	F.M.
Sand	-	2.58	1.01	2.00
Gravel	25	2.64	0.82	6.87

F.M. : Fineness Modulus

Table 3. Properties of super plasticizer

Items	Type	Main component	Solid	Density	pH
2000R	Liquid	Polycarbonic acid	25%	1.08	6.7

Table 4. Properties of both binders

Chemical composition(mass%)							
Items	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Ig-loss (%)
OPC	21.96	5.27	3.44	63.41	2.13	1.96	0.79
FA	55.66	27.76	7.04	2.70	1.14	0.49	4.3
Physical properties							
Items	Specific gravity (g/cm ³)			Blaine (cm ² /g)			
OPC	3.16			3,214			
FA	2.19			3,621			

본 연구에서는 폴리카본산계 감수제를 사용하였는데, 이 유형의 감수제는 콘크리트에 혼입되는 경우 기존의 나프탈렌계 감수제보다 슬럼프 유지능력이 우수하고 조기 강도 발현에 효과적이다 (Lee et al, 2004).

2.2 촉진 염화물 확산 시험(RCPT: Rapid Chloride Penetration Test) 방법

2.2.1 촉진 염화물 확산계수 평가 방법

본 연구에서는 Tang’s method를 이용하여 시험을 수행하였다. 이 시험방법은 전기적 이동과 확산을 동시에 고려하고 있으며, 비정상상태의 확산계수를 구할 수 있는 방법이다(Tang and Nilson 1992). 8시간 동안의 전압 인가 후 시편을 할렬하여 쪼개진 면에 질산은(AgNO₃) 수용액(0.1N)을 분무하여 은색으로 변하는 부분을 염화물 이온의 침투 영역으로 판단하였다. 평균 염화물 침투 깊이를 식 (1) 및 식 (2)에 적용하여 각 배합의 촉진 염화물 확산계수를 도출하였다.

$$D_{rcpt} = \frac{RTL}{zFU} \frac{x_d - a\sqrt{x_d}}{t} \tag{1}$$

$$a = 2\sqrt{\frac{RTL}{zFU}} \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2C_d}{C_0} \right) \tag{2}$$

여기서, D_{rcpt} 는 비정상상태에서의 촉진 염화물 확산계수(m²/s), R 은 기체상수(8.314J/mol · K), T 는 절대온도(K), L 은 시편두께(m), z 는 이온전자가(1.0), F 는 패러데이상수(96,500J/V · mol), U 는 전위차(V), x_d 는 비색법에 의한 침투깊이(m), t 는 전위차의 적용시간(sec), C_d 는 비색법에 의한 반응농도(mol/l), C_0 는 음극 Cell의 염소이온농도(mol/l)를 나타낸다.

본 연구의 이전 재령일 선행 연구(Yoon and Kwon 2018; Yoon et al. 2019)에서는 다량의 시편을 제작하는 과정에서 운반 및 양생 문제가 발생하여 재령 28일에 촉진 염화물 확산계수 및 통과 전하량을 평가하지 못하였다. 따라서 재령 28일의 촉진 염화물 확산계수는 동일 배합을 다룬 사전 연구(SERI 2003)에서 인용하였다.

2.2.2 통과 전하량 평가 방법

재령 1,095일에 ASTM C 1202에 따라 장기재령 플라이애시 콘크리트의 통과 전하량을 평가하였다. 에폭시가 도포된 두께 50mm의 디스크 시편을 대상으로 Cell I(-극)에는 3%의 염화나트륨(NaCl) 수용액(NaCl)을 Cell II(+극)에는 0.3M의 수산화나트륨

Table 5. Evaluation standard for chloride resistance by ASTM C 1202

Total passed charge(Coulomb)	Chloride ions permeability
> 4,000	High
2,000~4,000	Moderate
1,000~2,000	Low
100~1,000	Very low
< 100	Negligible

(NaOH) 수용액을 적용하여 6시간 동안 60V의 전압을 인가한다. 통과 전하량을 30분 간격으로 측정 후 식 (3)을 활용하여 통과 전하량을 도출하였다. 도출된 통과 전하량은 Table 5와 같은 기준에 따라 평가된다(ASTM C 1202 2005). 재령 28일 통과 전하량을 식 (4)와 같은 기준에 제안된 촉진 염화물 확산계수와 통과 전하량 간의 상관식과 재령 28일 촉진 염화물 확산계수 결과를 활용하여 도출하였다(Berke and Hicks 1994).

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{330} + I_{360}) \tag{3}$$

여기서, Q 는 총 통과 전하량(Coulomb)을 나타내고 있으며, I_x 는 x 분에서 측정된 전류 값(A)을 나타낸다.

$$D = 0.0103 \times 10^{-12} \times (Q_{total})^{0.84} \tag{4}$$

여기서, D 는 촉진 염화물 확산계수(m²/sec), Q 은 통과 전하량을 나타낸다.

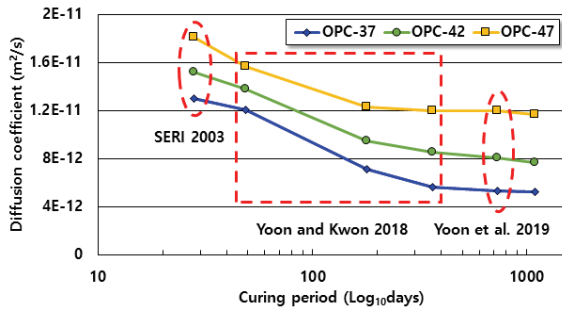
2.3 압축강도 평가 방법

재령 1,095일에 각 배합의 압축강도를 KS F 2405에 준하여 평가하였다. 이전재령일의 압축강도 결과를 선행 연구에서 인용하여 재령의 증가에 따라 증가하는 압축강도거동을 분석하였다(Yoon and Kwon 2018; Yoon et al. 2019).

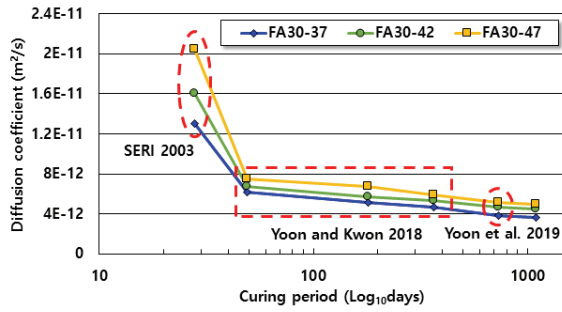
3. 촉진 염화물 확산거동 및 압축강도 평가 결과

3.1 촉진 염화물 확산계수 평가 결과

재령 28일, 49일, 180일, 365일, 730일의 시험 결과는 사전 연구에서 인용하였으며, 재령 1,095일의 촉진 염화물 확산계수 평가 결과를 추가하여 평가한 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 아래의 모든 평가 결과 그래프들에서 배합명(OPC, FA 30)과 “-” 다음의 숫자



(a) OPC



(b) FA 30

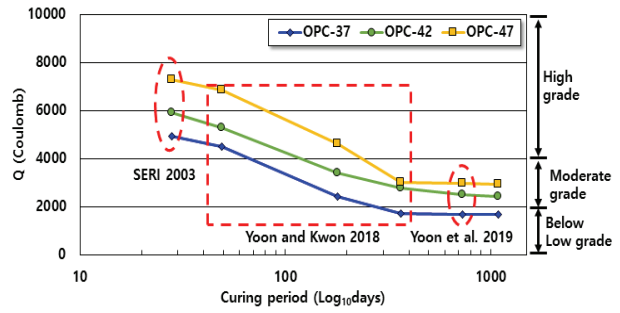
Fig. 1. The results of accelerated chloride diffusion coefficient

는 물-결합재 비를 나타낸다. 예를 들어 FA 30-42은 물-결합재 비 0.42의 플라이애시 30% 치환 혼입 배합을 의미한다.

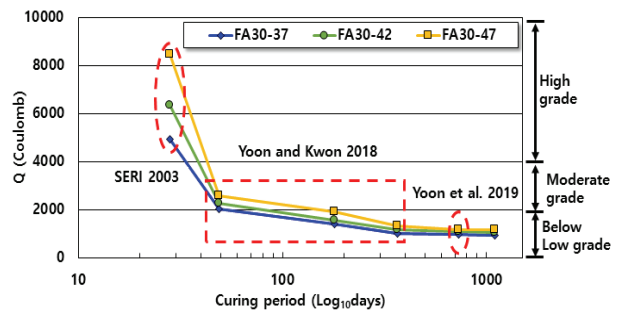
결합재의 종류와 무관하게 물-결합재 비가 낮을수록 낮은 촉진 염화물 확산계수가 나타났다. 또한 플라이애시 콘크리트는 재령이 증가함에 따라 큰 폭의 확산계수 감소를 나타내었다. 재령 28일 기준 재령 1,095일에서의 촉진 염화물 확산계수 감소율은 OPC 배합의 경우 35.7~59.5%, FA 30 배합의 경우 71.8~76.0%로 평가되었다. 플라이애시 혼입 배합의 경우 포졸란 반응에 의하여 추가적으로 생성되는 수화물이 염화물 확산을 저감시킨 것으로 사료된다. 또한 재령 365일 이후에는 두 배합 모두 확산계수의 감소가 더디게 발생하였다. 최종재령일인 1,095일에서 FA 30 배합은 OPC 배합 대비 42.2~69.4%의 확산계수 값을 나타내어 단일 결합재를 사용한 OPC 배합 대비 뛰어난 염해 내구성을 갖는 것으로 평가되었다.

3.2 통과 전하량 평가 결과

재령 1,095일에 두 배합의 통과 전하량을 평가한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 선행 연구에서 평가한 두 배합의 이전 재령일 통과 전하량 값을 함께 고려하여 시간의존적으로 개선되는 두 배합의 통과 전하량 거동을 분석하였다.



(a) OPC



(b) FA 30

Fig. 2. The results of passed charge

통과 전하량 평가 결과, 3.1절의 촉진 염화물 확산 시험과 비슷한 결과 거동을 나타내었는데 이는 두 시험 방법 모두 전기장 내 염화물 이온의 이동속도에 지배적인 시험이기 때문이다. 재령 28일 대비 재령 1,095일에서의 통과 전하량 감소율은 OPC 배합의 경우 58.9~66.2%, FA 30 배합의 경우 81.2~86.4%로 평가되었다. 통과 전하량 시험에서도 재령 365일 이후 큰 폭의 통과 전하량 감소가 나타나지 않았다. 최종 재령일인 1,095일에서 FA 30 배합은 OPC 배합 대비 38.9~55.8%의 통과전하량 값을 나타내었다.

또한 재령 180일에는 OPC-37, OPC-42 배합의 경우 “Moderate” 등급을, OPC-47 배합의 경우 “High” 등급을 나타내어 OPC를 단독으로 사용하는 경우 OPC-47 배합을 제외하고는 재령 180일부터 적절한 염해 내구성을 갖고 있다고 판단된다. 그러나 FA 30 배합의 경우 재령 180일부터 모든 경우에서 “Low” 등급을 나타내었다. 또한 재령 1,095일에서는 OPC 배합의 경우 “Moderate” 등급~ “Low” 등급을, FA 30 배합의 경우 “Low” 등급~ “Very low” 등급을 나타내어 재령일이 확보된다면 FA 30 배합은 OPC 배합 대비 뚜렷하게 개선된 염해 저항성을 나타내는 것으로 판단된다.

3.3 압축강도 평가 결과

재령 1,095일에 각 배합의 압축강도를 평가하여 이전 재령일의 결과(Yoon and Kwon 2018; Yoon et al. 2019)와의 비교 고찰을 통해 재령일의 증가에 따른 압축강도 변화 거동을 분석하였다. 각 배합의 압축강도 평가 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

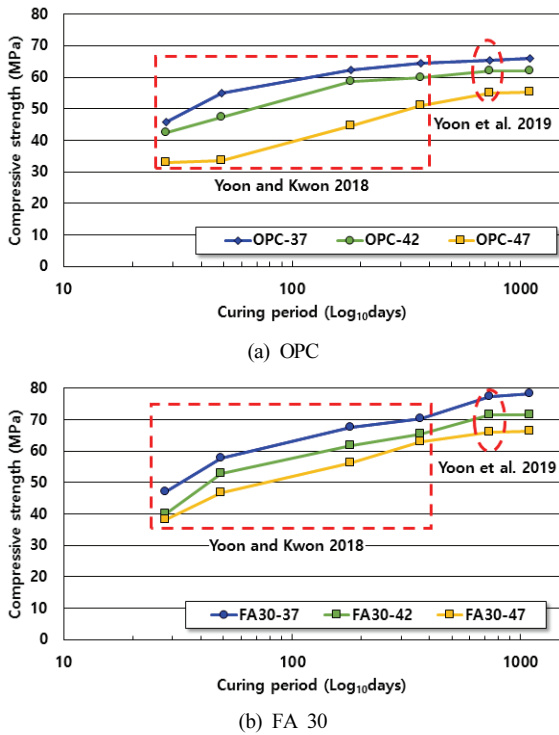


Fig. 3. The results of compressive strength

초기 재령일에서부터 FA 30 배합은 OPC 배합 대비 동등 이상의 강도 값을 나타내었다. 이는 적절한 감수제의 활용을 통해 포졸란 반응을 촉진시켰기 때문으로 사료된다. 재령 28일 대비 1,095일에서의 강도 값은 OPC 배합의 경우 144.2%~167.8%, FA 30 배합의 경우 165.6%~178.2%의 값을 나타내었다. FA 30 배합의 경우 초기재령에서 높은 강도 값을 나타낼 뿐 아니라 재령일의 증가에 따른 강도 증진율 역시 우수한 값을 나타내었다.

4. 설계변수의 변동성을 고려한 확률론적 내구수명 해석

4.1 염해에 대한 결정론 및 확률론적 내구수명 평가 방법

4.1.1 염화물 확산계수의 시간의존성지수 평가

콘크리트의 염화물 확산 거동의 경우 노출기간의 증가에 따라 꾸준히 변화하기 때문에 내구성 해석 시 이를 고려하는 것이 합리적이다(Yoon and Kwon 2018). 본 연구에서는 Life-365에서 제안한 시간의존성지수 모델을 사용하여 시간의존적으로 감소하는 염화물 확산 거동을 고려하였다(Thomas and Bentz 2002). 식 (5) 및 (6)에 시간의존성지수 모델을 나타내었다.

$$D(t) = D_{ref} \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^m \quad (5)$$

$$\text{Log} \left(\frac{D(t)}{D_{ref}} \right) = m \times \text{Log} \left(\frac{t_{ref}}{t} \right) \quad (6)$$

여기서, $D(t)$ 는 시간(t)에서의 겉보기 염화물 확산계수를, D_{ref} 는 기준 시간(재령 28일)에서의 겉보기 염화물 확산계수를, t_{ref} 는 기준시간으로서 재령 28일을, m 은 시간의존성지수를 나타낸다.

Life-365모델은 겉보기 염화물 확산계수를 사용하므로 3.1절의 촉진 염화물 확산계수 결과 값을 아래의 식 (7)을 이용하여 겉보기 염화물 확산계수로 변환하였다(Polder et al. 2007).

$$D_{cpt} = 1.16D_{app} + 0.32 \times 10^{-12} (R^2 = 0.96) \quad (7)$$

여기서, D_{cpt} 는 촉진 염화물 확산계수를, D_{app} 는 겉보기 염화물 확산계수를 나타낸다.

FA 30 배합의 경우 모든 재령일을 포함하여 회귀분석하면 결정 계수가 크게 감소하게 된다. 이는 재령 28일의 확산계수가 다른 재령일들의 값들보다 상대적으로 높았기 때문이다. 재령 28일 시험 결과의 경우 본 연구와 동일 배합을 이용한 기존 연구에서 인용한 값이기 때문에 실험 조건 등의 차이로 이러한 차이가 나타난 것으로 사료된다. 또한 재령 49일을 기준 시간으로 설정하여 시간의존성지수를 산출하는 경우 FA의 포졸란 반응이 적절히 고려되지 않아 매우 낮은 값의 시간의존성지수가 나타난다. 따라서 본 연구에서는 결정계수를 높이고 포졸란 반응을 고려한 시간의존성지수를 산출하고자 모든 경우의 회귀분석에서 기준 재령일을 재령 28일로 설정한 후 재령 49일의 결과 값을 제외하고 선형회귀분석을 수행하였다. Fig. 4에 본 연구의 회귀분석 결과를 나타내었다.

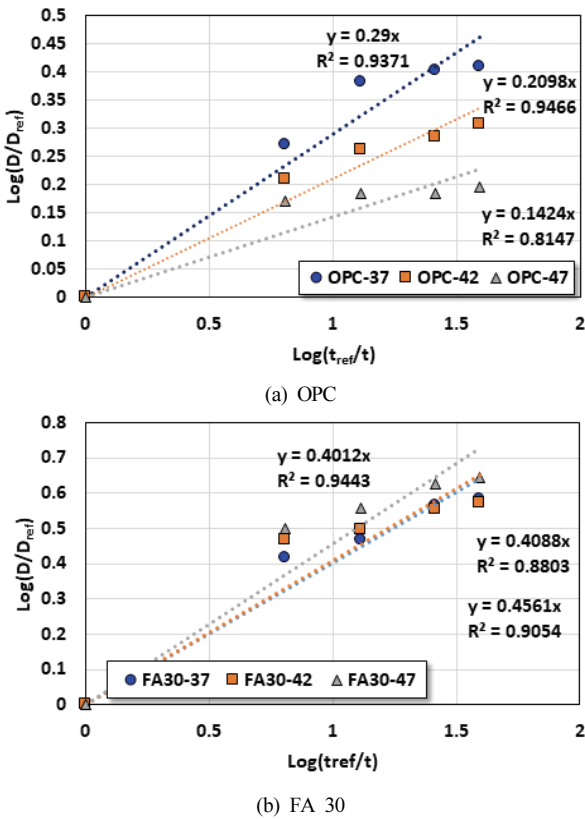


Fig. 4. The results of regression analysis for time-dependent parameter

4.1.2 결정론적 내구수명 평가 방법

본 연구에서는 콘크리트구조 내구성 설계기준에 준하여 염해 내구성 해석을 수행하였다(KDS 14 20 40 2016). 콘크리트 내구성 설계기준에서는 Fick's 2nd law에 준하여 염해 내구성을 해석한다. 아래에 염화물 확산의 지배방정식인 Fick's law를 나타내었다.

$$C_d - C_i = (C_s - C_i) \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_d t}} \right) \right) \quad (8)$$

여기서, C_d 는 위치 x (m), 시간 t (year)에서의 염화물 이온의 양 (kg/m^3), C_i 는 초기 염화물 이온의 양(kg/m^3), C_s 표면 염화물량 (kg/m^3), erf는 오차함수, D_d 는 유효 겉보기 염화물 확산계수 (m^2/year)를 나타낸다.

위의 지배방정식을 통해 구조물의 염해 내구수명을 산정하는 경우, 보강재가 매립되어있는 위치, 즉 피복두께에서의 염화물량이 임계 염화물량에 도달하는 기간을 내구수명으로 산정한다.

염화물 확산계수의 경우 재령이 증가함에 따라 꾸준히 감소한

다. 확산계수의 감소한계는 일반적으로 30년으로 알려져 있으며 (KDS 14 20 40 2016), 이러한 거동을 염해 내구성 해석 시 고려하기 위해 식 (8)에서 사용되는 유효 겉보기 염화물 확산계수는 식 (9) 및 식 (10)에 따라 산출된다. 유효 겉보기 염화물 확산계수 산정식은 아래와 같이 감소한계인 30년을 기준으로 변화한다.

$$D_d = \frac{D_R}{1-m} \left(\frac{t_R}{t} \right)^m \quad (t < 30 \text{년 인 경우}) \quad (9)$$

$$D_d = \frac{D_R}{1-m} \left[(1-m) + m \frac{t_c}{t} \right] \left(\frac{t_R}{t_c} \right)^m \quad (t \geq 30 \text{년 인 경우}) \quad (10)$$

여기서, D_d 는 유효 겉보기 확산계수, D_R 은 기준시간에서의 염화물 확산계수, t_R 은 기준시간(28일=0.077년), t_c 는 확산계수 감소한계(30년), m 은 시간의존성지수를 나타낸다.

4.1.3 확률론적 내구수명 평가 방법

확률론적 염해 내구수명 해석 시에도 4.1.2절과 같이 Fick's 2nd law를 지배방정식으로 사용하며, 이 방법에서는 피복두께에서의 염화물량이 임계 염화물량에 이르는 확률을 통해 내구수명을 산출한다.

식 (8)의 겉보기 염화물 확산계수, 표면 염화물량, 시간의존성지수, 피복두께, 임계 염화물량을 확률변수로 가정하여 MCS(Monte Carlo Simulation)을 수행하여 확률론적으로 해석된 내구적 파괴 확률을 평가하였다. 본 연구에서 설정한 설계변수의 변동성 및 수준을 고려하여 여러 수준의 시뮬레이션 횟수를 사전에 수행하였는데, 3,500회의 수준에서 해석 결과 값의 변동성이 크게 감소하였다. 따라서 본 연구에서는 MCS 실행 횟수를 3,500회로 설정하였다. 식 (11)에 확률론적 염해 내구성 평가를 위한 지배방정식을 나타내었으며 Fig. 5에는 확률론적 내구수명 해석 플로우 차트를 나타내었다.

$$P \left\{ C_{cr}(\mu, \sigma) < C_s(\mu, \sigma) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x(\mu, \sigma)}{D(\mu, \sigma)t} \right) \right] \right\} < P_{\max} \quad (11)$$

여기서, $C_{cr}(\mu, \sigma)$ 는 임계 염화물량의 확률변수를, $C_s(\mu, \sigma)$ 는 표면 염화물량의 확률변수를, $x(\mu, \sigma)$ 는 피복두께의 확률변수를, $D(\mu, \sigma)$ 는 염화물 확산계수의 확률변수를, P_{\max} 는 목표 내구적 파괴확률로서 본 연구에서는 기존의 연구를 참고하여 10%로 설정하였다(Kwon et al. 2009; CEB 2006; EN 1991 2000).

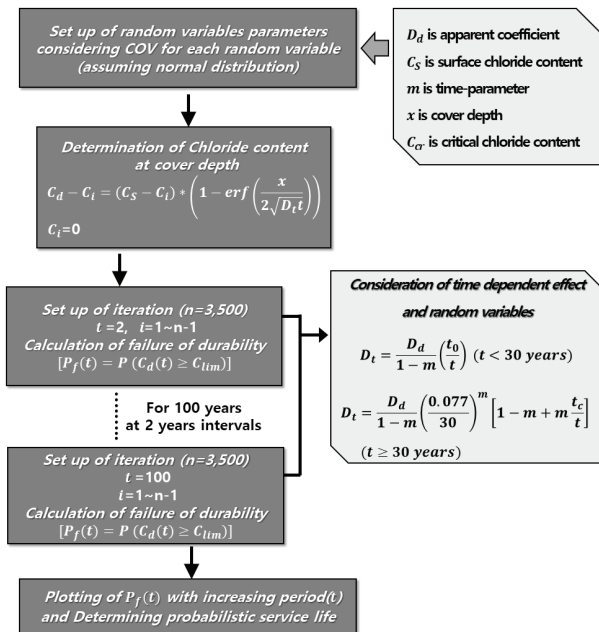


Fig. 5. Flowchart for evaluation of service life by probabilistic analysis method

4.1.4 염해 내구수명 해석 변수 설정

염해 내구수명 해석을 위한 표면 염화물량 및 임계 염화물량은 콘크리트표준시방서에 준하여 설정하였으며, 표면 염화물량은 동해안 지역의 해안선으로부터 100m에 해당 구조물이 시공되어있는 것으로 가정하여 4.5kg/m³으로 설정하였다(KCI 2012). 또한 확률론적 내구수명 해석을 위해 겉보기 염화물 확산계수, 표면 염화물량, 시간의존성지수, 피복두께, 임계 염화물량을 정규분포함수로 정의하여 MCS를 수행하였다. 정규분포함수로 가정된 설계변수들을 각각 평균 값과 일정한 COV(Coefficient of Variation)을 갖는 것으로 설정하였다. 본 연구에서는 모든 경우의 COV를 10%로

Table 6. The analysis parameter for probabilistic analysis

Type	Value	D _{app} (X10 ⁻¹² m ² /s)	m	C _s (kg/m ³)	C _{lim} (kg/m ³)	Cover depth (cm)
OPC-37	Avg : 10.94 COV : 0.1	Avg : 0.290 COV : 0.1	Avg:4.5 COV : 0.1	Avg:1.2 COV : 0.1	Avg:8.0 COV : 0.1	
OPC-42	Avg : 12.83 COV : 0.1	Avg : 0.210 COV : 0.1				
OPC-47	Avg : 15.31 COV : 0.1	Avg : 0.142 COV : 0.1				
FA-37	Avg : 10.97 COV : 0.1	Avg : 0.401 COV : 0.1				
FA-42	Avg : 13.56 COV : 0.1	Avg : 0.409 COV : 0.1				
FA-47	Avg : 17.40 COV : 0.1	Avg : 0.456 COV : 0.1				

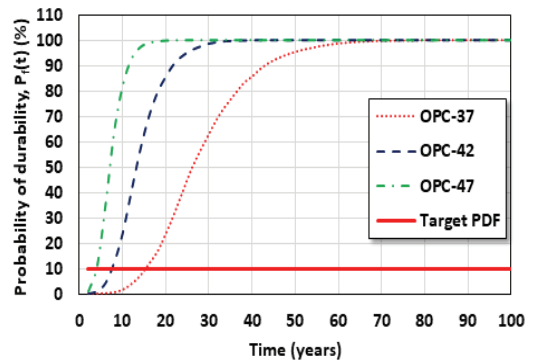
가정하였는데, 이 수준의 COV는 콘크리트 구조물의 내구성 설계에서 적절한 수준으로 사용되는 값으로 알려져있다(Koyama and Hanada 1998). 확률론적 내구수명 해석을 위한 해석 변수를 Table 6에 나타내었다. Table 6의 확산계수 및 시간의존성지수의 평균 값은 4.1,1절에 따라 평가된 값이다.

4.2 결정론 및 확률론적 내구수명 해석 결과

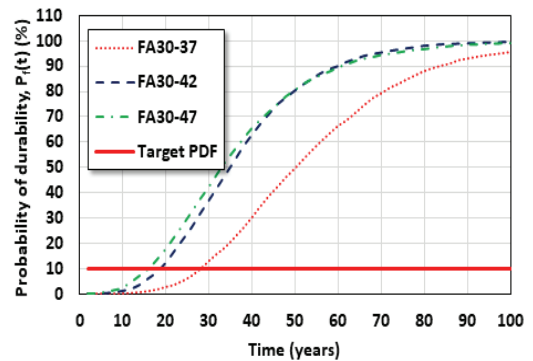
4.2.1 확률변수를 고려한 내구수명 해석 결과

본 절에서는 Fick's 2nd law에 준한 OPC 및 FA 30 배합의 확률론적 내구수명 해석을 수행하였다. Fig. 6에서는 각 배합의 시간에 따라 증가하는 내구적 파과 확률을 나타내고 있다.

노출 기간에 따른 내구적 파과확률을 평가한 결과, 두 배합 간에 거동차이가 발생하였다. FA 30 배합에서는 파과확률이 OPC 배합 대비 낮은 속도로 증가하였다. 이는 FA 30 배합에서 높은 확산계수 값을 나타낼지라도 시간의존성지수가 OPC 배합 대비 최대 3.2 배 높기 때문으로 보인다. 또한 OPC 배합에서는 물-결합재 비의 증감으로 인한 거동 차이가 명확하게 나타났으나 FA 콘크리트에서는 물-결합재 비 42%와 47%간의 파과확률 거동 차이가 매우



(a) OPC



(b) FA 30

Fig. 6. The analysis results of probability of durability failure

작게 나타났다. 물-결합재 비의 영향이 OPC 배합의 경우 FA 30 배합 보다 높게 나타나는 것으로 사료된다.

목표 내구적 파괴확률을 10%로 설정하는 경우, OPC 배합의 경우 물-결합재비 37%에서는 15.2년의 내구수명을, 42%에서는 7.5년의 내구수명을, 47%에서는 4년의 내구수명을 나타내었다. FA 30 배합에서는 물-결합재 비 37%의 경우 28.3년의 내구수명을, 42%의 경우 19.0년의 내구수명을, 47%의 경우 16.2년의 내구수명을 나타내었다. 설계변수의 변동성을 고려하더라도 FA 30 배합은 OPC 배합 대비 최대 약 3.2배 높은 내구수명을 나타내었다. 이는 FA 30 배합의 높은 시간의존성지수에 의한 결과로 사료된다.

4.2.2 결정론적 내구수명 과의 비교 평가

본 절에서는 각 배합의 결정론 및 확률론적 방법에 의한 내구수명을 비교 평가하고자 한다. 결정론 및 확률론적 내구수명 평가 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

목표파괴확률을 10%로 설정하였기 때문에 결정론적 해석에 의한 내구수명은 확률론적 해석에 의한 내구수명보다 높은 값을 나타냈다. 결정론적 해석에 의한 내구수명을 기준으로 확률론적 내구수명의 감소율을 평가하면 OPC 배합의 경우 56.4%~58.1%, FA 배합의 경우 48.9%~56.5%로 나타났다. FA 배합에서 OPC 배합보다 두 방법에 의한 내구수명이 더 큰 차이를 나타냈다.

10%의 목표 내구적 파괴 확률은 매우 보수적인 값으로 사료되므로 실태 조사 및 실내 실험을 통해 각 구조물의 특성에 맞는 변동계수 및 목표 내구적 파괴확률을 설정한다면 더욱 경제적인 RC 구조물의 내구성 설계가 가능해지리라 사료된다.

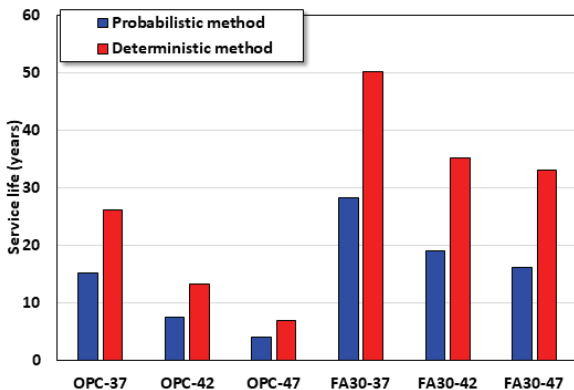


Fig. 7. The comparison of service life between deterministic analysis and probabilistic analysis

5. 결론

본 연구에서는 3수준의 물-결합재 비를 고려한 OPC 및 FA 콘크리트를 대상으로 염해 저항 성능 및 역학적 성능을 평가하였다. 또한 대상 RC 구조물을 가정한 후, 평가된 염화물 확산계수 및 기존의 이론들을 참고하여 각 배합의 결정론 및 확률론적 염해 내구수명을 해석하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- 1) 재령 1,095일에 촉진 염화물 확산계수를 평가한 결과 FA 30 배합은 OPC 배합 대비 42%~69.4%의 확산계수 값을 나타내었다. 또한 재령 28일 기준 재령 1,095일에서의 확산계수 감소율은 후 이전 재령일의 결과 값과 비교 평가한 결과, OPC 배합의 경우 35.7%~59.5%, FA 30 배합의 경우 71.8%~76.0%의 확산계수 감소율을 나타내었다. FA 30 배합은 단일 결합재로 이루어진 OPC 배합 대비 뛰어난 염해 내구성을 나타내었다.
- 2) ASTM C 1202의 평가 기준에 따르면 FA 배합의 경우 재령 180일부터 “Low” 등급을 나타내었으며, 재령 1,095일에서는 최대 “Very low” 등급까지 개선된 성능을 나타내었다. 그러나 OPC 배합의 경우 재령 1,095일에 도달한 후에도 “Moderate” 등급에 포함되는 경우가 존재하였다. 또한 재령 28일 대비 재령 1,095일에서의 강도 결과 값은 OPC 배합의 경우 144.2%~167.8%, FA 30 배합의 경우 165.6%~178.2%로 나타났다.
- 3) 확률론적 내구수명 해석을 통해 시간에 따라 증가하는 내구적 파괴확률을 각 배합별로 평가할 수 있었는데, FA 30 배합에서 OPC 배합 대비 파괴확률이 느리게 증가하였다. 이는 FA 30 배합에서 OPC 배합 대비 최대 3.2 배 높은 시간의존성지수를 갖기 때문에 파괴확률의 증가가 더디게 발생한 것으로 사료된다. 또한 FA 30 배합에서는 OPC 배합 대비 물-결합재 비의 경향이 적게 나타났으며 최대 3.2배 높은 확률론적 내구수명을 나타내었다.

Conflict of interest

None.

감사의 글

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

References

- ASTM C 1202. (2005). Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, American Society for Testing and Materials, USA.
- Berke, N.S., Hicks, M.C. (1994). Predicting chloride profiles in concrete, *CORROSION*, **50(3)**, 234–239.
- Bilodeau, A., Malhotra, V.M., Golden, D.M. (1998). Mechanical properties and durability of structural lightweight concrete incorporating high-volumes of fly ash, *ACI International*, **178**, 449–474.
- CEB. (2006). Model Code for Service Life Design. The International Federation for Structural Concrete(fib), Task Group 5.6.
- EN 1991. (2000). Eurocode 1: Basis of Design and Actions on Structures, CEN.
- KCI. (2012). Concrete Standard Specification–Durability Part, Korea Concrete Institute [In Korean].
- KDS 14 20 40. (2016). Standard for Durability Design of Concrete Structures, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea, 12–18 [In Korean].
- Kim, H.J., Yoon, Y.S., Yang, K.H., Kwon, S.J. (2019). Durability and purification performance of concrete impregnated with silicate and sprayed with photocatalytic TiO₂, *Construction and Building Materials*, **199(2019)**, 106–114.
- Kouloumbi, N., Batis, G., Malalmi, C. (1994). The anticorrosive effect of fly ash, slag and a greek pozzolan in reinforced concrete, *Cement & Concrete Composites*, **16(4)**, 253–260.
- Koyama, K., Hanada, J. (1998). Design guidelines for durability of concrete structures(Draft), *Journal of JSCE*, **585**, 199–203.
- KS L 5405. (2016). Fly Ash, Korea Standard Service Network, Korea, 1–8 [In Korean].
- Kwon, S.J. (2016). Effect of time-dependent diffusion and exterior conditions on service life considering deterministic and probabilistic method, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, **20(6)**, 65–72 [In Korean].
- 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.
- Lee, B.K., Kim, G.Y., Kim, G.T., Shin, K.S., Nam, J.S. (2017). Chloride ion penetration resistance of slag-replaced concrete and cementless slag concrete by marine environmental exposure, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **29(3)**, 299–306 [In Korean].
- Lee, J.W., Kim, K.M., Bae, Y.K., Lee, J.S. (2004). “Study on the field application according to the early strength of the concrete admixed with polycarboxylate superplasticizer,” Korea Concrete Institute academic conference, Korea Concrete Institute, Pyeongchang, Korea, 200–203 [In Korean].
- Metha, P.K., Monteiro, P.M. (2009). Concrete–Structure, properties, and materials, 2nd edition, Prentice Hall, New–Jersey, 113–178.
- Moon, H.Y., Kim, H.S., Lee, S.T. (2002). Examination on the deterioration of concrete due to seawater attack, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, **22(1A)**, 171–179 [In Korean].
- Nath, P., Sarker, P. (2011). Effect of fly ash on the durability properties of high strength concrete, *Procedia Engineering*, **14**, 1149–1156.
- Oh, K.S., Moon, J.M., Park, K.T., Kwon, S.J. (2016). Evaluation of load capacity reduction in RC beam with corroded FRP hybrid bar and steel, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, **20(2)**, 10–17 [In Korean].
- Polder, R.B., van der Wegen, G., Boutz, M. (2007). “Performance based guideline for service life design of concrete for civil engineering structures – A proposal discussed in the Netherlands,” International RILEM Workshop on Performance Based Evaluation and Indicators for Concrete Durability, Madrid, Spain, 31–39.
- SERI. (2003). Evaluation of Chloride Ion Diffusion Characteristics of High Durability Concrete, Samsung Engineering Research Institute, Final Report [In Korean].
- 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 Structures*, **29(7)**, 1457–1464.
- Tang, L., Nilsson, L.O. (1992). Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field, *ACI Materials Journal*, **89(1)**, 49–53.
- 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, Life 365 Manual, SFA, 2–28.
- Yang K.H., Mun, J.H., Yoon, Y.S., Kwon, S.J. (2018). Effects of

loading conditions and cold joint on service life against chloride ingress, *Computers and Concrete*, **22(3)**, 319–326.
 Yoon, Y.S., Hwang, S.H., Kwon, S.J. (2019). Evaluation of chloride diffusion characteristics in concrete with fly ash cured for 2 years, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **7(1)**, 8–15 [In Korean].
 Yoon, Y.S., Kwon, S.J. (2018). Evaluation of time-dependent

chloride resistance in HPC containing fly ash cured for 1 year, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, **22(4)**, 52–59 [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(2018)**, 1005–1015.

장기재령 FA 콘크리트에 대한 염화물 거동 및 확률론적 염해 내구수명 평가

본 연구에서는 3가지 수준의 물-결합재 비를 고려한 OPC 및 FA 콘크리트를 대상으로 재령 1,095일에 촉진 염화물 확산 시험을 수행하였다. Tang’s method 및 ASTM C 1202에 준하여 촉진 염화물 확산계수 및 통과 전하량을 평가하였으며 시간의 존적으로 개선되는 염화물 확산 거동을 고찰하였다. FA 배합에서는 포졸란 반응에 의해 뛰어난 염해저항성을 나타냈는데, 통과 전하량 평가 결과에 따르면 FA 콘크리트는 재령 1,095일에 “Low” 등급에서 “Very low” 등급으로 감소하였으나, OPC 배합의 경우 “Moderate” 등급에서 “Low” 등급으로 감소하였다. 염해 내구수명 해석 시 사용되는 설계변수를 정규분포 함수로 가정한 후, MCS를 기반으로 각 배합의 내구수명을 확률론적 해석 방법으로 평가하였다. FA 콘크리트에서는 OPC 콘크리트 대비 시간의 증가에 따른 내구적 파괴확률의 증가가 낮게 나타났는데 이는 FA 콘크리트의 시간의존성지수가 OPC 배합 대비 최대 3.2배 높기 때문이다. 또한 목표 내구적 파괴확률을 10%로 설정하였기 때문에 확률론적 해석에 의한 내구수명이 결정론적 해석에 의한 내구수명보다 낮게 평가되었다. 다양한 환경 하의 실태조사 및 실내 시험을 통해 각 구조물에 적합한 목표 내구적 파괴확률을 설정한다면 더욱 경제적인 내구성능 설계가 가능해지리라 사료된다.