

장기 재령 GGBFS 콘크리트의 염화물 확산 거동 평가 및 확률론적 염해 내구수명 해석

윤용식¹, 김태훈², 권성준^{3*}

Evaluation of Chloride Diffusion Behavior and Analysis of Probabilistic Service Life in Long Term Aged GGBFS Concrete

Yong-Sik Yoon¹, Tae-Hoon Kim², Seung-Jun Kwon^{3*}

Abstract: In this study, three levels of W/B(Water to Binder) ratio (0.37, 0.42, 0.47) and substitution ratio of GGBFS (Ground Granulated Blast Furnace Slag) rate (0 %, 30 %, 50 %) were considered to perform RCPT (Rapid Chloride Diffusion Test) at the 1,095 aged day. Accelerated chloride diffusion coefficient and passed charge of each concrete mixture were assessed according to Tang's method and ASTM C 1202, and improving behaviors of durability performance with increasing aged days are analyzed based on the test results of previous aged days from the preceding study. As the age of concrete increases, the passed charge and diffusion coefficient have been significantly reduced, and especially the concrete specimens containing GGBFS showed a significantly more reduction than OPC(Ordinary Portland Cement) concrete specimen by latent hydraulic activity. In the case of OPC concrete's results of passed charge, at the 1,095 days, two of them were still in the "Moderate" class. So, if only OPC is used as the binder of concrete, the resistance performance for chloride attack is weak. In this study, the time-parameters (m) were derived based on the results of the accelerated chloride diffusion coefficient, and the deterministic and probabilistic analysis for service life were performed by assuming the design variable as a probability function. For probabilistic service life analysis, durability failure probabilities were calculated using Monte Carlo Simulation (MCS) to evaluate service life. The service life of probabilistic method were lower than that of deterministic method, since the target value of PDF (Probability of Durability Failure) was set very low at 10 %. If the target value of PDF suitable for the purpose of using structure can be set and proper variability can be considered for each design variable, it is believed that more economical durability design can be made.

Keywords: Chloride resistance performance, GGBFS, Service life, Probabilistic analysis

1. 서론

콘크리트는 고내구성의 건설재료이지만 가혹한 노출환경에 장기간 노출되는 경우 열화 현상이 발생한다. 콘크리트의 열화 현상으로는 염해, 탄산화, 동결융해, 황산염에 의한 침식 등이 있다(Metha and Monteiro, 2009; KCI, 1996).

그 중 염해의 경우 철근콘크리트(RC : Reinforced Concrete) 구조물에 직접적인 영향을 미치지 않지만 내부로 염소이온(Cl⁻)이 확산하여 매립된 보강재의 부식을 야기하는 현상을 말한다. 염해에 의해 철근부식이 발생하는 경우 피복 콘크리트의 박락으로 인해 구조물의 미관상 문제가 발생할 뿐만 아니라 구조물의 내하력 저하로 인해 구조적 문제가 발생한다

(Korea Expressway Corporation, 2002; Oh et al., 2016). 염해의 원인으로는 양질의 천연골재 수급 문제, 특수 환경에 구조물이 시공되는 경우, 염분제거가 완전히 이루어지지 않은 해사의 사용 등이 보고되어왔다(KCI, 1996). 특히 우리나라의 경우 삼면이 바다에 접하고 있는 지리적 특성을 갖고 있어 해안 인근 지역에 활발히 국가 기반 시설물이 시공되고 있는 실정이기 때문에 염해에 대한 고려가 필수적이다(Moon et al., 2002; Kirpatrick et al., 2002).

이러한 염해에 대한 열화 현상을 제어하고자 다양한 연구가 진행되어왔는데, 그중에서도 OPC (Ordinary Portland Cement)를 고로슬래그 미분말(GGBFS : Ground Granulated Furnace Slag) 및 플라이애시(FA : Fly Ash) 등과 같은 혼화재료로 콘크리트에 치환 혼입하여 사용하는 방법이 효과적으로 알려져 있다(Nath and Sarker, 2011; Jau and Tsay, 1998)

혼화재료로서 가장 활발히 사용되고 있는 고로슬래그 미분말은 시멘트의 수화 반응에서 생성된 수산화칼슘(Ca(OH)₂)과 잠재수경성 반응을 일으켜 콘크리트의 장기 내구성능을 향상시킨다. 또한 시멘트나 다른 혼화재료 보다 자유 염화물

¹ 정희원, 한남대학교 건설시스템공학과 박사과정

² 정희원, 한남대학교 건설시스템공학과 석사과정

³ 정희원, 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 2020년 7월 31일까지 학회로 보내주시면 2020년 8월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

흡착능이 뛰어나 염해 제어에 효과적인 혼화재료로 알려져 있다(Metha and Monteiro, 2009; Kouloumbi et al., 1994).

국내 콘크리트구조 내구성 설계기준에서는 염해 내구성능 평가에 Fick's 2nd law를 기반으로 한 지배방정식이 사용되고 있으며, 철근이 매립된 위치에서의 염화물 이온의 농도가 임계 염화물 농도와 같아지는데 걸리는 시간을 염해 내구수명으로 산정하고 있다(KDS 14 20 40, 2016). Fick's 2nd law에 의해 염해내구성능을 평가하는 경우 겉보기 염화물 확산계수와 표면 염화물량이 입력되는데, 이 값들은 장기 침지 실험을 통해 도출된다(Kirpatrick et al., 2002). 표면 염화물량의 경우 노출 기간의 평방근에 비례한다고 알려져 있으며, 겉보기 염화물 확산계수의 경우 노출 기간 및 혼화재에 의한 영향에 지배적인 것으로 알려져 있다(Thomas and Bamfroth 1999; Kim et al 2016).

확률론적 내구수명 해석은 각 설계변수를 상수로 고려하지 않고 변동성이 고려된 확률변수로 고려하여 내구수명을 해석하는 방법을 의미한다. 따라서 목표 내구수명 동안 철근의 위치에서의 염화물량이 임계 염화물량보다 클 확률을 제어하는 해석 방법이다(Kwon, 2016). 확률론적 해석에서는 결정론적 해석 방법과 동일한 지배방정식을 사용하지만 매우 보수적인 결과 값이 도출되는데 이는 7%~10%의 매우 낮은 목표 내구성 파괴확률이 설정되기 때문이다(Kwon et al., 2009; CEB, 2006; EN 1991, 2000).

본 연구에서는 재령 1,095일의 GGBFS 및 OPC 콘크리트를 대상으로 축진 염화물 확산 시험을 수행하였다. 대상 콘크리트 시편은 3가지 수준의 물-결합재 비 및 GGBFS 치환률이 고려되었다. 또한 이전 재령일에서 동일 배합의 공학적 성능을 다룬 선행 연구 결과를 (SERI, 2003; Park et al., 2018; Yoon et al., 2019) 인용하여 재령의 증가에 따라 변화하는 염화물 확산 및 압축강도 거동을 분석하였다. 그 후 축진 염화물 시험 결과를 바탕으로 기존의 연구를 참고하여 염해 내구수명을 결정론 및 확률론적 방법으로 해석하였다. 콘크리트구조 내구성 설계기준에 따라 Fick's 2nd law에 준하여 각 내구수명 해석을 수행하였으며, 확률론적 내구수명 해석을 위해 해석 변수를 정규분포 함수로 가정하였다. 시간의 증가에 따라 증가하는 각 배합의 파괴확률 증가 거동을 분석하였으며, 결정론 및 확률론적 내구수명 간의 차이를 정량적으로 분석하였다.

2. 사용 재료 및 시험 방법

2.1 사용 재료 및 배합

본 연구에서는 3가지 수준의 GGBFS 치환률 및 물-결합재 비를 고려하여 콘크리트 배합을 수행하였다. 본 연구의 배합

표를 Table 1에, Table 2 및 Table 3에 본 배합에 사용한 골재 및 감수제의 특성을 나타내었다. 본 연구에서는 폴리카본산계 감수제를 사용하였는데 이 감수제는 우수한 슬럼프 유지 및 조기강도 발현 성능을 갖고 있다(Oh et al., 2004).

Table 1 Mix proportions for this study

	W/B (%)	Unit weight(kg/m ³)					S.P (%)
		W	C	GGBFS FS	Fine Agg.	Coarse Agg.	
OPC	37	168	454	0	767	952	1.10
	42	168	400	0	787	976	1.00
	47	168	357	0	838	960	0.95
GGBFS 30	37	168	318	136	762	946	1.30
	42	168	280	120	783	972	1.10
	47	168	250	107	835	956	1.00
GGBFS 50	37	168	227	227	760	943	1.40
	42	168	200	200	780	969	1.20
	47	168	179	179	832	853	1.10

W/B : Water to Binder ratio, W : Water, C : Cement, GGBFS : Ground Granulated Blast Furnace Slag, S.P : Super Plasticizer

Table 2 Physical properties of fine and coarse aggregate

Items	G _{max} (mm)	Specific gravity (g/cm ³)	Absorption (%)	F.M.
Fine aggregate	-	2.58	1.01	2.90
Coarse aggregate	25	2.64	0.82	6.87

F.M. : Fineness Modulus

Table 3 Properties of super-plasticizer

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

2.2 축진 염화물 확산 거동 평가 방법

2.2.1 축진 염화물 확산계수 평가 방법

3 수준의 물-결합재 비 및 GGBFS 치환률을 고려한 콘크리트 시편의 축진 염화물 확산계수를 평가하고자 Tang's method에 준하여 축진 염화물 확산 실험을 수행하였다. 이 시험방법은 전기적 이동과 확산을 동시에 고려하여 이론상 가장 합리적이고 비정상상태의 확산계수를 구할 수 있다는 장점이 있다. Fig. 1에 Tang's method 모식도 및 실험 조건을 나타내었다.

8 시간동안 30 V의 전압을 인가한 후 시편을 할렬하여 쪼개진 부분에 0.1 N의 질산은(AgNO₃) 수용액을 분무하여 비색법으로 염화물 이온의 침투 깊이를 측정하였다(Tang and Nilson, 1992).

이전 재령일(180일~730일)의 촉진 염화물 시험 결과는 동일 배합을 대상으로 수행된 선행 연구에서 인용하였다(Park et al., 2018; Yoon et al., 2019). 또한 선행 연구에서는 다량의 시편을 제작하는 과정에서 양생 및 운반의 문제가 발생하여 재령 28일에 촉진 염화물 확산계수 및 통과 전하량 평가를 실시하지 못하였다. 따라서 재령 28일의 촉진 염화물 확산계수 결과는 과거에 본 연구의 배합과 동일 배합을 대상으로 수행된 연구에서 인용하여 사용하였다(SERI, 2003).

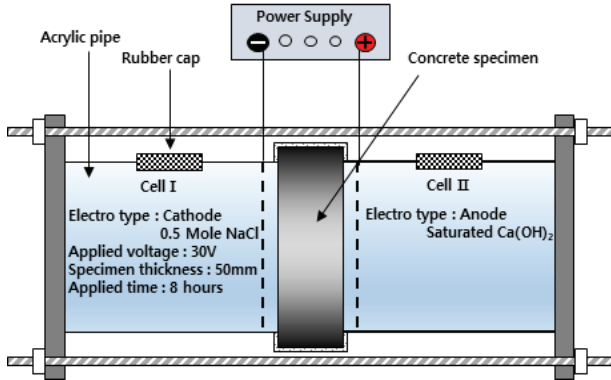


Fig. 1 Test diagram and conditions for Tang's method

Tang's method 시험 방법에 준하여 평가한 각 배합의 평균 염화물 이온 침투 깊이를 식 (1) 및 식 (2)에 적용하여 촉진 염화물 확산계수를 도출하였다.

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

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

여기서, D_{rcpt} 는 비정상상태에서의 촉진 염화물 확산계수 (m^2/sec), R 은 기체상수 ($8.314 J/mol \cdot K$), T 는 절대온도 (K), L 은 시편두께 (m), z 는 이온전자가 (1.0), F 는 패러데이상수 ($96,500 J/V \cdot mol$), U 는 전위차 (V), x_d 는 비색법에 의한 침투 깊이 (m), t 는 전위차의 적용시간 (sec), C_d 는 비색법에 의한 반응농도 (mol/l), C_0 는 음극 Cell의 염소이온농도 (mol/l)를 나타낸다.

2.2.2 통과 전하량 평가 방법

ASTM C 1202에서는 결과 값인 통과 전하량을 통해 촉진 염화물 확산계수를 경험식으로 도출할 수 있지만, 본질적으로는 단순히 침투저항성만을 정성적으로 평가하는 실험 방법이다.

전반적인 시험의 모식도는 2.2.1절의 Tang's method(Fig. 1)와 비슷하지만 실험 조건은 다르다. 에폭시가 도포된 디스크 시편을 대상으로 Cell I(음극)에는 3%의 염화나트륨(NaCl) 수용액을, Cell II(양극)에는 0.3 M 수산화나트륨(NaOH) 수용액을 적용하여 6 시간동안 60 V의 전압을 인가하였다. 통과 전하량 평가 전경을 Fig. 2에 나타내었다. 전압을 인가하는 동안 30분 간격으로 통과 전류 값을 측정하여 아래의 식 (3)을 통해 통과 전하량을 산출하였다. ASTM C 1202에서는 Table 4와 같은 기준을 통해 통과 전하량으로 콘크리트의 염화물 확산 저항성을 평가한다(ASTM C 1202, 2005). 재령 28일의 통과 전하량 결과는 식 (4)와 같이 기존의 연구에서 제안된 상관식에 재령 28일 촉진 염화물 확산계수를 이용하여 도출하였다(Berke and Hicks, 1994).

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

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

$$Q_{total} = \left(\frac{D}{0.0103 \times 10^{-12}}\right)^{\frac{1}{0.84}} \quad (4)$$

여기서, Q 은 통과 전하량 (Coulomb), D 는 촉진 염화물 확산계수(m^2/sec)를 나타낸다.

Table 4 Evaluation standard of RCPT(ASTM C 1202, 2005)

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

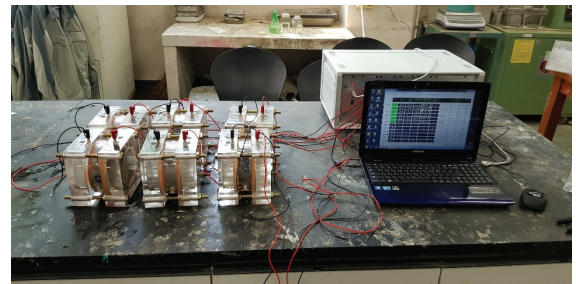


Fig. 2 The photo for ASTM C 1202

2.3 압축강도 평가 방법

재령 3년의 OPC 및 GGBFS 콘크리트 시편을 대상으로 KS F 2405에 준하여 압축강도를 평가하였다(KS F 2405, 2015). 또

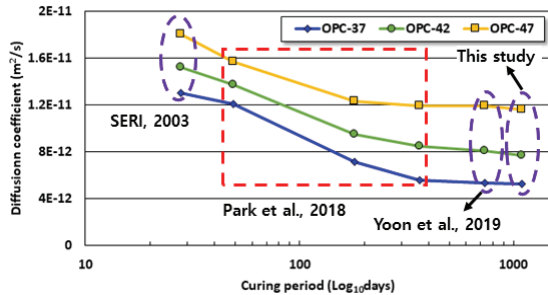
한 선행 연구에서 평가한 재령 2년까지의 압축강도 거동을 바탕으로 재령에 따라 증가하는 압축강도 거동을 분석하였다.

3. 촉진 염화물 확산 거동 및 압축강도 평가 결과

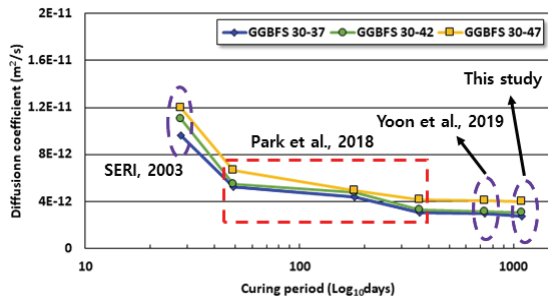
3.1 촉진 염화물 확산 거동 평가 결과

3.1.1 촉진 염화물 확산계수 평가 결과

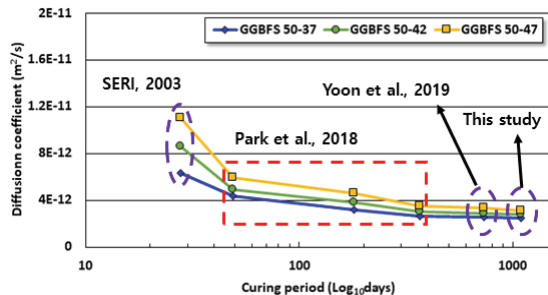
재령 1,095일에 각 배합의 촉진 염화물 확산계수를 평가하였으며 선행 연구의 이전 재령일(28일, 49일, 180일, 365일, 730일) 시험 결과를 인용하여 시간의존적으로 감소하는 각 배합의 촉진 염화물 확산계수 거동을 평가하였다. 각 배합의 촉진 염화물 확산계수 감소 거동을 Fig. 3에 나타내었다. 아래의 그래프들에서 배합 뒤 숫자는 물-결합재 비를 의미한다. 예를 들어 GGBFS 30-42는 물-결합재 비 42 %의 고로슬래그 미분말 30 % 치환 혼입 배합을 나타낸다.



(a) OPC



(b) GGBFS 30

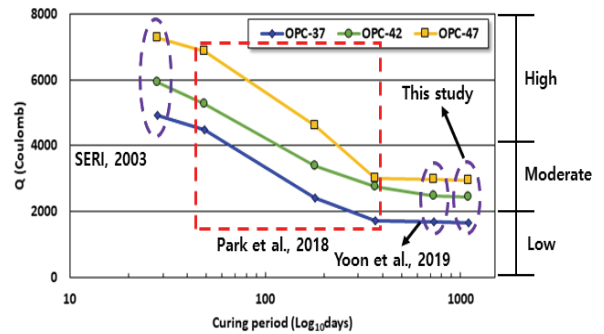


(c) GGBFS 50

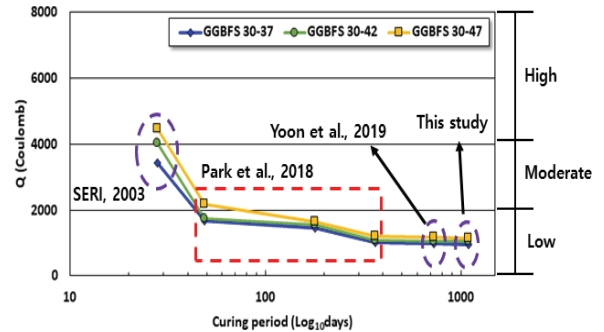
Fig. 3 The result of accelerated chloride diffusion coefficient

모든 배합에서 물-결합재 비가 낮을수록, 고로슬래그 미분말 혼입률이 높을수록 더 낮은 확산계수가 나타났다. 재령 28일 대비 최종 재령일인 1,095일에서의 확산계수 감소율은 OPC 배합의 경우 40.5 % ~ 64.3 %, GGBFS 30 배합의 경우 27.6 % ~ 33.4 %, GGBFS 50 배합의 경우 28.5 % ~ 38.7 %로 나타나 GGBFS 혼입 배합에서 재령일의 증가에 따라 더 큰 폭의 확산계수 감소가 나타났다. 이는 GGBFS 혼입에 따른 잠재수경성에 의한 추가 수화물 생성이 원인으로 사료된다.

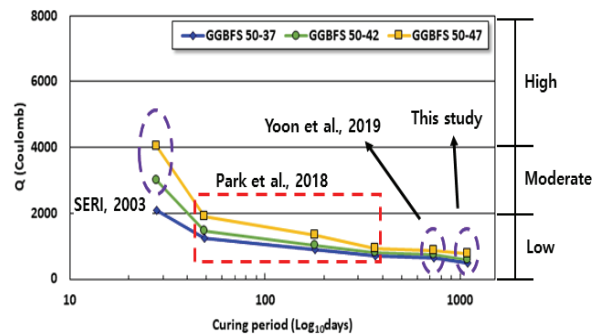
또한 재령 365일 이후에는 모든 배합에서 확산계수의 감소가 미미하게 발생하였으며, 최종 재령일인 재령 1,095일에서 OPC 배합 대비 GGBFS 30 배합은 34.4 % ~ 52.1 %, GGBFS 50 배합은 26.9 % ~ 46.3 %의 확산계수를 나타내었다.



(a) OPC



(b) GGBFS 30



(c) GGBFS 50

Fig. 4 The result of passed charge

3.1.2 통과 전하량 평가 결과

목표 재령일(재령 1,095일)에서 각 배합의 통과 전하량을 평가한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 선행 연구의 이전 재령일에서의 평가 결과와 함께 고찰하여 재령일의 증가에 따라 감소하는 통과 전하량 거동을 분석하였다.

3.1.1절의 촉진 염화물 확산계수 평가 결과와 본 절의 통과 전하량 평가 결과는 비슷한 거동을 나타내었는데 이는 두 시험 방법 모두 본질적으로 전기장 내의 염화물 이온의 이동속도에 지배적인 실험이기 때문으로 사료된다.

재령 28일 대비 최종 재령일인 1,095일에서의 확산계수 감소율은 OPC 배합의 경우 33.8%~41.1%, GGBFS 30 배합의 경우 25.7%~28.2%, GGBFS 50 배합의 경우 18.8%~24.0%로 나타나 GGBFS 치환 혼입률이 증가할수록 큰 폭의 통과

전하량 감소가 발생하였다.

통과 전하량 역시 재령 365일 이후에는 모든 배합에서 큰 감소가 발생하지 않았다. 최종 재령일인 재령 1,095일에서 OPC 배합 대비 GGBFS 30 배합은 39.1%~58.2%, GGBFS 50 배합은 24.3%~30.0%의 확산계수를 나타내어 OPC 배합 대비 뛰어난 염해 저항성을 나타내었다. 또한 재령 180일 이후 모든 GGBFS 혼입 배합은 “Low” 등급 이하에 해당되지만 OPC 배합의 경우 최종 재령일(1,095일)에서도 가장 낮은 물-결합재 비를 갖는 OPC-37 배합만 “Low” 등급에 포함되어 단일 결합재로 OPC 만을 사용하는 경우 염해에 취약한 것으로 사료된다.

3.2 압축강도 평가 결과

재령 28일, 49일, 180일, 365일, 730일의 압축강도 결과는 선행 연구에서 인용하였으며(Park et al., 2018, Yoon et al., 2019), 재령 1,095일의 압축강도 결과를 추가 평가하여 나타낸 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

재령 28일에서부터 GGBFS 배합은 OPC 배합 동등 이상의 강도를 나타내었는데, 이는 효과적인 감수제의 사용으로 인해 단위수량을 줄이면서 GGBFS의 잠재수경성이 활성화되었기 때문으로 사료된다. 재령 28일 대비 1,095일에서의 강도 증가율은 OPC 배합의 경우 144.2%~167.8%, GGBFS 30 배합의 경우 137.0%~151.9%, GGBFS 50 배합의 경우 134.8%~147.5%로 평가되었다. 압축강도의 경우 GGBFS 30 배합과 GGBFS 50 배합 간에 큰 강도 차이가 나타나지 않았다. 강도 증가율의 경우 OPC 배합에서 가장 높은 값이 나타났는데 이는 재령 28일에서 GGBFS 혼입 배합은 OPC 배합 대비 높은 강도 값을 나타내었기 때문으로 사료된다.

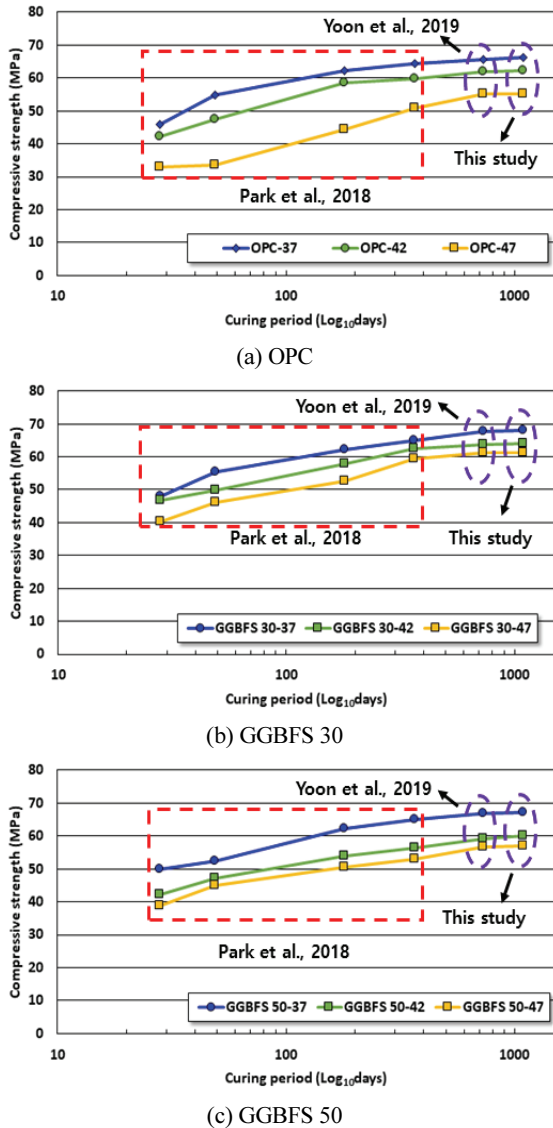


Fig. 5 The result of compressive strength

4. 해석 변수의 변동성을 고려한 GGBFS 콘크리트의 확률론적 염해 내구수명 해석

4.1 염해 내구수명 평가 방법 및 MCS (Monte Carlo Simulation)을 이용한 파괴 내구성 확률 해석 방법

4.1.1 염해 내구수명 평가 방법

본 절에서는 콘크리트구조 내구성 설계기준에 준하여 염해 확률론 및 결정론적 내구수명 해석을 수행하고자 한다(KDS 14 20 40, 2016). 결정론 및 확률론적 내구수명 해석 모두 지배방정식으로 Fick's 2nd law를 사용하며, 결정론적 내구수명에서는 피복두께에서의 염화물량이 임계 염화물량에 도달하는 기간을, 확률론적 내구수명 해석에서는 피복두께에서의 염화

물량이 임계 염화물량을 초과하는 확률을 계산하여 내구수명을 산정한다. 염해 내구성능 평가에 사용되는 지배방정식을 식(5)에 나타내었다.

$$C_d - C_i = (C_s - C_i) \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_d t}} \right) \right) \quad (5)$$

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.

본 연구에서는 초기 염화물 이온의 양을 “0”으로 가정하였다. 유효 겉보기 염화물 확산계수는 일반적인 확산계수 감소 한계인 30년을 기준으로 산정식이 나온다. 유효 겉보기 염화물 확산계수 산정 식을 식(6), 식(7)에 나타내었다.

$$D_p = \frac{D_R}{1-m} \left(\frac{t_R}{t} \right)^m \quad (t < 30 \text{년 인 경우}) \quad (6)$$

$$D_p = \frac{D_R}{1-m} \left[(1-m) + m \frac{t_c}{t} \right] \left(\frac{t_R}{t_c} \right)^m \quad (t \geq 30 \text{년 인 경우}) \quad (7)$$

여기서, D_R 은 기준시간에서의 염화물 확산계수, t_R 은 기준 시간(28일 = 0.077년), t_c 는 확산계수 감소한계(30년), m 은 시간의존성지수를 나타낸다.

4.1.2 시간의존성지수 (m) 평가

시간의존성지수는 재령의 증가에 따라 감소하는 확산계수의 정도를 나타내는 값인데, 혼화재료의 종류 및 치환률 그리고 물-결합재 비의 증감에 의해 변화하는 것으로 알려져 있다 (Park et al., 2018). 식 (6) 및 식 (7)에서 정의하는 시간의존성지수는 본 연구의 촉진 염화물 시험 결과를 기반으로 기존의 문헌을 참고하여 산출하였다(Thomas and Bentz, 2002).

먼저, 4.1.1절과 Life-365의 시간의존성지수 모델에서 사용하는 염화물 확산계수는 겉보기 염화물 확산계수이므로 본 연구의 3.1.1절 촉진 염화물 확산계수 결과를 기존의 연구 결과에서 도출된 식 (8)을 참고하여 겉보기 염화물 확산계수로 변환하였다(Polder et al., 2007).

$$D_{rcpt} = 1.16D_{app} + 0.32 \times 10^{-12} \quad (R^2 = 0.96) \quad (8)$$

여기서, D_{rcpt} 는 촉진 염화물 확산계수(m^2/s)를, D_{app} 는 겉보기 염화물 확산계수(m^2/s)를 나타낸다.

Life 365의 시간의존성지수 모델을 식 (9)에 나타내었다. 식 (9)는 Log 관계를 활용하여 식 (10)과 같이 나타낼 수 있으며 이를 활용해 회귀분석으로 시간의존성지수를 산출할 수 있다. Fig. 6에 GGBFS 50-37 배합의 회귀분석 그래프를 나타내었다. 이 그래프의 기울기는 시간의존성지수를 의미한다.

$$D_t = D_{ref} \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^m \quad (9)$$

$$\operatorname{Log} \left(\frac{D_t}{D_{ref}} \right) = m \times \operatorname{Log} \left(\frac{t_{ref}}{t} \right) \quad (10)$$

여기서, D_{ref} 는 기준시간 (t_{ref})에서의 겉보기 염화물 확산계수 (m^2/s), D_t 는 시간 (t)에서의 겉보기 염화물 확산계수 (m^2/s)를 m 은 시간의존성지수를 나타낸다.

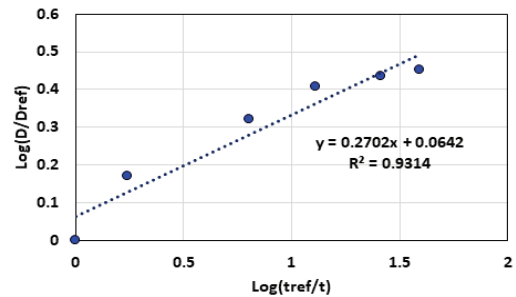


Fig. 6 The representative result of regression analysis for time-parameter(m)

위와 같은 방법을 통하여 모든 배합의 시간의존성지수를 산출하였으며 이를 Table 5에 나타내었다.

Table 5 The results of time-parameter by regression analysis

Value	Time-parameter (m)	R^2
OPC-37	0.287	0.95
OPC-42	0.201	0.96
OPC-47	0.120	0.87
GGBFS30-37	0.332	0.90
GGBFS30-42	0.335	0.87
GGBFS30-47	0.284	0.84
GGBFS50-37	0.270	0.93
GGBFS50-42	0.301	0.89
GGBFS50-47	0.326	0.89

4.1.3 MCS를 활용한 내구성파괴확률 해석

확률론적 내구수명 해석에서는 결정론적 방법과 같은 지배 방정식을 사용하지만 목표 내구성 확률에 따라 내구수명이 결정된다. Fig. 6에 확률론적 내구수명 해석의 개요를 나타내

었다(Kwon, 2016). Fig. 7에서 열화외력(S_t)는 시간에 따라 증가하는 외부로부터 유입되는 염화물량을 의미하며, 저항내력은(R_t) 임계 염화물량을 의미한다(Kwon, 2016).

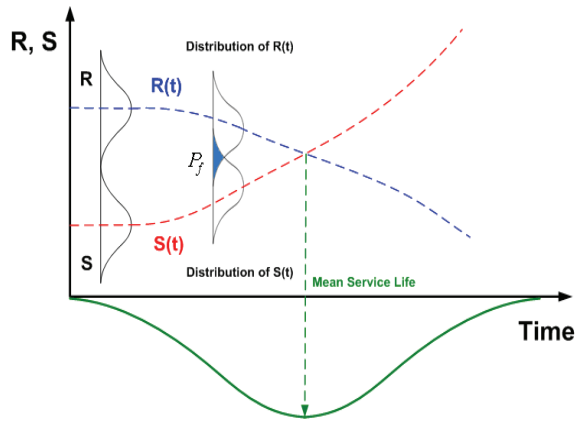


Fig. 7 Service life analysis flow chart by MCS(Kwon, 2016)

본 연구에서는 확률론적 내구수명 해석을 위해 결보기 염화물 확산계수, 표면 염화물량, 시간의존성지수, 피복두께, 임계 염화물량을 확률변수로 고려하였다. 식 (11)에 확률론적 염해 내구수명 해석의 지배 방정식을 나타내었으며 Fig. 8에 MCS (Monte Carlo Simulation)에 의한 확률론적 내구수명 해석 흐름도를 나타내었다.

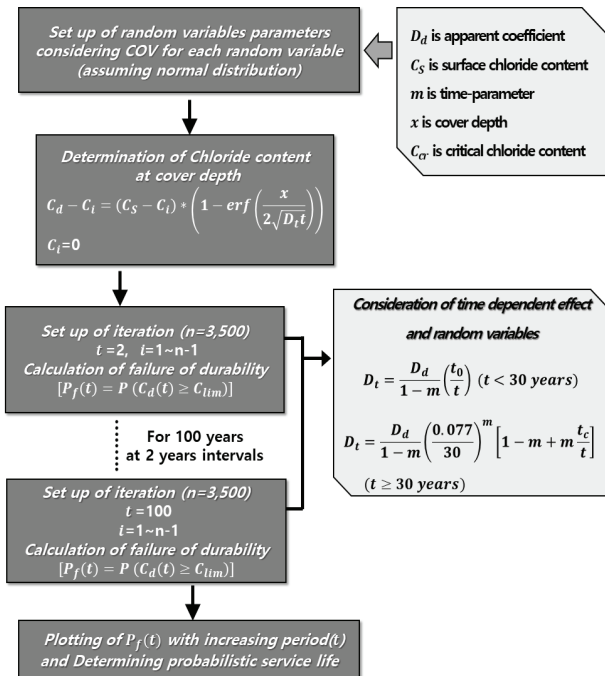


Fig. 8 Service life analysis flow chart by MCS

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

여기서, $C_{cr}(\mu, \sigma)$ 는 임계염화물량의 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 내구성 파괴확률로서 본 연구에서는 기존의 연구를 참고하여 10 %로 설정하였다(Kwon et al., 2009; CEB, 2006; EN 1991, 2000).

4.1.4 확률론적 염해 내구수명을 위한 해석 변수 설정

본 연구에서는 재령 28일 결보기 염화물 확산계수, 표면 염화물량, 시간의존성지수, 피복두께, 임계 염화물량을 정규분포 함수로 정의하였으며 이를 Table 6에 나타내었다. 각 배합의 결보기 염화물 확산계수는 본 연구의 촉진 염화물 확산계수 결과와 기존 연구에서 발표된 상관식(식 (8))을 이용하여 도출하였으며, 시간의존성지수는 4.1.2절과 같이 산출하였다. 또한 표면 염화물량 및 임계 염화물량은 콘크리트 표준 사양서에 준하여 설정하였는데 표면 염화물량의 수준은 남해안 비탈대지역을 가정하여 설정하였다(KCI, 2012).

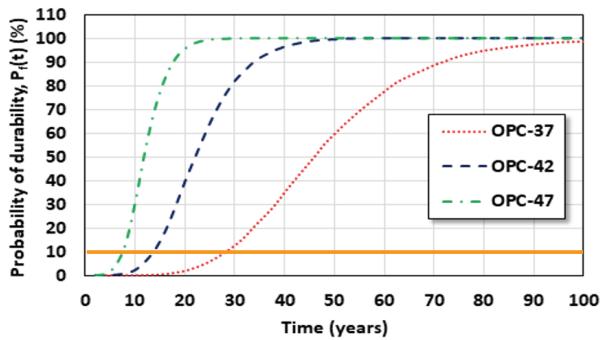
Table 6 The analysis parameter for service life of chloride attack

Value	D ($\times 10^{-12}/\text{m}^2/\text{s}$)	m	C_s (kg/m^3)	C_{lim} (kg/m^3)	Cover depth (cm)
OPC-37	N(10.94,0.1)	N (0.287,0.1)			
OPC-42	N(12.83,0.1)	N (0.201,0.1)			
OPC-47	N(15.31,0.1)	N (0.120,0.1)			
GGBFS 30-37	N(8.00,0.1)	N (0.332,0.1)			
GGBFS 30-42	N(9.21,0.1)	N (0.335,0.1)	N (5.0,0.1)	N (1.2,0.1)	N (10.0,0.1)
GGBFS 30-47	N(10.07,0.1)	N (0.284,0.1)			
GGBFS 50-37	N(5.16,0.1)	N (0.270,0.1)			
GGBFS 50-42	N(7.14,0.1)	N (0.301,0.1)			
GGBFS 50-47	N(9.21,0.1)	N (0.326,0.1)			

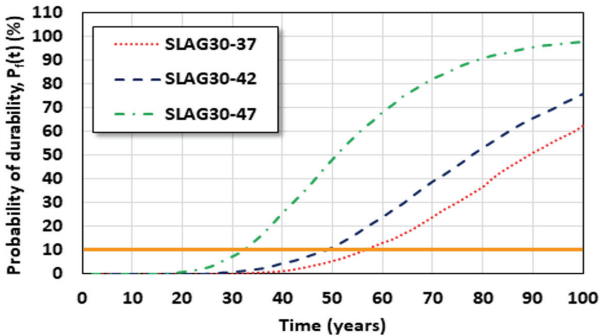
4.2 MCS를 활용한 확률론적 염해 내구수명 해석 결과

본 절에서는 Fick's 2nd law에 준한 염해 확률론적 내구수명 해석을 수행하였으며 각 배합의 시간에 따라 증가하는 파괴 확률을 Fig. 9에 나타내었다.

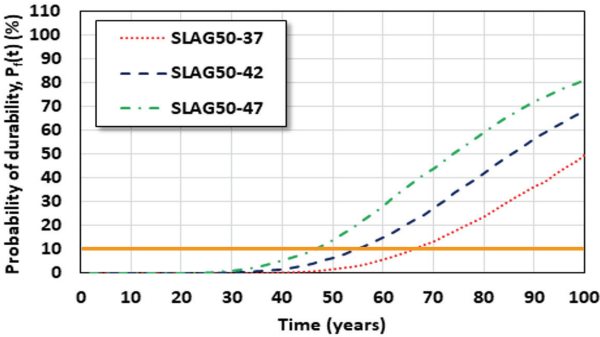
시간의 증가에 따른 파괴확률 증가 거동은 OPC 배합과



(a) OPC



(b) GGBFS 30



(c) GGBFS 50

Fig. 9 The results of analysis for probabilistic service life by MCS

GGBFS 혼입 배합 간에 차이가 나타났으며 GGBFS를 혼입하는 경우 OPC 배합 대비 파괴확률이 완만하게 증가하였다. 또한 물-결합재 비가 높을수록 파괴확률이 빠르게 증가하였다.

목표 내구성 파괴확률을 10%로 설정하는 경우, OPC 배합에서는 7.5년~28.1년, GGBFS 30 배합에서는 32.0년~56.5년, GGBFS 50 배합에서는 46.5년~65.8년의 내구수명이 나타났다. GGBFS 혼입 배합에서는 OPC 배합 대비 낮은 확산계수를 갖고있을 뿐만 아니라 높은 시간의존성지수를 갖고 있으므로 시간의 증가에 따라 확산계수의 감소가 크게 일어나 파괴확률 증가가 OPC 배합 대비 느리게 일어났다. 결정론적 방법을 이용하여 도출된 내구수명과 확률론적 방법에 의한 내구수명 간의 비교 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

모든 배합에서 결정론적 해석이 확률론적 해석 보다 높은

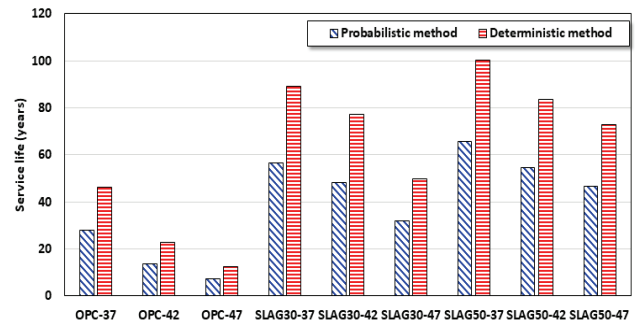


Fig. 10 The results of probabilistic and deterministic service life

내구수명을 나타내었다. 이는 확률론적 해석에서 확률변수의 변동성을 고려하지만 목표 파괴확률을 10%로 설정하였기 때문이다. 확률론적 내구수명은 결정론적 내구수명 대비 OPC 배합의 경우 59.1%~60.6%, GGBFS 30 배합의 경우 62.6%~64.0%, GGBFS 50 배합의 경우 63.9%~65.5%의 감소율을 나타내어 GGBFS 혼입률이 높을수록 두 방법 간 내구수명 차이가 크게 나타났다. 또한 물-결합재 비 역시 내구수명에 지배적인 영향을 나타내었는데, OPC 배합의 경우 최대 3.7배, GGBFS 30 배합의 경우 최대 1.8배, GGBFS 50 배합의 경우 최대 1.4배의 내구수명 차이를 나타내어 OPC 배합에서 물-결합재 비가 더 큰 영향력을 나타내었다.

추가적인 연구를 통해 각 설계인자별로 적절한 변동성을 고려하고 구조물의 특성에 따라 적절한 목표 파괴확률을 정의한다면 경제적인 내구성 설계를 수행할 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 장기재령 GGBFS 혼입 콘크리트를 대상으로 염화물 확산 거동을 평가하였으며 시간의존적으로 변화하는 내구성능 거동을 분석하였다. 또한 실험 결과 및 기존의 연구 결과를 바탕으로 결정론 및 확률론적 내구수명 해석을 수행하였는데, 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- 1) 재령 1,095일에 축진 염화물 확산계수를 평가한 결과, 재령 28일 대비 1,095일에서의 확산계수 감소율이 OPC 배합에서는 40.5%~64.3%, GGBFS 30 배합에서는 27.6%~33.4%, GGBFS 50 배합에서는 28.5%~38.7%로 나타났다. GGBFS의 잠재수경성 반응에 따라 생성된 추가적인 수화물에 의해 큰 폭의 확산계수 감소가 발생한 것으로 사료된다. 또한 재령 365일 이후에는 모든 배합에서 큰 폭의 확산계수 감소가 발생하지 않았다.

- 2) ASTM C 1202에 준하여 각 배합의 통과 전하량을 평가한 결과, 촉진 염화물 확산계수 거동과 매우 비슷한 거동을 나타내었는데 이는 두 시험 방법 모두 전기장 내 염소 이온 속도에 지배적인 전기적 촉진 시험 방법이기 때문이다. 재령 180일 이후 GGBFS 30 및 GGBFS 50 배합에서는 “Low” 등급 이하에 해당되지만 OPC 배합의 경우 OPC-37 배합을 제외한 나머지 배합은 “Moderate” 등급에 포함되어 결합재로 OPC 만을 단독으로 사용하는 경우 염해에 매우 취약한 것으로 판단된다.
- 3) 본 연구에서는 각 배합의 촉진 염화물 확산 시험 결과를 기반으로 시간의존성지수를 산정하였으며, 내구수명 해석에 필요한 입력 변수를 정규분포 함수로 가정하여 확률론적 내구수명 해석을 수행하였다. GGBFS를 혼입한 배합에서는 OPC 배합 대비 높은 시간의존성지수를 갖기 때문에 파괴확률이 완만하게 증가하였다. 또한 물-결합재 비는 내구성 파괴확률 증가 거동에 큰 영향력을 미치는 것으로 나타났다. 결정론적인 방법보다 확률론적 방법에서 낮은 내구수명을 나타내었는데 이는 파괴확률을 비교적 낮게 설정하였기 때문이다. 추가적인 연구를 통해 각 설계인자별로 적절한 수준의 변동계수를 설정하고 구조물의 용도에 적합한 목표 파괴확률을 설정한다면 경제적인 염해 내구성능 설계가 가능해지리라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 정부의 지원으로 한국연구재단 중견연구지원사업의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다(NRF-2020 R1A2C2009462).

References

1. Metha, P. K., and Monteiro, P. M. (2009), Concrete-Structure, properties, and materials, 2nd edition, prentice Hall, New-Jersey, 113-171.
2. KCI(Korea Concrete Institute). (1996), Latest Concrete Engineering, Kimoondang, Seoul, 453-459.
3. Korea Expressway Corporation. (2002), Establishment of Management and Maintenance of Concrete Structure for Durability.
4. Oh, K. S., Park, K. T., and Kwon, S. J. (2016), Evaluation of Anti-Corrosion Performance of FRP Hybrid Bar with Notch in GGBFS Concrete, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 20(4), 51-58.
5. Moon, H. Y., Kim, H. S., and 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.
6. Kirkpatrick, T. J., Weyers, R. E., Anderson-Cook, C. M., and Sprinkel, M. M. (2002), Probabilistic Model for the Chloride-induced Corrosion Service Life of Bridge Decks, *Cement and Concrete Research*, 32(12), 1943-1960.
7. Nath, P., and Sarker, P. (2011), Effect of Fly Ash on the Durability Properties of High Strength Concrete, *Procedia Engineering*, 14, 1149-1156.
8. Jau, W. C., and 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.
9. Kouloumbi, N., Batis, G., and Malami, C. H. (1994), The anticorrosive effect of fly ash, slag and a Greek pozzolan in reinforced concrete, *Cement and Concrete Composites*, 16(4), 253-260.
10. KDS 14 20 40, (2016), Standard for Durability Design of Concrete Structures, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 12-18.
11. Thamoas, M. D. A., and Bamforth, P. B. (1999), Modelling Chloride Diffusion in Concrete Effect of Fly Ash and Slag, *Cement and Concrete Research*, 29(4), 487-495.
12. Kim, J., McCarter, W. J., Suryanto, B., Nanukuttan, S., Basheer, P. A. M., and Chrisp, T. M. (2016), Chloride ingress into marine exposed concrete: A comparison of empirical-and physically-based models, *Cement and Concrete Composites*, 72, 133-145.
13. 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.
14. Kwon, S. J., Na, U. J., Park, S. S., and Jung, S. H. (2009), Service life prediction of concrete wharves with early-aged crack: Probabilistic approach for chloride diffusion, *Structural Safety*, 31, 75-83.
15. CEB. (2006), Model code for service life design. The International Federation for Structural Concrete (fib), Task Group 5.6.
16. EN 1991. (2000), Eurocode 1: Basis of design and actions on structures, CEN.
17. SERI. (2003), Evaluation of chloride ion diffusion characteristics of high durability concrete, Samsung Engineering Research Institute, Final report.
18. Park, J. S., Yoon, Y. S., and Kwon, S. J. (2018), Relations Analysis between Strength and Time-parameter in High Performance Concrete Containing GGBFS Cured for 1 year, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 30(4), 게재예정
19. Yoon, Y. S., Cho, S. J., and Kwon, S. J. (2019), Prediction Equation for Chloride Diffusion in Concrete Containing GGBFS Based on 2-Year Cured Results, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 32(2), 1-9.
20. Oh, B.H., Kim, K.W., and Park, D.G. (2004), Study on The Concrete with Polycarboxylate Superplasticizer, *KCI 2004 Fall Conference*, Korea Concrete Institute (KCI), Seoul, 279-282.
21. Tang, L., and Nilsson, L. O. (1992), Rapid Determination of the Chloride Diffusivity in Concrete by Applying an Electrical Field, *ACI Materials Journal*, 89(1), 49-53.

22. 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.
23. Berke N. S., and Hicks, M. C. (1994), Predicting Chloride Profiles in Concrete, *CORROSION*, 50(3), 234-239.
24. KS F 2405. (2015), Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete, KSSN, 1-3.
25. Thomas, M. D, A., and Bentz, E. C. (2002), Computer Program for Predicting the Service Life and Life-cycle Costs of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides(Life365 Manual), SFA.
26. Polder, R. B., van der Wegen, G., and 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*, RILEM, Madrid, 31-39.
27. KCI. (2012), Concrete Standard Specification-Durability Part, Korea Concrete Institute.

Received : 03/25/2020

Revised : 04/23/2020

Accepted : 04/27/2020

요 지: 콘크리트 구조물의 주요 열화 현상 중 하나인 염해는 내부 보강재의 부식을 야기하여 최종적으로 구조적 문제를 야기한다. 본 연구에서는 3가지 수준의 물-결합재 비 (0.37, 0.42, 0.47) 및 GGBFS 치환률 (0 %, 30 %, 50 %)을 고려한 콘크리트를 대상으로 재령 1,095일에 촉진 염화물 확산 시험을 수행하였다. Tang's method와 ASTM C 1202에 준하여 각 배합의 촉진 염화물 확산계수 및 통과 전하량을 평가하였으며 선행 연구의 이전재령일 시험결과와의 고찰을 통해 재령의 증가에 따라 변화하는 내구성능 거동을 고찰하였다. 재령일이 증가함에 따라 통과 전하량과 확산계수는 크게 감소하였으며, 특히 GGBFS를 혼입한 배합에서는 잠재 수경성에 의해 OPC 배합 대비 큰 폭의 감소가 나타났다. 또한 OPC 배합의 통과 전하량 평가 결과의 경우, 재령 1,095일에서도 “Moderate“ 등급에 포함되는 배합이 존재하기 때문에 OPC를 단독으로 사용하는 경우 염해에 취약한 것으로 사료된다. 본 연구에서는 촉진 염화물 확산계수 평가 결과를 기반으로 시간의존성지수를 도출하고 설계변수를 확률함수로 가정하여 결정론 및 확률론적 내구수명 해석을 수행하였다. 확률론적 내구수명 해석 시에는 MCS (Monte carlo Simulation)을 이용하여 내구성 파괴확률을 계산하여 내구수명을 도출하였다. 확률론적 내구수명은 결정론적 내구수명 대비 낮은 값을 나타내었는데 이는 목표 파괴 확률을 10%로 매우 낮게 설정하였기 때문이다. 구조물의 용도에 적합한 목표 파괴확률을 설정하고 설계변수별로 적절한 변동성을 고려할 수 있다면 더욱 경제적인 설계가 가능해지리라 사료된다.

핵심용어 : 염해저항성능, 고로슬래그 미분말, MCS, 내구수명, 결정론적 해석, 확률론적 해석
