

해양 폭로 환경에 따른 GGBFS 콘크리트의 겉보기 염화물 확산계수 비교

윤용식¹, 정기찬², 권성준^{3*}

The Comparison of Apparent Chloride Diffusion Coefficients in GGBFS Concrete Considering Sea Water Exposure Conditions

Yong-Sik Yoon¹, Gi-Chan Jeong², Seung-Jun Kwon^{3*}

Abstract: In this study, the time-dependent chloride ingress behavior in GGBFS concrete was evaluated considering marine exposure conditions and the properties of concrete mixtures. The concrete mixture for this study had 3 levels of water to binder ratio and the substitution rate of GGBFS, and outdoor exposure tests were performed considering submerged area, tidal area, and splash area. According to the evaluation results of diffusion coefficient considering properties of concrete mixtures, as the substitution rate of GGBFS increased, the decreasing rate of the diffusion coefficient decreased based on exposure periods of 730 days(2 years). As the evaluation result of the diffusion behavior according to the marine exposure conditions, the diffusion coefficient was evaluated in the order of submerged area, tidal area, and splash area. In tidal area, a relatively high diffusion coefficient was evaluated due to the repetition of wet and dry seawater. In this study, the effects of GGBFS substitution rate on the decreasing behavior of apparent chloride diffusion coefficient was analyzed in consideration of exposure conditions and periods. Linear regression analysis was performed with apparent chloride diffusion coefficient as output value and GGBFS substitution rate as input value. After 730 days of exposure, the effect of GGBFS on diffusion coefficient was significantly reduced. Even for OPC concrete, after 730 days, the diffusion coefficient was as low as that of GGBFS concrete, so the gradient of the regression equation decreased significantly. It is thought that improved durability performance for chloride ingress can be secured before 730 days through the use of GGBFS.

Keywords: Outdoor exposure test, GGBFS, Chloride ingress, Apparent chloride diffusion coefficient

1. 서 론

RC 구조물의 대표적인 열화 현상 중 하나인 염해는 내부 매립된 강재의 부식을 야기하는 열화 현상이다. 초기에는 구조물의 표면에 녹물이 유출되는 등 심미적인 문제를 야기하는 수준이나, 최종적으로는 내하력 저하로 인한 구조적 문제를 야기한다(Metha and Monteiro, 2009; Yoon et al., 2018). 특히 우리나라는 3면이 바다로 둘러싸여 있는 지리적 특성상 염해에 취약한 환경 조건을 갖고 있으며, 해수 중 염소이온은 할로젠 이온 중 전파 속도가 가장 빠르고 강재의 부식을 야기하는 특징을 갖고 있다(Moon et al., 2002; Lee and James, 2014).

고로슬래그 미분말은 용광로에서 선철과 함께 생성되는 용

융슬래그를 물로 급랭시켜 얻은 수상의 수쇄슬래그를 건조시켜 미분쇄한 물질로서 공학적 안정성이 확보된 콘크리트 혼화재료이다. 이는 포틀랜드 시멘트 대비 높은 분말도를 갖고 있을 뿐만 아니라 잠재 수경성 반응을 통해 콘크리트 내부 공극 구조를 치밀하게 만들기 때문에 콘크리트의 공학적, 내구적 성능을 개선한다(Richardson et al., 2002; Yang et al., 2018). 또한 고로슬래그 미분말은 뛰어난 염소이온 고정화 능력을 갖고 있어 포틀랜드 시멘트 대비 효과적으로 자유 염소이온의 이동을 제한할 수 있다(Jau and Tsay, 1998; Kouloumbi et al., 1994).

국내의 경우, 콘크리트구조내구성 설계기준에서 Fick's 2nd 법칙을 지배방정식으로 하여 RC 구조물의 염해 내구성을 평가하고 있다. 이 지배방정식에는 표면 염화물량, 염화물 확산계수, 피복두께, 옥외 노출 기간, 초기 염화물량이 입력변수로서 사용되며, 이중 염화물 확산계수는 시간의존적으로 변화하는 값이기 때문에 염해 내구성 확보에 매우 중요한 인자이다(KCI, 2021; Nokken et al., 2006).

염화물 확산계수는 콘크리트의 배합 특성에 따라 다른 거동을 나타내며 전기적 촉진 시험 방법이나 장기 염수 침지 시

¹정회원, 한남대학교 토목환경공학과 박사후연구원

²정회원, 한남대학교 건설시스템공학과 석사과정

³정회원, 한남대학교 건설시스템공학과 교수

*Corresponding author: jjuni98@hannam.ac.kr

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

•본 논문에 대한 토의를 2022년 5월 31일까지 학회로 보내주시면 2022년 6월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

험을 통해 평가된다(Jung et al., 2018; Yoon and Kwon, 2019). 전기적 촉진 시험 방법은 시험 방법이 간단하고 짧은 시간 내에 콘크리트 배합 간의 염해 저항성을 비교 평가할 수 있다는 장점이 있으나, 실제 옥외 환경에서 평가된 확산계수 대비 큰 값을 나타내기 때문에 이 값을 이용하여 내구수명 평가 시 매우 보수적인 결과가 도출된다는 단점이 존재한다(Polder et al., 2007; Yoon et al., 2020). 또한 해양 환경에 노출된 RC 구조물의 경우 직접적으로 염수에 침지 되어있지 않더라도 조수간만이나 비래염분의 영향에 의한 열화가 발생할 수 있으며, 국내 내구성 설계 기준에서는 해안선으로부터의 거리에 따라 표면 염화물량을 규정하여 이를 고려하고 있다(KCI, 2021). 그러나 기존의 연구에 따르면 이러한 옥외 노출 조건의 변화에 따라 표면 염화물량 뿐만 아니라 염화물 확산계수 역시 다른 거동을 나타내며 이를 고려한 내구성 해석을 통해 합리적인 내구수명을 제안할 수 있다(Lee et al., 2017).

본 연구에서는 OPC (Ordinary Portland Cement) 및 GGBFS (Ground Granulated Blast Furnace Slag) 콘크리트를 대상으로 노출 기간 1,095일(3년), 1,460일(4년), 1,825일(5년)을 고려한 해양 환경 옥외 폭로 시험을 수행하여 노출 조건별 결보기 염화물 확산계수를 평가하였다. 동일 콘크리트 시편을 대상으로 180일(0.5년), 365일(1년), 730일(2년)의 노출 기간을 다룬 선행 연구의 결과와 함께 분석하여 시간의존적으로 변화하는 확산 거동을 분석하였다(Yoon et al., 2019). 또한 고로슬래그 미분말 치환률이 확산계수에 미치는 영향을 노출조건을 고려하여 회귀분석을 통해 정량적으로 평가하였다.

2. 해양 폭로 환경을 고려한 GGBFS 콘크리트의 염화를 확산 거동 평가 방법

2.1 GGBFS 콘크리트 배합 및 사용 재료의 특성

본 연구에서는 OPC 및 GGBFS 콘크리트 시편을 대상으로 국내 해양 환경을 고려한 옥외 폭로 시험을 수행하였으며 사용한 콘크리트 배합을 Table 1에 나타내었다. 본 연구의 콘크리트 배합은 이전 평가 기간을 다룬 선행 연구와 마찬가지로 3 가지 수준의 고로슬래그 미분말 치환률(0, 30, 50%) 및 물-결합재 비(0.37, 0.42, 0.47)를 고려하였으며, Table 2 및 Table 3에 본 배합에 사용한 골재 및 감수제의 특성을 나타내었다(Yoon et al., 2019).

2.2 GGBFS 콘크리트의 해양 폭로 환경을 고려한 옥외 폭로 시험 방법

2.2.1 해양 폭로 환경을 고려한 옥외 폭로 시험 개요

본 연구에서는 경기도 안산시 소재의 해양 환경 폭로 시험

Table 1 Mix proportions for OPC and GGBFS concrete (Yoon et al., 2019)

	W/B (%)	Unit weight(kg/m ³)					S.P (%)
		W	C	GGBFS	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
GGBFS30	37	168	318	136	762	946	1.30
	42	168	280	120	783	972	1.10
	47	168	250	107	835	956	1.00
GGBFS50	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 (Yoon et al., 2019)

Types	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 (Yoon et al., 2019)

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

장에 콘크리트 시편을 존치시켜 염화물 확산 거동을 평가하였다. 해수에 완전히 침지되는 침지대, 조수간만의 영향을 받는 간만대, 비래 염분의 영향을 받는 비탈대 지역, 총 3 가지 수준의 노출 조건을 고려하였으며, 각 조건은 KS D ISO 11306에 준하여 조성되었다(KS D ISO 11306, 2009). 간만대의 경우 해수가 비산되며 조수간만의 주기가 가능한 적어지도록 조성되었으며 비탈대 영역의 경우 파도의 영향을 직접 받고 육풍을 차단하여 해풍의 영향만을 받을 수 있도록 조성되었다. 염화물 이온의 1 방향 침투를 유도하고자 모든 시편은 윗면을 제외한 나머지 모든 면을 에폭시로 코팅한 후 시험장에 존치되었다. 본 시험장의 모식도를 Fig. 1에, 시험장 전경을 Fig. 2에 나타내었다.

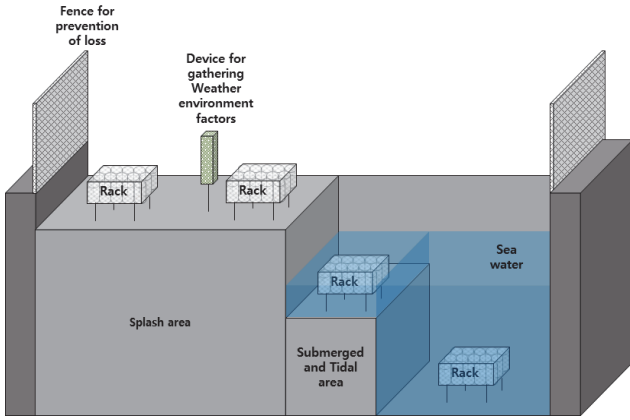


Fig. 1 Mimetic diagram of marine environment exposure test site



Fig. 2 The view of marine environment exposure test site

2.2.2 결보기 염화물 확산계수 분석 방법

2.2.1절과 같이 노출조건별로 목표 기간까지 존치가 완료된 GGBFS 콘크리트의 염화물 확산 거동을 평가하기 위해 산-가용성 시험 방법에 준하여 시편의 깊이별 염화물량을 측정하였다. 일반적으로 수경성 시멘트 조직 내에 있는 산-가용성 염화물량은 시멘트 조직 내의 총 염화물량과 비슷한 수준으로 알려져 있다(KS F 2714, 2017). 목표 노출 기간까지 시험이 완료된 시편을 대상으로 각 조건별로 3회씩 내부 염화물량을 평가한 후 평균 값을 사용하였다. 시험 시 표면에 부착된 염화물 이온이 탈락되지 않도록 별도의 세척이나 면 처리 작업 없이 0~5 mm, 5~10 mm, 10~15 mm, 15~20 mm 총 4 수준의 깊이 구간을 설정하여 콘크리트 분말을 채취하였다. 이후 채취한 콘크리트 분말의 깊이 별 산-가용성 염화물량을 도출하여 염화물 프로파일을 평가하였다. 염화물 프로파일을 평가함으로써 염화물 이온(Cl⁻)이 콘크리트 내부로 침투 및 확산하는 거동을 거시적으로 분석할 수 있으며, Fig. 3과 같이 염화물 이온은 콘크리트 표면에서부터 내부로 확산하게 된다. 본 연구에서 평가된 노출기간 1,825일(5년)의 물-결합재 비 0.37의 GGBFS 50 콘크리트의 염화물 프로파일을 Fig. 3에 나타내었다.

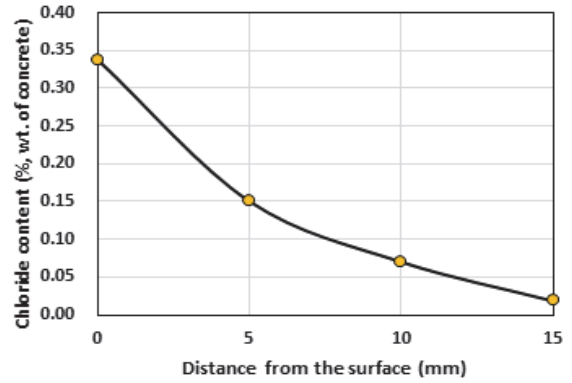


Fig. 3 The chloride profile for GGBFS 50-37 in 1,825 exposure days

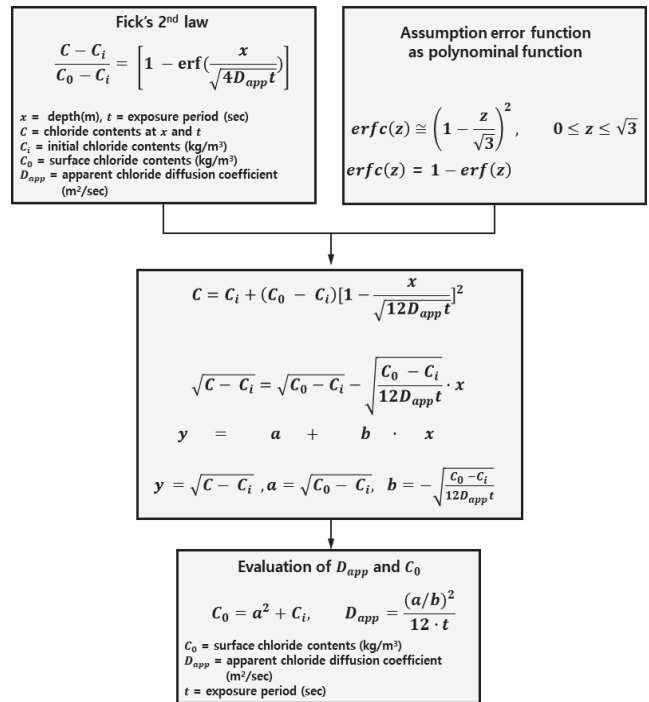


Fig. 4 The flowchart for evaluation of apparent chloride diffusion coefficient by regression analysis

산-가용성 시험 방법에 의해 평가된 각 조건별 염화물 프로파일을 Fick's 2nd 법칙에 적용시켜 결보기 염화물 확산계수를 도출하였다. Fick's 2nd 법칙 내 오차함수의 경우 $0 \leq z \leq \sqrt{3}$ 범위에서는 $\operatorname{erfc}(z) = 1 - \operatorname{erf}(z)$ 로 가정할 수 있기 때문에 오차함수 회귀분석 방법을 통해 비교적 간단하게 확산계수를 평가할 수 있다. 선형 회귀분석에 의한 결보기 염화물 확산계수의 도출 방법을 Fig. 4에 나타내었다(Glasser et al., 2008; SERI, 2003).

2.2.3 압축 강도 평가 결과

본 절에서는 28일, 49일, 180일(0.5년), 365일(1년), 730일(2

년), 1085일(3년), 1460일(4년), 1,825일(5년) 간의 수중양생이 적용된 각 배합의 압축강도 평가 결과를 분석하였다. 재령 28일 ~ 1,085일까지의 평가 결과는 본 연구와 동일 배합을 다룬 선행연구에서 인용하였다(Yoon et al., 2020). 각 배합의 압축강도 평가 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

모든 배합에서 재령 730일 이후 압축강도의 증가량이 적게 나타났다. 또한 GGBFS 콘크리트의 경우 잠재수경성 반응을 통해 OPC 콘크리트 대비 높은 강도를 가질 뿐만 아니라 초기

재령 기간에서의 강도 증진률 역시 높게 나타났다. 재령 1,095일의 강도를 기준으로 1,825일에서의 강도 증진률을 평가하면 OPC 콘크리트의 경우 100.6 ~ 101.0 %, GGBFS 콘크리트의 경우 100.5 ~ 102.4 %, GGBFS 50 콘크리트의 경우 100.9 ~ 105.7 %를 나타내었다.

3. 해양 폭로 환경을 고려한 GGBFS 콘크리트의 결보기 염화물 확산계수 평가 결과

3.1 침지대에서의 결보기 염화물 확산계수 평가 결과

본 절에서는 노출 기간 1,095일(3년), 1,460일(4년), 1,825일(5년)을 고려하여 평가된 침지대 영역에서의 결보기 염화물 확산계수를 평가한 결과를 다루었다. 노출 기간 180일(0.5년), 365일(1년), 730일(2년)의 결과는 동일 조건에서 수행된 선행 연구의 결과를 인용하였다(Yoon et al., 2019). Table 4 및 Fig. 6에 해수에 침지되는 조건인 침지대 조건에서의 결보기 염화물 확산계수 평가 결과를 나타내었다. 아래의 평가 결과 표 및 그래프들에서 배합명 뒤 숫자는 물-결합재 비를 의미한다.

노출 기간 730일까지 GGBFS 콘크리트에서는 OPC 콘크리트 대비 개선된 염해 저항성능이 나타났으며 이후에는 큰 차이가 나타나지 않았다. 이는 고로슬래그 미분말의 잠재수경성과 자유염화물 고정화능에 기인한다. 선행 연구의 최종 측정일인 730일을 기준으로 본 연구에서 고려한 최종 옥외 폭로 기간인 1,825일에서의 확산계수 감소율을 평가한 결과, OPC 콘크리트의 경우 72.7 ~ 80.9 %, GGBFS 30 콘크리트의 경우 49.1 ~ 55.5 %, GGBFS 50 콘크리트의 경우 2.9 ~ 17.4 %로 나타났다. 고로슬래그 미분말 치환률이 높은 배합에서는 이미 매우 적은 수준의 확산계수가 평가되어 최종 평가일에서의

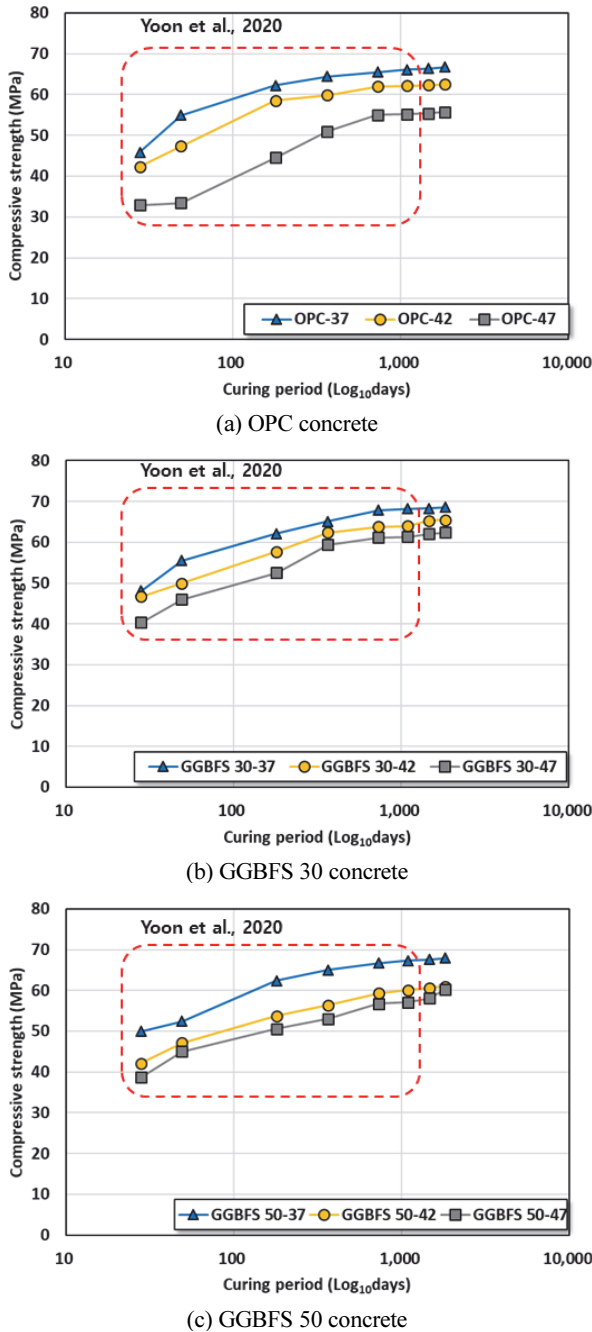
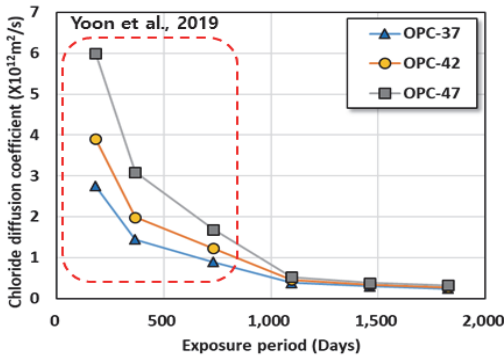


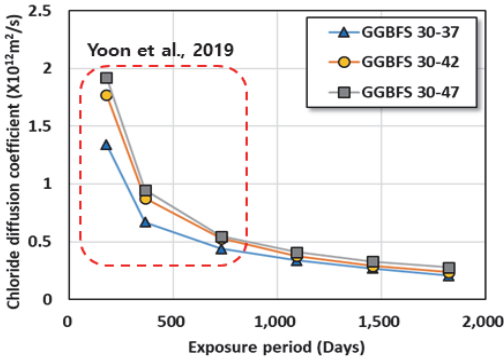
Fig. 5 The result of compressive strength (Yoon et al., 2020).

Table 4 Apparent chloride diffusion coefficient in submerged area

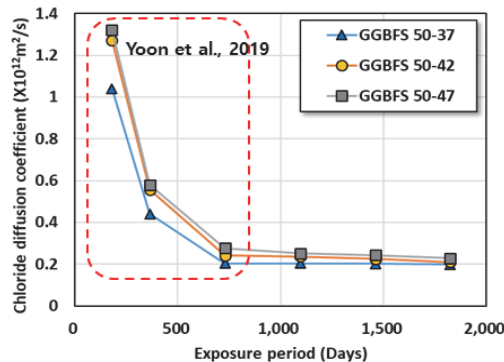
W/B (%)	Apparent chloride diffusion coefficient ($\times 10^{12} \text{m}^2/\text{s}$)						
	Yoon et al., 2019			This study			
	180 days	365 days	730 days	1,095 days	1,460 days	1,825 days	
OPC	37	2.75	1.45	0.89	0.38	0.30	0.24
	42	3.90	1.99	1.22	0.46	0.34	0.28
	47	6.00	3.09	1.69	0.53	0.38	0.32
GGBFS 30	37	1.34	0.67	0.44	0.34	0.27	0.20
	42	1.77	0.87	0.53	0.38	0.29	0.24
	47	1.92	0.95	0.55	0.41	0.33	0.28
GGBFS 50	37	1.04	0.44	0.20	0.20	0.20	0.20
	42	1.27	0.56	0.24	0.24	0.23	0.21
	47	1.32	0.58	0.28	0.25	0.24	0.23



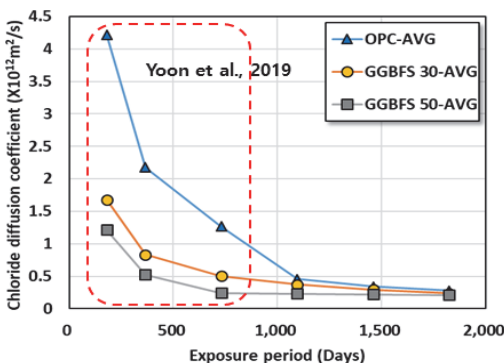
(a) OPC concrete



(b) GGBFS 30 concrete



(c) GGBFS 50 concrete



(d) Average diffusion coefficient considering W/B ratio

Fig. 6 The result of apparent chloride diffusion coefficient in submerged area

확산계수 감소폭이 적게 평가되었다. 또한 각 배합의 물-결합재비에 따른 3개의 확산계수를 평균으로 비교한 Fig. 6(d)에 따르면 1,095일 ~ 1,825일 구간에서 OPC 콘크리트와 GGBFS 30 콘크리트에서는 각각 38.1% 및 36.1%의 확산계수 감소율이 나타났으나 GGBFS 50 콘크리트에서는 약 8.1%의 확산계수 감소가 나타났다.

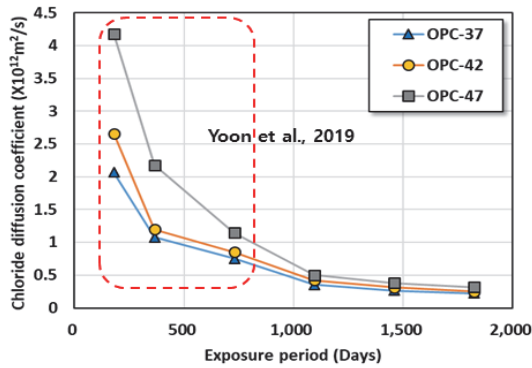
3.2 간만대에서의 겉보기 염화물 확산계수 평가 결과

본 절에서는 간만대 영역에서 OPC 및 GGBFS 콘크리트를 대상으로 평가된 겉보기 염화물 확산계수 결과를 분석하였다. 3.1절과 마찬가지로 노출 기간 180일(0.5년), 365일(1년), 730일(2년)의 결과는 선행 연구의 결과를 인용하였다. 간만대에서의 겉보기 염화물 확산계수 평가 결과를 Table 5 및 Fig. 7에 나타내었다.

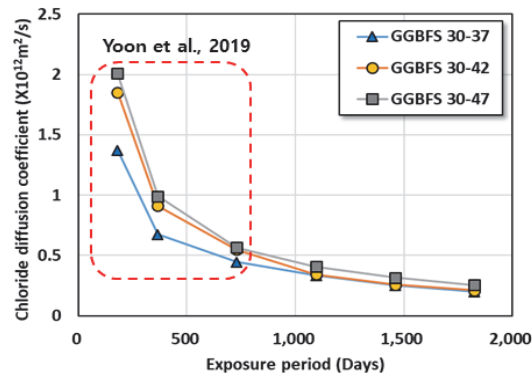
기존의 연구 결과에 따르면 조수간만의 영향을 받는 경우, 해수의 건설 반복으로 인해 표면에 높은 염소이온 농도가 축적되어 염소이온의 농도 구배에 의한 확산이 촉진되고 이로 인해 비교적 높은 염화물 확산계수가 평가된다(Lee et al., 2017). 간만대 역시 GGBFS 콘크리트에서 개선된 염해 저항 성능이 나타났으며 730일을 기준으로 본 연구에서 고려한 최종 옥외 폭로 기간인 1,825일(5년)에서의 확산계수 감소율을 평가한 결과, OPC 콘크리트의 경우 70.1 ~ 72.5%, GGBFS 30 콘크리트의 경우 55.1 ~ 61.6%, GGBFS 50 콘크리트의 경우 8.8 ~ 25.8%로 나타났다. 각 배합의 물-결합재비에 따른 3개의 확산계수를 평균으로 비교한 Fig. 7(d)에 따르면 간만대 지역의 1,095일(3년) ~ 1,825일(5년) 구간에서 OPC 콘크리트는 38.4%, GGBFS 30 콘크리트는 38.6%, GGBFS 50 콘크리트에서는 8.7%의 확산계수 감소율이 나타났다.

Table 5 Apparent chloride diffusion coefficient in tidal area

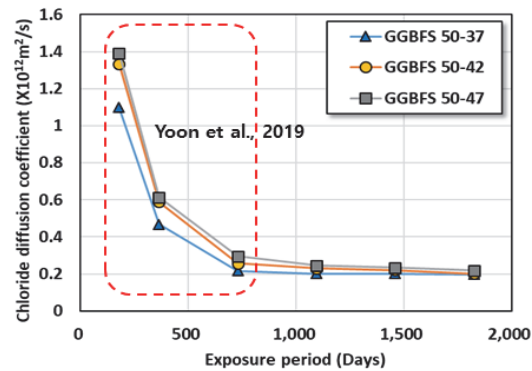
	W/B (%)	Apparent chloride diffusion coefficient ($\times 10^{12} \text{m}^2/\text{s}$)					
		Yoon et al., 2019			This study		
		180 days	365 days	730 days	1,095 days	1,460 days	1,825 days
OPC	37	2.07	1.08	0.75	0.36	0.26	0.22
	42	2.66	1.20	0.85	0.42	0.31	0.25
	47	4.18	2.18	1.15	0.50	0.38	0.32
GGBFS 30	37	1.37	0.67	0.45	0.33	0.25	0.20
	42	1.85	0.91	0.55	0.34	0.26	0.21
	47	2.01	0.99	0.57	0.41	0.32	0.25
GGBFS 50	37	1.10	0.47	0.22	0.20	0.20	0.20
	42	1.33	0.59	0.26	0.23	0.22	0.20
	47	1.39	0.61	0.30	0.24	0.23	0.22



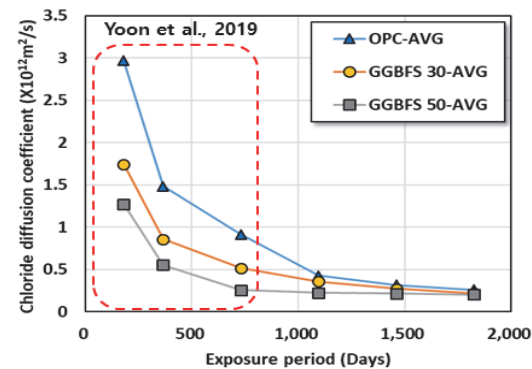
(a) OPC concrete



(b) GGBFS 30 concrete



(c) GGBFS 50 concrete



(d) Average diffusion coefficient considering W/B ratio

Fig. 7 The result of apparent chloride diffusion coefficient in tidal area

3.3 비말대에서의 걸보기 염화물 확산계수 평가 결과

본 절에서는 비말대에서 평가된 각 조건별 걸보기 염화물 확산계수를 평가하였으며 그 결과를 아래의 Table 6 및 Fig. 8에 나타내었다.

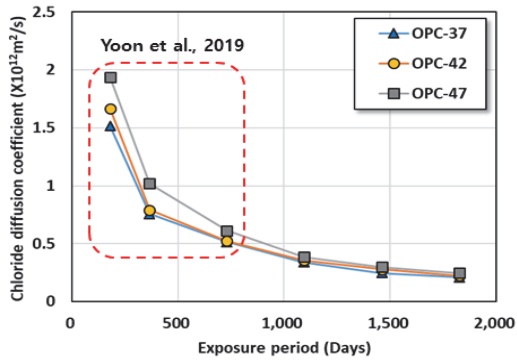
목표 노출 기간까지 폭로 시험이 완료된 시편 수거 시 침지대 및 간만대에 적용된 시편은 해수에 의한 침식 및 이에 따른 손상이 발생하였으나 비말대 지역에 적용된 시편의 경우 비교적 건전한 상태를 유지하였다. 콘크리트 시편 표면이 건전한 상태를 유지한 것과 해수의 영향을 비래염분으로 받기 때문에 비말대에서 가장 낮은 확산계수가 나타난 것으로 보인다. 또한 시험장에서 평가된 대기 중 염화물량은 24 ~ 81 psu(Practical Salinity Unit)로 측정되었다. 선행 연구의 마지막 측정일인 730일(2년) 기준 본 연구에서 고려한 최종 옥외 폭로 기간인 1,825일(5년)에서의 확산계수 감소율을 평가한 결과, OPC 콘크리트의 경우 57.4 ~ 59.6%, GGBFS 30 콘크리트의 경우 28.5 ~ 38.6%, GGBFS 50 콘크리트의 경우 7.5 ~ 23.5%로 나타났다. 또한 각 배합의 물-결합제비에 따른 3개의 확산계수를 평균으로 비교한 Fig. 8(d)에 따르면 비말대 지역의 1,095일(3년) ~ 1,825일 구간에서 OPC 콘크리트는 37.3%, GGBFS 30 콘크리트는 27.9%, GGBFS 50 콘크리트에서는 9.7%의 확산계수 감소율이 나타났다.

3.4 해양 폭로 조건에 따른 걸보기 염화물 확산계수의 변화 분석

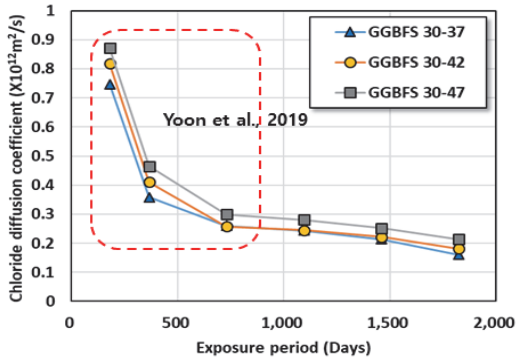
본 절에서는 노출 조건에 따른 걸보기 염화물 확산계수 변화 거동을 고찰하고자 노출 기간 1,095일(3년), 1,460일(4년), 1,825일(5년)에서 평가된 각 배합의 침지대, 간만대, 비말대에

Table 6 Apparent chloride diffusion coefficient in splash area

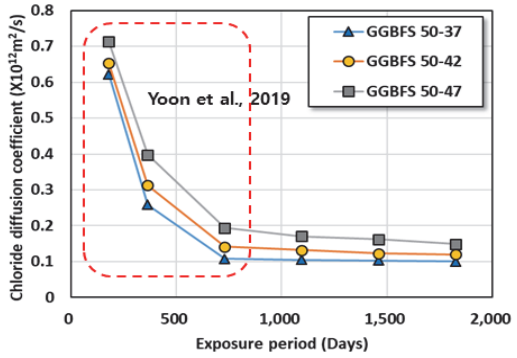
W/B (%)	Apparent chloride diffusion coefficient ($\times 10^{12} \text{m}^2/\text{s}$)						
	Yoon et al., 2019			This study			
	180 days	365 days	730 days	1,095 days	1,460 days	1,825 days	
OPC	37	1.52	0.75	0.51	0.34	0.25	0.21
	42	1.66	0.79	0.52	0.36	0.28	0.22
	47	1.94	1.02	0.61	0.39	0.30	0.25
GGBFS 30	37	0.75	0.36	0.26	0.24	0.21	0.16
	42	0.82	0.41	0.26	0.24	0.22	0.18
	47	0.87	0.47	0.30	0.28	0.25	0.21
GGBFS 50	37	0.62	0.26	0.11	0.10	0.10	0.10
	42	0.65	0.31	0.14	0.13	0.12	0.12
	47	0.71	0.40	0.19	0.17	0.16	0.15



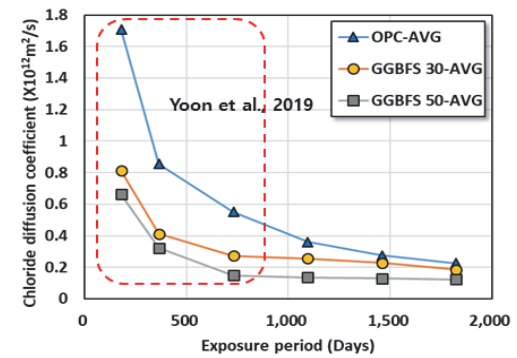
(a) OPC concrete



(b) GGBFS 30 concrete



(c) GGBFS 50 concrete

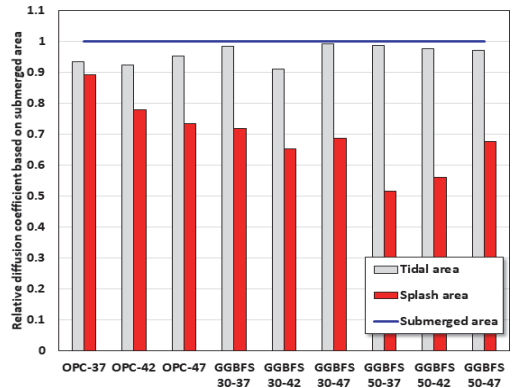


(d) Average diffusion coefficient considering W/B ratio

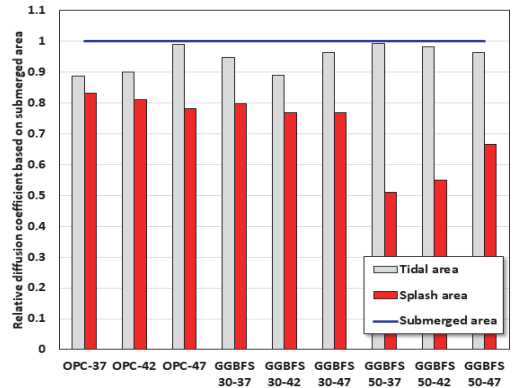
Fig. 8 The result of apparent chloride diffusion coefficient in splash area

서 평가된 확산계수를 분석하였다. 침지대를 기준으로 하여 비말대 및 간만대의 확산계수 변화 비를 분석한 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

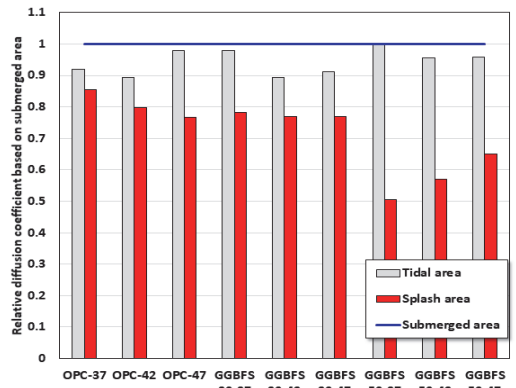
노출 기간 1,045일~1,825일의 확산계수 분석 결과 침지대, 간만대, 비말대 순으로 확산계수가 평가되었다. 노출 기간 180일(0.5년) ~ 730일(2년)을 다룬 선행 연구에 따르면 GGBFS 콘크리트의 경우 간만대에서 침지대보다 높은 확산계수가 평가되었으나(Yoon et al., 2019), 노출 기간이 증가함



(a) 1,095 exposed days



(b) 1,460 exposed days



(c) 1,825 exposed days

Fig. 9 The relative apparent chloride diffusion coefficient considering marine exposure conditions

에 따라 간만대의 확산계수가 더 큰 폭으로 감소한 것으로 사료된다. 또한 노출 조건의 변화에 따라 물-결합재 비와 고로슬래그 미분말 치환률이의 증감이 확산계수에 미치는 영향은 일정한 경향을 나타내지 않았다.

4. 고로슬래그 미분말 치환률이 확산계수 변화 거동에 미치는 영향성 평가

본 절에서는 고로슬래그 미분말 치환률이 확산계수 감소 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 Fig. 5, 6, 7의 (d)

Table 7 The results of linear regression analysis considering GGBFS effect

D = a × GGBFS + b				
D = diffusion coefficient (× 10 ¹² m ² /s),				
GGBFS = GGBFS substitution rate (%)				
	Exposure period	a	b	R ²
Submerged area	180 days	-0.062	4.023	0.932
	365 days	-0.034	2.083	0.946
	730 days	-0.021	1.230	0.975
	1,095 days	-0.004	0.469	0.925
	1,460 days	-0.002	0.348	0.945
	1,825 days	-0.001	0.282	0.990
Tidal area	180 days	-0.034	2.914	0.981
	365 days	-0.019	1.466	0.993
	730 days	-0.013	0.917	0.996
	1,095 days	-0.004	0.441	0.908
	1,460 days	-0.002	0.322	0.960
	1,825 days	-0.001	0.261	0.980
Splash area	180 days	-0.022	1.637	0.926
	365 days	-0.011	0.823	0.937
	730 days	-0.008	0.541	0.990
	1,095 days	-0.004	0.369	0.976
	1,460 days	-0.003	0.286	0.900
	1,825 days	-0.002	0.232	0.948

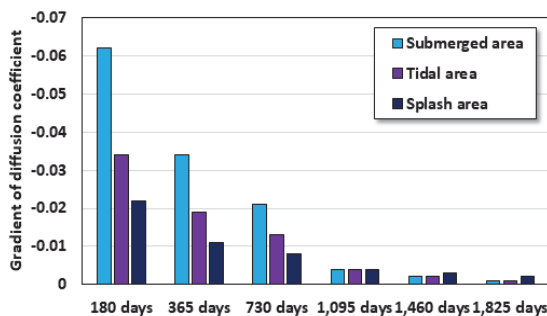


Fig. 10 The gradient of diffusion coefficient by linear regression analysis considering GGBFS effect

와 같이 3 수준의 물-결합재 비에서 평가된 OPC, GGBFS 30 및 GGBFS 50 배합의 확산계수를 평균으로 설정한 후 고로슬래그 미분말 치환률을 입력 값으로 하여 선형 회귀분석을 수행하였다. 회귀분석 결과를 아래의 Table 7 및 Fig. 10에 나타내었다.

고로슬래그 미분말 치환률에 따른 확산계수 감소 거동을 선형회귀분석을 통해 분석한 결과, 회귀식의 기울기는 노출 기간 730일(2년)까지는 침지대, 간만대, 비탈대 순으로 나타났으나 그 이후에는 노출 조건 간에 차이가 거의 나타나지 않았다. 최종 노출 기간인 1,825일(5년)에서의 기울기 값은 노출 기간 180일(0.5년)을 기준으로 침지대에서 1.61 %, 간만대에서 2.94 %, 비탈대에서 9.09%의 값으로 수화반응이 진행됨에 따라 크게 감소하였으며 따라서 재령일이 증가함에 따라 고로슬래그 미분말의 영향이 매우 적어지는 것으로 나타났다.

OPC 콘크리트라 할지라도 충분한 양생기간이 확보되는 경우 매우 낮은 확산계수를 갖는 것으로 판단된다. 그러나 다수준의 확산계수를 고려하여 염해 내구수명 해석을 수행한 기존의 연구에 따르면 OPC 콘크리트와 같이 높은 초기 염화물 확산계수를 갖고 낮은 시간의존성지수로 인해 확산계수의 감소에 오랜 시간이 걸리는 경우 확산계수가 충분히 감소하기 전에 콘크리트 내부로 염소이온의 확산이 용이한 환경이 조성된다. 이에 따라 최종적으로 철근이 매립된 위치에서 임계 염화물량에 이르는 기간을 크게 단축시키게 된다(Jang et al., 2018). 따라서 고로슬래그 미분말을 사용함으로써 초기 기간에 높은 확산성 감소를 기대할 수 있고 이를 통해 합리적으로 염해 내구성능을 확보할 수 있다고 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 해양 폭로 환경을 고려한 GGBFS 콘크리트의 결보기 염화물 확산계수를 평가하여 비교 분석하였다. 침지대, 간만대, 비탈대 총 3가지 수준의 노출 조건을 고려한 분석을 수행하였으며, 평가된 확산계수를 기반으로 고로슬래그 미분말 치환률이 확산계수에 미치는 영향을 회귀분석을 통해 정량적으로 분석하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- 1) 노출 환경을 고려한 옥외 폭로 시험 결과, 고로슬래그 미분말의 치환률이 증가할수록 선형 연구의 마지막 측정일(730일, 2년)을 기준으로 평가한 확산계수의 감소율이 감소하였다. OPC 배합은 최대 80.9 %의 감소율을, GGBFS 30 배합은 최대 61.6 %의 감소율을, GGBFS 50 배합은 최대 25.8 %의 감소율을 나타내었다. GGBFS 콘크리트는 노출기간 2 ~ 3년 시점에서 OPC 보다 개선된 염해 저항성능을 나타내었으며 이후에는 OPC 콘크리트와의 차이가 적게 나타났다.

- 2) 해양 폭로 조건에 따른 확산계수 거동을 분석한 결과, 걸보기 염화물 확산계수는 침지대, 간만대, 비말대 순으로 평가되었다. 비말대의 경우 비례염분의 영향을 받았으며 옥외 폭로 시험 기간 동안 시편의 상태가 비교적 견전한 상태를 유지하여 가장 낮은 확산계수가 평가된 것으로 사료된다. 간만대의 경우 침지대와 거의 비슷한 수준의 확산계수를 나타내는 경우가 발생하였는데, 이는 건습의 반복으로 인한 표면에서의 염소이온 농도 증가에 기인하는 것으로 사료된다.
- 3) 본 연구에서는 고로슬래그 미분말 치환률이 걸보기 염화물 확산계수에 미치는 영향을 노출조건별로 회귀분석을 통해 분석하였다. 노출 기간 730일까지는 침지대, 간만대, 비말대 순으로 회귀식의 기울기가 평가되었으며 이후에는 노출 조건에 의한 기울기 차이가 적게 나타났다. 또한 730일 이후로 기울기 값이 크게 감소하였으며 고로슬래그 미분말의 사용은 모든 노출 조건에서 초기 염해 내구수명 확보에 유리한 것으로 사료된다.

감사의 글

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

References

1. Glasser, F. P., Marchand, J., and Samson, E. (2008), Durability of concrete—Degradation phenomena involving detrimental chemical reactions, *Cement and Concrete Research*, 38, 226-246.
2. 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.
3. Jung, S. H., Ryu, H. S., Karthick, S., and Kwon, S. J. (2018), Time and crack effect on chloride diffusion for concrete with fly ash, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 12(1), 1-10.
4. Jang, S. Y., Yoon, Y. S., and Kwon, S. J. (2018), Derivation of Optimum GGBFS Replacement with Durability Design Parameters, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 6(1), 36-42.
5. 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.
6. KS D ISO 11306. (2009), Corrosion of metals and alloys - Guidelines for exposing and evaluating metals and alloys in surface sea water, Korean Standards Service Network. 1-5.
7. KS F 2714. (2017), Standard Test Method for Acid-soluble Chloride in Mortar and Concrete, Korea Standard Association, Seoul, 1-3.
8. KCI. (2021), KDS 14 20 40-Durability Design Standard for Concrete Structure, Korea Concrete Institute, Seoul, 652-653.
9. Lee, S. K., and Zielske, J. (2014), An FHWA Special Study: Post-Tensioning Tendon Grout Chloride Thresholds (FHWA-HRT-14-039), Federal Highway Administration, McLean, 7-20.
10. Lee, B. K., Kim, G. Y., Kim, G. T., Shin, K. S., and 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.
11. 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.
12. Metha, P. K., and Monteiro, P. M. (2009), Concrete-Structure, properties, and materials, 2nd edition, prentice Hall, New-Jersey, 113-171.
13. Nokken, M., Boddy, A., Hooton, R. D., and Thomas, M. D. A. (2006), Time dependent diffusion in concrete—three laboratory studies, *Cement and Concrete Research*, 36(1), 200-207.
14. 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.
15. Richardson, J. M., Biemacki, J. J., Stutzman, P. E., and Bentz, D. P. (2002), Stoichiometry of Slag Hydration with Calcium Hydroxide, *Journal of the American Ceramic Society*, 85(4), 947-953.
16. SERI. (2003), Evaluation of chloride ion diffusion characteristics of high durability concrete, Samsung Engineering Research Institute, Final report.
17. 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.
18. Yoon, Y. S., Ryu, H. S., Lim, H. S., Koh, K. T., Kim, J. S., and 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.
19. Yoon, Y. S., and Kwon, S. J. (2019), Evaluation of Apparent Chloride Diffusion Coefficient and Surface Chloride Contents of FA concrete Exposed Splash zone Considering Crack Width, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 23(6), 18-25.
20. Yoon, Y. S., Lim, H. S., and Kwon, S. J. (2019), Variations of Apparent Chloride Diffusion Coefficient in Long-term Soaked GGBFS Concrete Considering Three Levels of Exposure Environments, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 31(5), 467-474.
21. Yoon, Y. S., Kim, T. H., and Kwon, S. J. (2020), Evaluation of Chloride Diffusion Behavior and Analysis of Probabilistic Service Life in Long Term Aged GGBFS Concrete, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 24(3), 47-56.
22. Yoon, Y. S., and Kwon, S. J. (2020), Evaluation of Chloride

요 지 : 본 연구에서는 해양 폭로 조건과 배합 사항을 고려하여 GGBFS 콘크리트의 시간의존적 염화물 확산 거동을 분석하였다. 사용 콘크리트 배합은 3 수준의 물-결합재 비 및 고로슬래그 미분말 치환률을 고려한 콘크리트 배합이며 노출 조건으로는 침지대, 간만대, 비말대 총 3 수준을 고려하여 옥외 폭로 시험을 수행하였다. 길보기 염화물 확산계수 평가 결과, 고로슬래그 미분말의 치환률이 증가할수록 노출 기간 730일 (2년)을 기준으로 평가한 확산계수의 감소율이 감소하였다. 또한 노출 조건에 따른 확산거동을 평가한 결과, 침지대, 간만대, 비말대 순으로 확산계수가 평가되었다. 비말대에서는 해수의 건습 반복으로 인해 비교적 높은 확산계수가 평가되었다. 본 연구에서는 고로슬래그 미분말 치환률이 길보기 염화물 확산계수 감소 거동에 미치는 영향을 노출 조건 및 기간을 고려하여 분석하였다. 확산계수를 출력 값으로, 고로슬래그를 입력 값으로 설정한 선형 회귀분석을 수행하였으며, 노출 기간 730일 이후 고로슬래그 미분말이 확산계수에 미치는 영향이 크게 감소하였다. OPC 콘크리트라 할지라도 730일 이후 GGBFS 콘크리트 만큼 낮은 확산계수를 나타냈기 때문이며 고로슬래그 미분말의 사용을 통해 730일 이전에 뛰어난 초기 염해 내구성능 확보가 가능하다고 사료된다.

핵심용어 : 옥외 폭로 시험, 고로슬래그 미분말, 염해, 길보기 염화물 확산계수
