

해양 환경 폭로 시험을 통한 FA 콘크리트의 겉보기 염화물 확산계수 평가

윤용식¹, 임희섭², 권성준^{3*}

Evaluation of Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Fly Ash Concrete by Marine Environment Exposure Tests

Yong-Sik Yoon¹, Hee-Seob Lim², Seung-Jun Kwon^{3*}

Abstract: In case of RC(Reinforced Concrete) structures which are constructed in coastal areas, chloride ions in sea water corrode the steel rebar in concrete. Especially in coastal areas, RC structures are affected by not only immersion of sea water, but also tidal of sea water and airborne chloride ions. In this study, marine environment exposure tests are conducted, considering 3 types of exposure environments (immersion zone, tidal zone, splash zone) and the exposure periods of 180 days, 365 days, and 730 days. Also, the concrete mixtures for this study are established, considering 3 levels of W/B(Water to Binder) ratio(0.37, 0.42, 0.47) and 2 levels of substitution rate of Fly ash(0 %, 30 %). In all exposure environments, Fly ash concrete has lower apparent chloride diffusion coefficients than OPC concrete. It is thought that fly ash's pozzolan reaction improves chloride resistance of concrete. Fly ash concrete has up to 63.5 % of decreasing rate in 180 days of exposure and up to 55.8 % of decreasing rate in 730 days of exposure, based on diffusion coefficients of OPC concrete. As a result of evaluation about effects of exposure environments, apparent chloride diffusion coefficients of fly ash concrete are evaluated in order of tidal zone, immersion zone, and splash zone. In tidal zone, It is thought that repeated cycles of wetting and drying of sea water cause the diffusion of chloride ions rapidly.

Keywords: Chloride Attack, Outdoor Exposure, Apparent Chloride Diffusion Coefficient, Fly Ash

1. 서 론

해안 지역에 시공된 철근콘크리트(RC: Reinforced Concrete) 구조물의 경우 해수에 존재하는 염소 이온(Cl⁻)에 의해 열화 현상이 발생할 가능성이 높다. 특히, 해안지역의 경우 해수에 완전 침지되는 환경뿐만 아니라 해수의 건습이 반복되는 환경과 대기 중 염소 이온의 영향을 받는 조건이 존재하게 된다(KCI, 1996; Lee et al., 2017). 염소 이온이 철근 콘크리트 구조물 내부로 침투하게 되어 내부 철근 위치에서의 염화물량이 임계 염화물량에 도달하게 되면 철근의 부식이 시작된다. 특히 염소 이온은 여러 할로젠 이온 중 전파 속도가 가장 빠르고 철근의 국소 부식(Local corrosion-pitting)을 야기한다(Metha and Monteiro, 1993; Lee and James, 2014). 내부 철근의 부식이 발생하게 되면 구조물의 구조적 문제가 발생하며, 구조물의 이용이 제한되어 높은 사회적 손실이 발생하게 된다(Park and

Kim, 2013; Yoon et al., 2018). 따라서 해안환경에 시공된 콘크리트 구조물의 경우 내구성능 평가 및 해석을 통한 적절한 유지관리가 필수적으로 요구된다(Kirkpatrick et al., 2002). 재료, 설계, 시공 등 다양한 분야에서 해양환경 콘크리트 구조물의 열화 현상을 제어하기 위해 많은 연구가 진행되어왔으며, 그 중에서도 시멘트를 혼화재료로 대체하여 사용하는 방법이 효과적으로 알려져 있다(Kim et al., 2019; Nath and Sarker, 2011; Yoon and Kwon, 2018; Yang et al., 2018). 대표적인 콘크리트 혼화재료로는 플라이애시(FA: Fly Ash), 고로슬래그 미분말(GGBFS: Granulated Ground Blast Furnace Slag), 실리카 폼(SF: Silica Fume) 등이 있다. 그 중에서 플라이애시는 화력 발전소에서 석탄을 연소시킬 때 발생하는 특정입도 범위(1 μm ~ 100 μm)의 입상 잔사이다(KS L 5405, 2018). 플라이애시를 콘크리트에 시멘트의 대체 재료로서 사용하게 되면 굳지 않은 상태에서는 볼베어링 효과로 인해 블리딩 저감 및 워커빌리티 개선 등의 효과를 기대할 수 있으며, 굳은 후에는 포졸란 반응에 의해 장기 내구성능 개선 효과를 기대할 수 있다. 특히 포졸란 반응에 의해 내부 공극구조가 치밀해져 염해 저항 성능을 개선시키는데 효과적으로 알려져 있다(Bilodeau et al., 1998; Yoon and Kwon, 2018). 또한 최근에는 온실가스 배출 문제 및 폐기물 재활용 등 환경 문제가 대두되면서 시멘트를 플라이애시로 대단위 치환 혼입하여 사용하는 연구가 활

¹정회원, 한남대학교 건설시스템공학과 박사과정

²정회원, 한남대학교 건설시스템공학과 박사 후 연구원

³정회원, 한남대학교 건설시스템 공학과 부교수

*Corresponding author: jjuni98@hannam.ac.kr

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

•본 논문에 대한 토의를 2019년 5월 1일까지 학회로 보내주시면 2019년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

발히 이루어지고 있다(Kwon et al., 2014).

대표적인 콘크리트의 염화물 거동 평가 방법으로는 전위차 구배를 원동력으로 이온의 확산을 촉진시키는 촉진 염화물 확산 시험 방법과 시편을 염수에 침지시켜 Fick's 2nd law의 일반해를 기반으로 염소 이온 확산 거동을 평가하는 방법이 있다. 시편을 염수에 침지시키는 방법의 경우 장기간의 시험 기간이 요구되는 단점이 있으나, 실제 환경에서의 염화물 확산거동을 평가할 수 있으며 내부 염화물량을 직접적인 해로 평가할 수 있다는 장점이 있다(Yoo, 2010). 이 지배 방정식의 해인 겔보기 염화물 확산계수 및 표면 염화물량은 콘크리트 구조물의 염해 내구수명 설계 시 필수적으로 고려되어야 하는 인자이다(Kirkpatrick et al., 2002). Fick's 2nd law에서는 경계 조건으로 포화상태를 가정하기 때문에 옥외 폭로 시험에 의해 겔보기 염화물 확산계수 및 표면 염화물량을 산정하는 경우 노출환경에 따라 큰 차이를 갖게 된다(Kim et al., 2016). 따라서 장기 노출된 비말대 및 간만대의 실태조사 결과를 이용한 실험 결과의 경우 동일 조건으로 장기 침지된 실험 결과와의 비교가 필수적이다. 표면 염화물량은 염해 환경 노출 기간의 평방근에 비례한다고 알려져 있으며, 겔보기 염화물 확산계수의 시간의존적 감소 거동 및 혼화재료에 의한 거동 변화에 대한 선행 연구가 수행되었다(Kim et al., 2016; Thomas and Bomforth, 1999).

다양한 혼화제를 혼입한 배합을 대상으로 촉진 염화물 시험을 통해 염화물 확산 거동을 평가한 연구 결과는 다수 존재하는 반면, 혼화재료 혼입을 고려하여 실제 옥외 환경 노출 시험을 통한 염화물 확산거동에 대한 연구 결과는 많지 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 3가지 수준(침지대, 간만대, 비말대)의 해양 환경을 조성하여 옥외 폭로 실험을 수행하였다. 대상 배합으로는 3가지 수준의 물-결합재 비(0.37, 0.42, 0.47) 및 플라이애시 치환률 30 %를 고려한 배합을 사용하였으며, 노출기간 180일, 365일, 730일을 적용한 후 각 배합의 겔보기 염화물 확산계수를 비교 평가하였다.

2. 사용 재료 및 평가 방법

2.1 사용 재료 및 FA 콘크리트 배합

본 연구에서는 해안 환경 폭로 시험을 위해 2가지 수준의 플라이애시 치환률(0%, 30%) 및 3가지 수준의 물-결합재 비를 고려하여 배합을 수행하였다. 본 연구의 배합표를 Table 1에 나타내었다. 또한 Table 2 및 Table 3에는 본 배합에 사용한 골재 및 감수제의 특성을 나타내었다. 본 연구에서 사용한 폴리카본산계 감수제의 경우 기존의 나프탈렌계 감수제 대비 슬럼프 유지 성능이 2~3 배 우수하며 조기강도 발현에 우수한 장점을 갖고 있다(Lee et al., 2004).

Table 1 Mix proportions for Fly Ash concrete

	W/B (%)	Unit weight(kg/m ³)					S.P (%)
		W	C	FA	Fine Agg.	Coarse Agg.	
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/B : Water to Binder ratio, W : Water, C : Cement, FA : Fly Ash, S.P : Super Plasticizer

Table 2 Physical properties of fine and coarse aggregate

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

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

2.2 침지 기간 및 침지 조건을 고려한 겔보기 염화물 확산계수 도출 방법

2.2.1 해안 환경 모사 폭로 시험의 개요

본 연구에서는 경기도 안산시 시화 방조제 인근의 해양 옥외 폭로 시험장에 시편을 존치시켜 염화물 거동을 평가하였다. 침지대, 간만대, 비말대 총 3가지 수준의 노출 환경을 조성하였다. 침지대의 경우 해수에 의해 시편이 완전히 침지되도록 설정하였으며, 간만대의 경우 물이 비산되며 조수간만의 주기가 가능한 적어지도록 설정하였다. 비말대의 경우 파도의 영향을 직접 받고 육풍을 차단하여 해풍의 영향만을 받을 수 있도록 하였다. 본 시험장의 모식도를 Fig. 1에, 시험장 전경을 Fig. 2에 나타내었다.

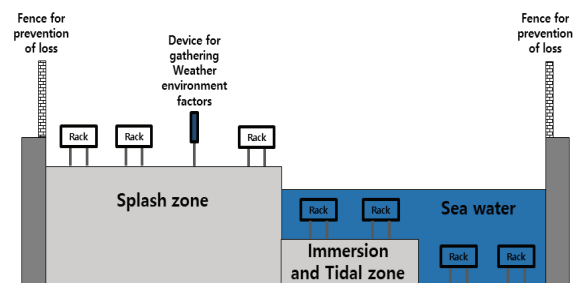


Fig. 1 Mimetic diagram of marine environment exposure test site



Fig. 2 Pictures of marine environment exposure test site

2.2.2 겉보기 염화물 확산계수 도출 방법

각 노출 환경에 노출된 시편의 겉보기 염화물 확산계수를 도출하고자 산가용성 시험 방법으로 시편의 깊이별 염화물량을 측정하였다. 일반적으로 수경성 시멘트 조직 내에 있는 산가용성 염화물 량은 시멘트 조직 내의 총 염화물 량과 같다고 알려져 있다(KS F 2714, 2017). 측정된 염화물 프로파일을 Fick's 2nd law에 적용시켜 선형회귀분석 방법으로 겉보기 염화물 확산계수를 도출해내었다. 오차함수의 경우 $0 \leq z \leq \sqrt{3}$ 범위에서는 $erfc(z) = 1 - erf(z)$ 로 가정할 수 있어 아래와 같은 방법으로 겉보기 염화물 확산계수를 도출하였다(Glasser et al., 2008; SERI, 2003).

(a) 식(1)에 의하여 측정된 염화물 프로파일을 회귀분석 한다.

$$\frac{C - C_i}{C_0 - C_i} = \left[1 - erf\left(\frac{x}{\sqrt{4D_{app}t}}\right) \right] \quad (1)$$

여기서, x 는 측정 깊이(m), C 는 시간(t)와 깊이(x)에서의 염화물량(kg/m^3), C_i 는 초기염화물량(kg/m^3), C_0 는 표면 염화물량(kg/m^3), D_{app} 는 겉보기 염화물 확산계수(m^2/s)를 나타낸다.

(b) 식(2)와 같이 오차함수를 다항함수로 가정한다.

$$erfc(z) \doteq \left(1 - \frac{z}{\sqrt{3}}\right)^2 \quad (2)$$

여기서, $0 \leq z \leq \sqrt{3}$, $erfc(z) = 1 - erf(z)$ 이다.

(c) 식(2)에 의해 식(1)은 식(3) 및 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C = C_i + (C_0 - C_i) \left[1 - \frac{x}{\sqrt{12D_{app}t}} \right]^2 \quad (3)$$

$$\sqrt{C - C_i} = \sqrt{C_0 - C_i} - \sqrt{\frac{C_0 - C_i}{12D_{app}t}} \cdot x \quad (4)$$

(d) 식(4)는 $y = a + b \times x$ 의 형태로서, 식(5)와 같이 염소 이온 프로파일을 선형함수로 나타낸다. 따라서 겉보기 확산 계수 및 표면 염화물량은 식(6) 및 식(7)과 같이 결정된다.

$$y = \sqrt{C - C_i}, \quad a = \sqrt{C_0 - C_i} \quad (5)$$

$$b = -\sqrt{\frac{C_0 - C_i}{12D_{app}t}} = -\frac{a}{\sqrt{12D_{app}t}}$$

$$D_{app} = \frac{(a/b)^2}{12 \cdot t} \quad (6)$$

$$C_0 = a^2 + C_i \quad (7)$$

Fig. 3에서는 본 연구의 대표 염화물 프로파일을 나타내었다.

3. 평가 결과

3.1 노출 기간 및 환경을 고려한 겉보기 염화물 확산계수 평가 결과

3.1.1 침지대에서의 겉보기 염화물 확산계수 평가 결과

시편이 해수에 침지되는 조건을 고려하여 각 배합의 겉보기 염화물 확산계수를 평가한 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

플라이애시 치환 배합에서 OPC 배합 대비 55.8% ~ 74.3%의 확산계수 감소율을 나타내었다. 플라이애시의 포졸란 반응에 의해 추가적으로 생성된 불용성의 안정한 규산화칼슘 수화물이 염화물 이온의 확산을 저지하기 때문으로 사료된다.

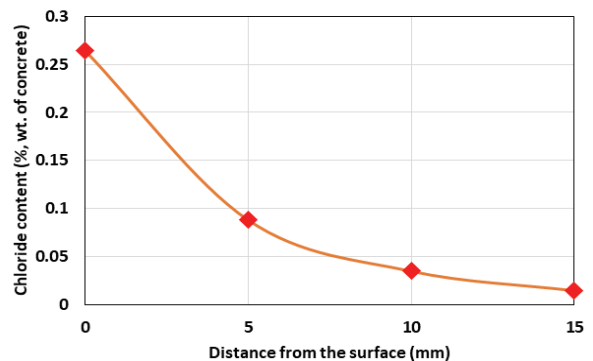
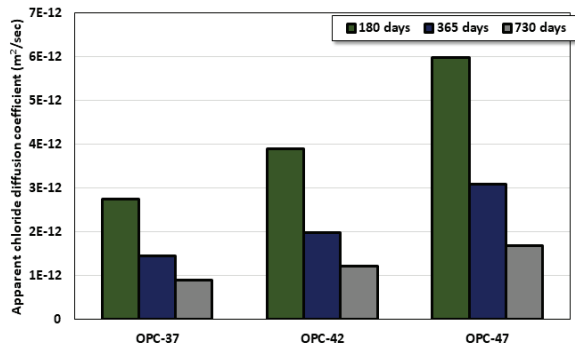
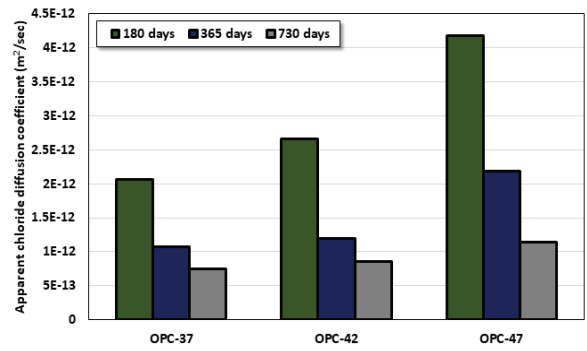


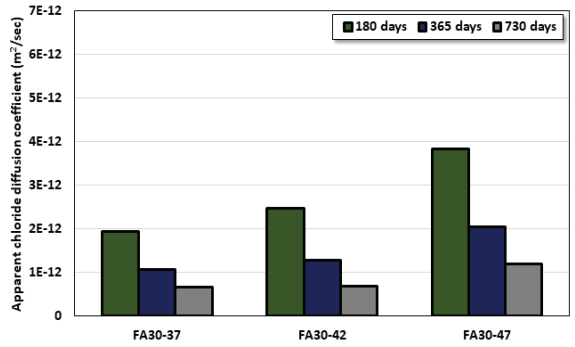
Fig. 3 Represent chloride profile for this study



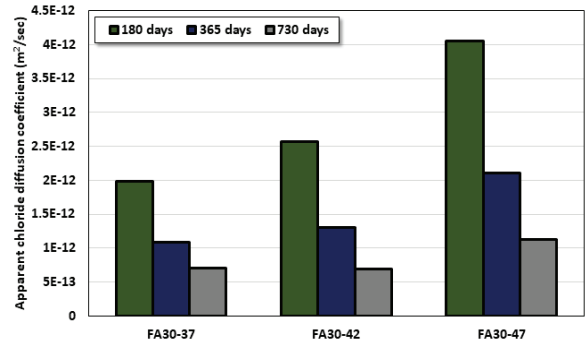
(a) OPC



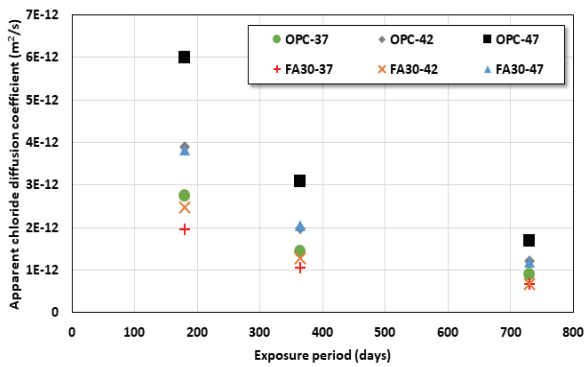
(a) OPC



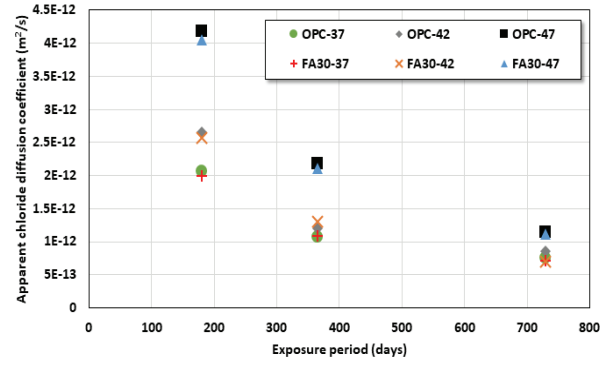
(b) FA 30



(b) FA 30



(c) all mixtures



(c) all mixtures

Fig. 4 Result of apparent chloride diffusion coefficient in immersion zone

Fig. 5 Result of apparent chloride diffusion coefficient in tidal zone

또한 노출기간이 180일에서 730일로 증가함에 따라 OPC 배합의 경우 28.2%~32.4%, 플라이애시 치환 배합의 경우 27.6%~33.9%의 감소율을 나타내어, 플라이애시 치환 배합은 각 노출기간에서 OPC 배합보다 낮은 확산계수를 나타낼 뿐 아니라 수화의 증가에 의한 확산계수 감소 폭이 동등 이상으로 평가되었다.

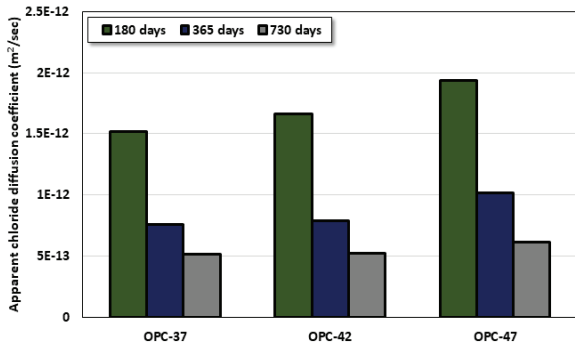
3.1.2 간만대에서의 겉보기 염화물 확산계수 평가 결과

본 절에서는 플라이애시 치환률 및 물-결합재 비를 고려하여 간만대에서의 겉보기 염화물 확산계수를 평가하였으며, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

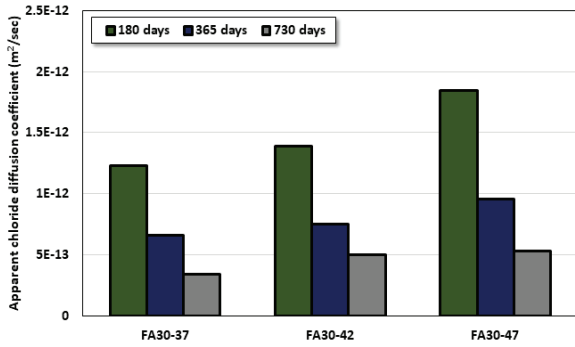
간만대에서는 노출 기간이 180일에서 730일로 증가함에 따라 OPC 배합의 경우 27.5%~36.3%, 플라이애시 치환 배합의 경우 27.0%~35.7%의 확산계수 감소율을 나타내었다. 또한 플라이애시 치환 배합은 OPC 배합 대비 최대 81.5%의 확산계수를 나타내어 OPC 배합 대비 염해 저항성이 우수한 것으로 사료된다.

3.1.3 비탈대에서의 겉보기 염화물 확산계수 평가 결과

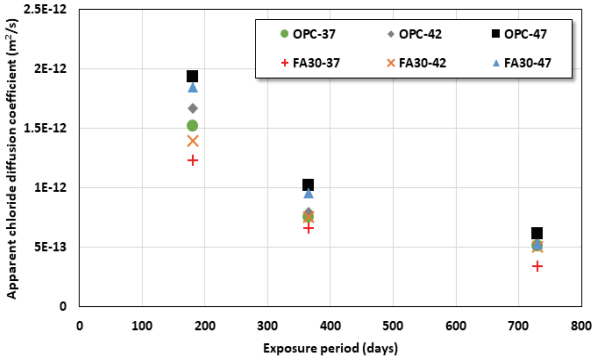
본 절에서는 콘크리트 시편이 비래 염분의 영향을 받는 조건 하에서 플라이애시 치환률 및 물-결합재 비를 고려하여 겉보기 염화물 확산계수를 평가하였다. 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다.



(a) OPC



(b) FA 30



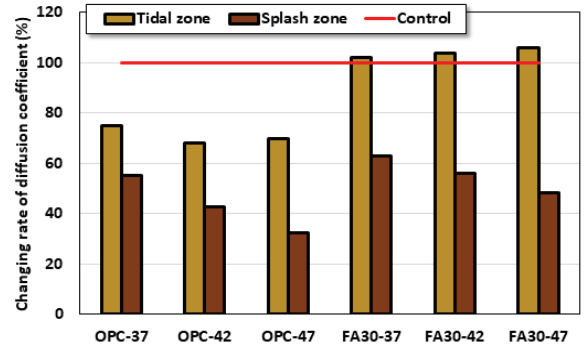
(c) all mixtures

Fig. 6 Result of apparent chloride diffusion coefficient in splash zone

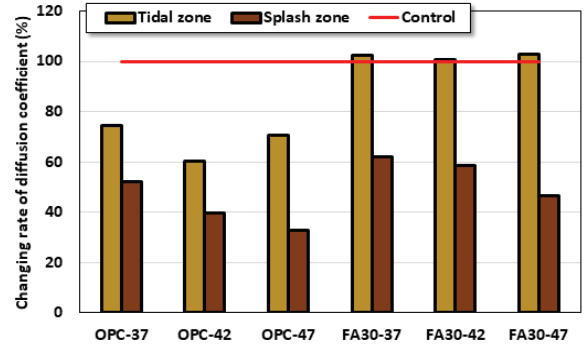
침지대 및 간만대와 마찬가지로 물-결합재 비가 낮을수록 낮은 확산계수가 나타났으며 플라이애시 치환 배합에서 OPC 배합 대비 뛰어난 염해 저항성능을 나타내었다. 플라이애시 치환 배합은 OPC 배합 대비 66.6%~95.9%의 확산계수 감소율을 나타내었다. 또한 재령일이 180일에서 730일로 증가함에 따라 플라이애시 치환 배합은 27.8%~36.1%의 감소율을 OPC 배합은 31.5%~33.8%의 감소율을 나타내었다.

3.2 노출 조건에 의한 겉보기 염화물 확산계수의 변화율 평가 결과

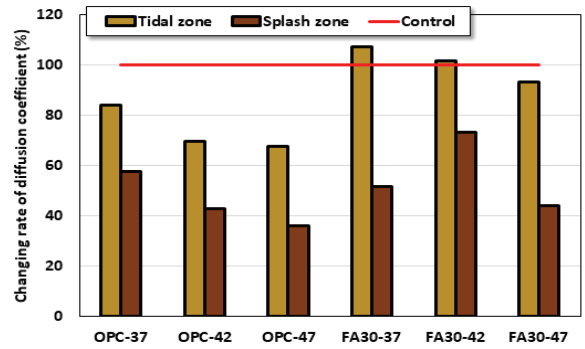
본 절에서는 3가지 수준의 해양환경 노출 조건이 염화물 확



(a) 180 days



(b) 365 days



(c) 730 days

Fig. 7 Apparent chloride diffusion coefficient's changing rate in tidal and splash zone based on immersion zone

산거동에 미치는 영향을 평가하고자 각 배합 및 노출 기간의 침지대에서의 확산계수를 기준으로 간만대 및 비말대의 확산계수 변화율을 평가하였다. 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

침지대를 기준으로 간만대 및 비말대에서의 겉보기 염화물 확산계수의 변화율을 평가한 결과 OPC 배합에서는 간만대의 경우 60.1%~84.1%, 플라이애시 치환 배합의 경우 93.4%~107.2%의 변화율을 나타내었다. 또한 비말대의 경우, OPC 배합의 경우 32.2%~57.6%, 플라이애시 치환 배합의 경우 44.0%~73.5%의 변화율을 나타내었다. 기존의 연구 결과에 따르면 콘크리트 시편이 조수간만의 영향을 받는 경우 건설작용의 반복으로 해수에 침지되는 경우 대비 염화물 이온의 침투가 더 높게 일어나는 것으로 알려져 있는데(Lee et al.,

2017), 본 연구의 플라이애시 치환 배합의 경우, 간만대에서 한 가지 경우를 제외하고 100% 이상의 확산계수 변화율을 나타내었다. 그러나 OPC 배합의 경우 100% 이하의 변화율을 나타내어, 노출기간 및 조건에 의해 확산계수 변화 거동이 변하는 크지 않은 것으로 나타났다.

3.3 수중 양생된 FA 콘크리트의 압축강도 평가 결과

본 절에서는 플라이애시 치환률(30%) 및 3가지 수준의 물-결합재 비(0.37, 0.42, 0.47)를 고려한 콘크리트를 대상으로 재령 2년까지 항온 수중양생(20 °C) 한 후 압축강도를 평가하였다. 재령 28일, 49일, 180일, 365일 강도는 사전 연구에서 인용하였다(Yoon and Kwon, 2018). 각 배합의 압축강도 평가 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

모든 배합에서 물-결합재 비가 낮을수록 높은 강도가 발현되었으며 이는 물-결합재 비가 낮은 배합에서 높은 배합보다 더 많은 결합재의 양이 확보되기 때문이다. 또한 재령 28일에서부터 플라이애시 치환 배합은 OPC 배합 대비 동등이상의 강도를 나타내었다. 재령 28일 대비 재령 730일에서의 압축강도 증진율은 OPC 배합의 경우 142.9% ~ 167.2%, 플라이애시 치환 배합의 경우 164.1% ~ 178.1%를 나타내었다. 모든 배합에서 재령 28일 대비 재령 730일 강도 증진율이 높게 나

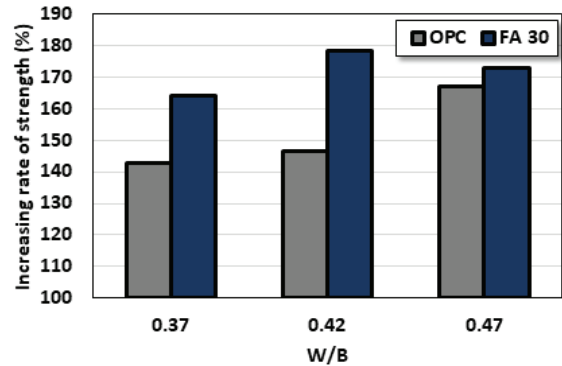


Fig. 9 Increasing ratio of compressive strength

타났는데 콘크리트 배합 설계 시 많은 단위결합재량(357 kg/m³ ~ 454 kg/m³)이 확보되었기 때문이며, 특히 치환율이 35% 이하인 플라이애시 치환 배합의 경우 포졸란 반응에 의해 높은 강도 증진율을 얻을 수 있다. 이러한 경향은 기존의 연구에서 증명되었으며, OPC 배합의 경우 최근 OPC 제조 시 고분말화의 영향을 받은 것으로 보인다(Kwon et al., 2014). 각 배합의 강도 증진율을 Fig. 9에 나타내었다.

4. 결론

본 연구에서는 30%의 플라이애시 치환률 및 3가지 수준의 물-결합재 비(0.37, 0.42, 0.47)를 고려하여 침지대, 간만대, 비말대에서의 노출기간에 따라 변화하는 겉보기 염화물 확산계수 거동을 평가하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- 3가지 노출 환경에서 물-결합재 비가 낮을수록 낮은 겉보기 염화물 확산계수가 나타났으며 플라이애시 치환 배합에서 OPC 배합 대비 낮은 확산계수가 평가되었다. 이는 물-결합재 비가 낮은 배합에서는 비교적 높은 결합재량이 확보되기 때문이며, 플라이애시의 포졸란 반응에 의해 콘크리트의 염해 저항성이 개선되는 것으로 사료된다. 최종 노출 기간인 730일에서 노출 기간 180일 대비 플라이애시 치환 배합은 27.0% ~ 36.1%의 감소율을 OPC 배합은 27.5% ~ 36.3%의 확산계수 감소율을 나타내었다.
- 3가지 수준의 노출 환경이 겉보기 염화물 확산계수 거동에 미치는 영향을 침지대를 기준으로 하여 평가하였다. 플라이애시 치환 배합에서는 간만대, 침지대, 비말대 순으로, OPC 배합의 경우 침지대, 간만대, 비말대 순으로 확산계수가 평가되었다. 플라이애시 치환 배합의 경우 간만대에서는 93.4% ~ 107.2%, 비말대에서는 44.0% ~ 73.5%의 변화율을 나타냈으며, OPC 배합의 경우 간만

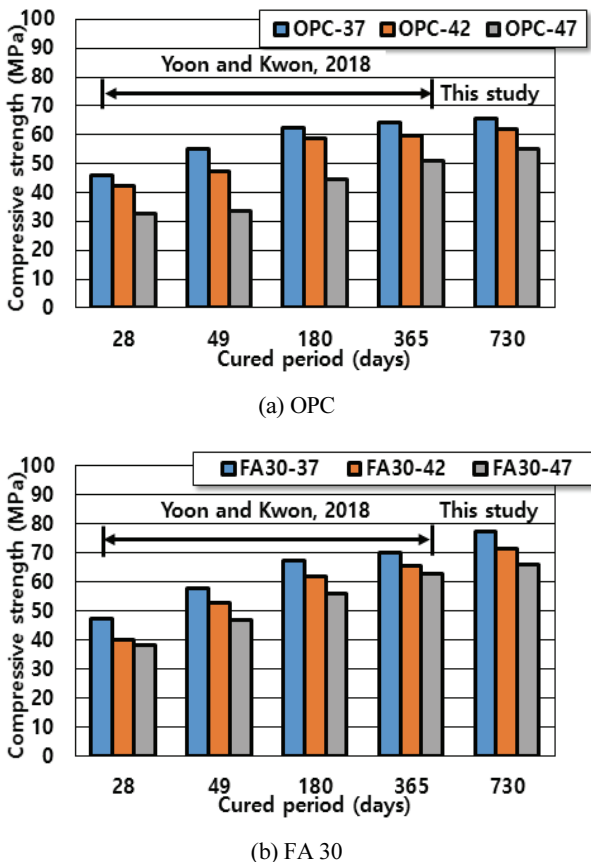


Fig. 8 Result of compressive strength

대에서는 60.1 % ~ 84.1 %, 비말대에서는 32.3 % ~ 57.6 %의 변화율을 나타내었다. 플라이애시의 재료적 변동성 및 옥외노출시험의 변동성이 존재하므로 추가 노출 기간을 고려한 연구를 통해 더욱 명확한 노출 조건에 따른 결보기 염화물 확산계수 거동을 평가할 수 있을 것으로 사료된다.

- 3) 각 배합의 압축강도를 평가한 결과 재령 28일에서부터 플라이애시 치환 배합에서 OPC 배합 대비 동등이상의 강도가 평가되었다. 재령 28일 대비 재령 730일에서의 강도 증가율은 OPC 배합에서는 142.9 % ~ 167.2 %를, 플라이애시 치환 배합에서는 164.1 % ~ 178.1 %를 나타내었으며, 플라이애시의 포졸란 반응에 의해 높은 강도 증진률이 나타난 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2018학년도 한남대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

- Bilodeau, A., Malhotra, V. M., and Golden, D. M. (1998), Mechanical Properties and Durability of Structural Lightweight Concrete Incorporating High-Volumes of Fly Ash, *ACI International*, 178, 449-474.
- Glasser, F. P., Marchand, J., and Samson, E. (2008), Durability of concrete — Degradation phenomena involving detrimental chemical reactions, *Cement and Concrete Research*, 38(2008), 226-246.
- KCI(Korea Concrete Institute). (1996), Latest Concrete Engineering, Kimoondang, Seoul, 453-459.
- 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(2002), 1943-1960.
- Kwon, S.O., Bae, S.H., Lee, H.J., and Jung, S. H. (2014), Characteristics for Reinforcement Corrosion and Chloride Ion Diffusion of High Volume Fly Ash Concrete, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 2(1), 34-39.
- 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(2016), 133-145.
- KS F 2714. (2017), Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete, KSSN, 1-3.
- KS L 5405. (2018), Fly Ash, KSSN, 1-8.
- Kim, H. J., Yoon, Y. S., Yang, K. H., and Kwon, S. J. (2019), Durability and purification performance of concrete impregnated with silicate and sprayed with photocatalytic TiO₂, *Construction and Building Materials*, 199, 106-114.
- Lee, J. W., Kim, K. M., Bae, Y. K., and Lee, J. S. (2004), Study on the field application according to the early strength of the concrete admixed with polycarboxylate superplasticizer, *In Korea Concrete Institute academic conference*, Korea Concrete Institute, Pyeongchang, 200-203.
- Lee, S. K., and James, Z. (2014), An FHWA Special Study: Post-Tensioning Tendon Grout Chloride Thresholds, Federal Highway Administration, FHWA-HRT-14-039, 7-20.
- 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.
- Metha, P. K., and Monteiro, P. M. (1993), Concrete-Structure, properties, and materials, 2nd edition, prentice Hall, New-Jersey, 160-165.
- Nath, P., and Sarker, P. (2011), Effect of Fly Ash on the Durability Properties of High Strength Concrete, *Procedia Engineering*, 14(2011), 1149-1156.
- Park, S. S., and Kim, M. W. (2013), Evaluation the Concrete mix by Type Accelerated Corrosion Test and Chloride Penetration Analysis with Artificial Seawater Cyclic Wet and Dry Condition, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 1(3), 211-218.
- Samsung Engineering Research Institute: SERI. (2003), Evaluation of chloride ion diffusion characteristics of high durability concrete.
- 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(1999), 487-495.
- Yoo, J. G. (2010), Durability Design of Concrete and Evaluation of Field Application on Reinforced Concrete Structure Exposed to Marine Environment, Ph.D. dissertation, Daejeon, Chungnam University, Department of Architectural Engineering.
- 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.
- Yoon, Y. S., and 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.
- Yang, H. M., Lee, H. S., Yang, K. H., Ismail, M. A., and Kwon, S. J. (2018), Time and cold joint effect on chloride diffusion in concrete containing GGBFS under various loading conditions, *Construction and Building Materials*, 167(2018), 739-748.

Received : 03/18/2019

Revised : 04/13/2019

Accepted : 04/17/2019

요 지 : 해안 지역에 시공된 철근 콘크리트 구조물은 해수 중의 염소 이온에 의해 내부 철근이 부식하게 된다. 특히 해안지역에서는 해수에 침지되는 경우뿐만 아니라 조수간만 및 비래염분의 영향을 받기 때문에 이에 대한 고려가 필수적이다. 본 연구에서는 3가지 수준의 노출 환경(침지대, 간만대, 비탈대)과 노출기간 180일, 365일, 730일을 고려하여 해양환경노출실험을 실시하였다. 대상 배합은 3가지 수준의 물-결합재 비 및 2가지 수준의 플라이애시 치환률(0%, 30%)을 고려하여 설정하였다. 모든 노출조건에서 플라이 애시 치환 배합이 OPC 배합 대비 낮은 겔보기 염화물 확산계수를 나타내었으며, 이는 플라이애시의 포졸란 반응이 원인으로 사료된다. 플라이애시 배합은 노출 기간 180일에서는 플라이애시 치환 배합이 OPC 배합 대비 최대 63.5%의 감소율을, 노출 기간 730일에서는 최대 55.8%의 감소율을 나타내었다. 노출 조건에 따른 확산계수 거동을 평가한 결과, 플라이애시 치환 배합에서는 간만대, 침지대, 비탈대 순으로 확산계수가 평가되었다. 간만대에서는 건습이 반복되어 염화물 이온의 침투가 빠르게 일어나는 것으로 보인다.

핵심용어 : 염해, 옥외노출, 겔보기 염화물 확산계수, 플라이애시
