

플라이애시 혼합 콘크리트의 철근 부식 저항성능 평가

박상순^{1*}

Corrosion-Resisting Performance Evaluation of Concrete Mixed with Fly-Ash

Sang-Soon Park^{1*}

Abstract: The role of fly ash in concrete become impotent with finding the characteristics of fly ash in which it is used as cement replacement material. In this paper, corrosion test results obtained by two test methods such as the long-term exposure corrosion test and the accelerated corrosion test method, were compared to investigated the corrosion resistance between fly ash concrete and normal concrete. Corrosion initiation time was measured in two types of concrete, i.e., one mixed with fly ash(FA) and the other without admixture(OPC). The accelerated corrosion test was carried out by four case, i.e., two samples is a cyclic drying-wetting method combined without carbonation(case 1) and combined with carbonation(case 2), and the other two samples is a artificial seawater ponding test method combined without carbonation(case 3) and combined with carbonation(case 4). Whether corrosion occurs, it was measures using half-cell potential method. The ponding test combined without carbonation was most effective in accelerating corrosion time of steel bars. The results indicated that the corrosion of rebar embedded in concrete occurred according to the order of OPC, FA. The delay relative ratio of corrosion obtained by corrosion initiation time between FA and OPC is 1.04 to 1.27. Consequently, fly ash concrete as the age increases its corrosion resistance was improved compared with OPC concrete.

Keywords: Fly-Ash, Accelerated corrosion test, Long-term exposure test, Corrosion of rebar, Combined deteriorating action of carbonation

1. 서 론

화력발전소에서 원료로 사용하는 석탄을 연소할 때 발생하는 플라이애시는 과거에는 주로 매립용으로 사용되어 왔으나 최근에는 콘크리트의 품질과 시멘트 대체를 위한 혼화제로서 경제적 시공과 산업부산물의 재활용이라는 측면에서 그 활용방안이 연구되고 있다(Shin et al., 2000). 국내 석탄회의 발생량은 2009년 기준으로 연간 약 835만 톤이며 이중 62.8%가 재활용되고 있다. 그러나 재활용 용도가 유사한 고로슬래그의 발생량인 1,000만 톤 이상으로 증가되면서 석탄회의 재활용률은 계속 저하되고 있어 새로운 플라이애시 활용기술 확보를 통한 신규시장 창출이 필요한 실정이다(Yoo, 2013). 한편 3면이 바다로 둘러싸인 지역적 특성으로 우리나라는 각종 해양구조물의 계획과 건설이 활발하게 이루어지고 있으며 해양환경에서 염해에 저항할 수 있는 적절한 내구성 확보방안에 대해 다양한 연구가 진행되고 있다. 재료적 측면에서는 다양한 혼화재료의 적용이 염해에 대한 저항성을 향상시키는

데 효과적이며, 플라이애시의 혼합도 콘크리트 구조물의 염해저항성을 향상시킨다고 알려져 있다(Park and Oh, 1997; Oh, 2011).

염해에 대한 내구성 설계를 위해서는 철근 콘크리트의 내구수명 예측이 필수적이며 이를 위한 예측방법들이 다양하게 제시되고 있다. 염해 환경에 노출된 철근 콘크리트 구조물의 내구수명 산정은 일반적으로 철근의 위치까지 염화물 이온이 침투하여 부식임계농도에 도달하는 시간을 추정하는 방법을 사용해 왔다(Saetta et al., 1993; Otieno et al., 2014; Kwon, 2015). 최근에는 해석 및 예측 기술의 발전으로 Life-365와 같은 범용성 전산해석프로그램의 적용이 확대되고 있으나 부식 임계농도에 도달하는 시간의 가장 확실하고 신뢰성 있는 측정 방법은 실제 해양환경에 노출된 시편의 부식모니터링일 것이다. 그러나 철근부식의 발생시점을 비파괴적으로 측정하는 모니터링 기술의 정교함이 부족하며 장기간이 소요된다는 단점으로 아직까지도 관련 연구자료의 축적이 부족한 편이다. 본 연구에서는 그 동안 장기 노출시험의 단점을 보완하기 위한 다양한 촉진부식시험을 통해 장기노출시험과 촉진부식시험과의 상관성 도출 및 철근부식 모니터링 방법 체계화 연구를 꾸준히 진행해 왔다(Park and Jeong, 2014; Park and Lee, 2014; Park, 2016; Park and So, 2016).

따라서 본 연구에서는 플라이애시(FA) 혼합을 통한 내부식

¹정회원, 상명대학교 건설시스템공학과 부교수, 교신저자

*Corresponding author: parkss87@smu.ac.kr

Dept. of Civil Engineering, Sangmyung University, Cheonan, 31066, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2017년 2월 1일까지 학회로 보내주시면 2017년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

성 콘크리트 개발을 위한 기초적인 연구로서 장기노출시험 및 다양한 촉진부식 모니터링시험결과를 통해 플라이애시 혼합 콘크리트의 염해저항성을 평가하였다. 비교를 위해서 동일 물결합재비의 보통 1종 포틀랜드 시멘트(OPC)배합 시편도 함께 평가하였다. 또한 기본적인 물성 평가를 위해서 압축강도, 비정상상태 염화물촉진확산시험 등을 수행하였다. 또한 부식개시시점의 이론적 예측식을 통해 실제 실험결과와의 타당성을 검증하였으며 OPC의 부식발생시점과 OPC 대비 FA의 부식발생개시일 상대비를 비교하여 FA의 부식지연비를 도출하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 사용재료 및 배합특성

시멘트는 국내에서 제조한 보통 포틀랜드 시멘트로 H사 제품을 사용하였다. 플라이애시(FA)는 2종을 사용하였다. 이들 각각의 물리 및 화학적 성질은 Table 1, 2와 같다. 잔골재는 충남 광주 강모래, 굵은 골재는 최대치수 20 mm의 쇄석으로 각각의 물리적 성질은 Table 3과 같다. 실험에 사용된 배합은

Table 1 The chemical composition and strength properties of cement

Specific gravity (g/cm ³)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Fineness (cm ² /g)	Compressive Strength (MPa)		
				3day	7day	28day
3.15	2.1	2.2	2,800	26.7	41.2	57.6

Table 2 Chemical composition and properties of fly-ash(FA)

Item	SiO ₂ (%)	Al ₂ SO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SO ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Fineness (cm ² /g)
FA	64.2	19.9	4.5	0	3.8	1.1	3,580

Table 3 Physical properties of the fine and coarse aggregate

Item	Density (g/cm ³)	Surface absorption rate(%)	Fineness modulus	Unit weight (kg/m ³)
Fine ag.	2.6	1.5	2.5	1,597
Coarse ag.	2.7	0.9	6.5	1,655

Table 4 Mix proportions for concrete specimens

Mix.	W/B (%)	Unit Weight(kg/m ³)					
		W	C	FA	BS	S	G
OPC	60	165	275	-	-	840	975
FA	60	165	220	55	-	840	975

Table 4와 같다. 철근의 부식을 보다 촉진시키기 위해 몰시멘트비는 60%로 하였다. FA는 시멘트의 중량비로 15~20% 치환시 내구성이 향상된다고 알려져 있으며, 콘크리트 표준시방서에서 제빙화학제 노출시 25% 이하로 배합비율을 제한하고 있는 점 등을 고려하여 치환비율을 20%로 하였다. 실험결과와의 비교를 위해 FA를 치환하지 않은 배합을 OPC로 하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 부식촉진시험

본 연구에서는 철근의 부식발생 확률이 가장 높은 간만대 환경을 재현하기 위하여 총 4가지의 촉진부식 시험법을 적용시켰다. case 1은 3일간 인공해수에 침지시킨 후 15°C, 상대습도 60%인 항온항습기에서의 4일간 건조를 1사이클로 한 건조반복시험법으로 KS F 2599를 기반으로 하였다. case 2는 탄산화의 복합열화를 고려한 시험으로 3일간 인공해수에 침지시킨 후 시편을 꺼내 4일간 15°C, 상대습도 60%이며 CO₂ 농도 5%인 촉진탄산화시험기에 건조노출을 1사이클로 반복하였다. case 3의 경우 Fig. 1(c)와 같이 시편 상면에 염수를 담을 수 있는 작은 pool을 아크릴로 만든 후 Fig. 1(d)와 같이 65°C, 상대습도 60%로 항온항습기에 부식발생시까지 지속적으로 노출시켰다. case 4는 탄산화를 고려한 복합열화 조건이며 case 3과 같은 작은 pool을 시편 상면에 설치한 시편을 15°C, 상대습도 60%, CO₂ 농도 5% 조건인 탄산화시험기에 넣고 부식발생시까지 지속적으로 노출시켰다.

염수로 사용한 인공해수의 농도는 KS F 2599를 기준으로

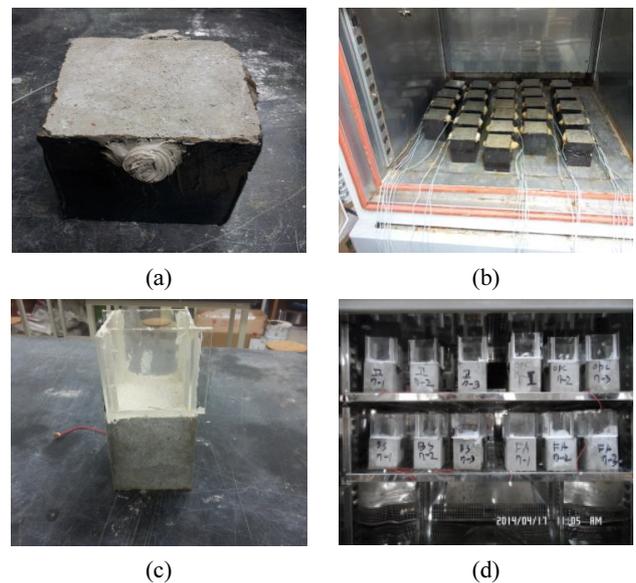
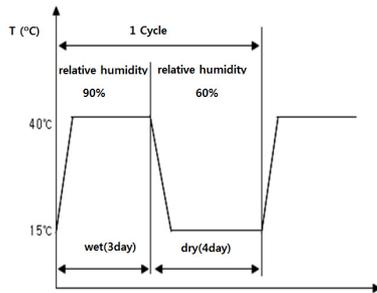


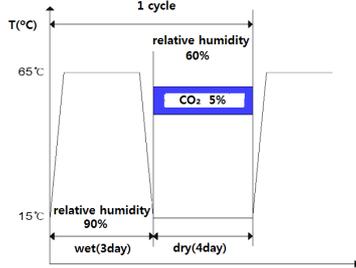
Fig. 1 (a) Photo of specimen used in case 1, 2, (b) specimens in constant temperature and humidity chamber, (c) specimen used in case 3, 4, (d) specimens in rapid carbonation test chamber

Table 5 Artificial seawater composition table(g/L)

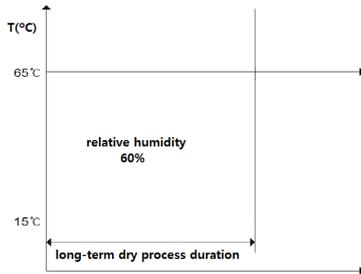
NaCl	MgCl ₂ · 6H ₂ O	Na ₂ SO ₄	CaCl ₂	KCl
24.5	11.1	4.1	1.2	



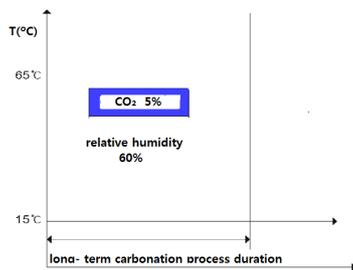
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 2 Condition of Accelerated Corrosion Test: (a) case1, wet and dry, (b) case2, wet and carbonation dry, (c) case3, ponding in dry, (d) case4, ponding in carbonation dry

하였으며, 해수의 성분표는 Table 5에 나타내었다. 실험에 사용된 시편은 부식발생을 촉진시키기 위해 피복두께 10 mm로 하였으며, 100 × 100 × 100 mm 정사각형 몰드를 사용하여 제

Table 6 Test condition of accelerated corrosion by cyclic drying and wetting environment

	Wet			Dry		
	Temp.(°C)	R.H.(%)	Day	Temp.(°C)	R.H.(%)	Day
case 1	40	90	3	15	60	4
case 2	65	90	3	15	60	4
case 3	-	-	-	65	60	all
case 4	-	-	-	15	60	all

작하였다. 철근의 코팅 및 이물질을 제거하기 위하여 연마지를 사용하여 표면처리를 실시하였다. 시편에 매입되는 철근의 길이는 120 mm이며, 육안으로 부식의 유무를 확인하기 위해 이형철근이 아닌 원형철근을 사용하였다. 반전지전위 구성을 위한 전선은 방수 가능한 방수커넥터가 적용되었다. 철근부식모니터링은 황산구리 전극(copper sulfate electrode: CSE)을 이용한 반전지전위법(half-cell potential method)으로 매일 1회씩 실시하였다. 철근이 돌출된 면에만 에폭시 코팅 처리를 하여 4면을 외기에 노출시켰다. 실험시편은 Fig. 1과 같고 시험 조건은 Table 6 및 Fig. 2에 요약하였다.

2.2.2 염화물이온침투저항성

염화물 확산계수 산정을 위한 염화물 침투시험은 NT Build 492에 기초하여 실시하였다. 공시체는 시험 전 원주형 공시체의 중앙부를 50 mm 두께로 절단하고 콘크리트 시편 내부에 포화되어 있는 모세관수 및 층간수 등을 제거하기 위해 3시간의 진공처리를 실시하였다. 그 후 포화 Ca(OH)₂ 수용액을 주입한 후 대기압 상태에서 18±2 시간동안 침지하는 전처리 과

Table 7 Test condition according to the initial current value(Zhang and GjØrv, 1994)

Initial current I _{30v} (with 30V) (mA)	Applied voltage U (after adjustment) (V)	Possible new initial current I ₀ (mA)	Test duration (hour)
I ₀ < 5	60	I ₀ < 10	96
5 ≤ I ₀ < 10	60	10 ≤ I ₀ < 20	48
10 ≤ I ₀ < 15	60	20 ≤ I ₀ < 30	24
15 ≤ I ₀ < 20	50	25 ≤ I ₀ < 35	24
20 ≤ I ₀ < 30	40	25 ≤ I ₀ < 40	24
30 ≤ I ₀ < 40	35	35 ≤ I ₀ < 50	24
40 ≤ I ₀ < 60	30	40 ≤ I ₀ < 60	24
60 ≤ I ₀ < 90	25	50 ≤ I ₀ < 75	24
90 ≤ I ₀ < 120	20	60 ≤ I ₀ < 80	24
120 ≤ I ₀ < 180	15	60 ≤ I ₀ < 90	24
180 ≤ I ₀ < 360	10	60 ≤ I ₀ < 120	24
I ₀ ≥ 360	10	I ₀ ≥ 360	6

정을 거쳤다. 0.3N의 NaOH 수용액을 양극(Anode)으로, 10%의 NaCl 수용액을 음극(Cathode)으로 하여 초기 30V 전압을 가했을 때의 초기 전류값을 기초로 하여 가압 전압 및 시험시간을 결정하였다. 염화물 침투깊이는 시험이 종료된 후 시험편을 쪼개어 절단면에 0.1 M의 질산은(AgNO₃) 용액을 분무하였을 때 은회색으로 변색된 부위를 측정하였다. 시험결과를 공시체 5개에 대하여 측정값 중 최고값과 최소값을 제외한 공시체 3개의 평균값으로 하여 소수점이 하에서 끝맺음하였다. 적용 전압 및 콘크리트 시편의 시험시간은 Table 7과 같다.

측정은 공시체 양단의 10 mm를 제외하고 중심에서 외측방향으로 10 mm 간격씩 7곳을 측정하여 그 평균 깊이를 염화물의 침투깊이로 하였다. 비정상상태에서의 염화물 확산계수 산정은 식 (1)에 의해 산출하였다.

$$D_{nssm} = \frac{R \cdot T \cdot L}{z \cdot F \cdot U} \cdot \frac{x_d - \alpha \cdot \sqrt{x_d}}{t} \quad (1)$$

여기서, D_{nssm} = 염화물이온 촉진 이동계수(m²/sec)

$$\alpha = 2 \cdot \sqrt{\frac{R \cdot T \cdot L}{z \cdot F \cdot U}} \cdot \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2 \cdot c_d}{c_o} \right)$$

z = 염화물 이온에 대한 이온 원자가(=1)

F = 패러데이 상수(9.648 · 10⁴ J · (K · mol)⁻¹)

R = 기체상수(8.314 J · (K · mol)⁻¹)

T = 용액온도(K)

U = 양극과 음극 사이의 전위차(V)

L = 시편의 두께(m)

x_d = 염화물이온의 침투깊이(m)

erf^{-1} = 오차함수의 역함수

c_d = 색깔이 변화하는 위치에서의 염화물 농도 (=0.07N)

c_o = 상부셀 시약의 염화물 농도(=2N)

2.2.3 장기폭로시험

장기폭로 시험은 부식촉진 시험과 동일한 배합을 사용하였으며, 100 × 100 × 400 mm 시편을 사용하였다. 부식촉진 시험과 동일한 방법으로 6면 중 5면을 에폭시로 코팅하여 일방향 침투를 유도하였으며, 피복두께는 10 mm이다. 부식개시의 판단은 반전지전위법을 이용하였으며 일정한 간격으로 측정을 실시하였다. 안산 시화호에 있는 한국건설생활환경시험연구원의 해양폭로시험장은 노출조건에 따라 침지대와 간만대 및 비말대 등으로 구분되어 있으며, 각 위치마다 촉진시험과 동일한 배합의 시편을 폭로시켜 주기적으로 부식모니터링을 실시하였다.

2.2.4 압축강도 시험

OPC와 FA 배합의 재령에 따른 압축강도 변화를 평가하기 위하여 $\phi 100 \times 200$ mm 원주형 공시체를 제작하여 KS F 2405 “콘크리트 압축강도시험방법”에 기초하여 재령에 따른 압축강도의 변화를 측정하였다.

2.2.5 부식발생시점의 이론적 예측식

콘크리트에 침투하는 염화물 이온의 침투속도는 Fick이 제안한 제 1법칙에 따라 식 (2a)와 같이 확산계수와 염화물 농도 기울기의 곱으로 나타낼 수 있다. 정상류(steady state)에서는 시간에 따른 염화물 농도의 변화가 없으므로 침투속도를 이용하여 염화물 침투거동을 분석할 수 있다. 그러나 비정상류(non steady state)에서는 시간에 따른 염화물 농도의 기울기가 발생하여 침투속도만으로는 침투거동의 분석이 어려우므로 물질 보존 법칙을 적용시켜 식 (2b)와 같은 침투속도 기울기와 시간에 따른 염화물농도의 항으로 나타낼 수 있다.

$$J = -D \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \quad (2a)$$

$$\frac{\partial J}{\partial x} = -\frac{\partial c}{\partial t} \quad (2b)$$

여기서, J 는 침투속도(kg/m²·sec)이며 c 는 염화물 농도(kg/m³), t 는 시간(sec), x 는 침투깊이(m), D 는 염화물 확산계수(m²/sec)이다. 식 (2a)를 (2b)에 대입하면 Fick의 제 2법칙으로 불리는 식 (3a)와 같은 염화물 확산 지배방정식이 도출된다. 염화물 확산 지배방정식은 시간과 공간항을 변수로 가지고 있어 식 (3b) 및 (3c)와 같은 초기조건과 경계조건을 이용하여 일반해를 도출할 수 있다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (3a)$$

$$\text{초기조건 } c(x, 0) = 0 \quad (x > 0) \quad (3b)$$

$$\text{경계조건 } c(0, t) = c_s \quad (t \geq 0) \quad (3c)$$

여기서, c_s 는 표면염화물 농도(kg/m³)를 나타낸다. 초기조건과 경계조건을 만족하는 지배방정식은 다양한 식들이 제안되고 있으나 일반적으로 가장 많이 적용되는 식은 Crank(1975)에 의해 제안된 식 (4)이다.

$$c(x, t) = c_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right] \quad (4)$$

여기서, erf 는 오차함수이며, 수학적으로는 식 (5)와 같이 지수함수의 적분의 형태로 나타낼 수 있다.

$$erf(s) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^s e^{-\lambda^2} d\lambda \quad (5)$$

식 (4)에 적용되는 염화물이온의 겉보기 확산계수 D 의 경우 시간의존성 함수로 알려져 있으며 식 (6)과 같은 지수함수의 형태로 나타내고 있다(Thomas and Bentz, 2002).

$$D(t) = D_{ref} \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^n \quad (6)$$

여기서, $D(t)$ 는 시간 t 에서의 확산계수(m^2/s), D_{ref} 는 기준 시간(t_{ref})에서의 확산계수, n 은 재령계수이다. 염화물 침투 해석에서 확산계수의 시간의존성을 고려하지 않고 초기의 염화물확산계수를 대입하여 식 (4)의 해를 구하면 지나치게 염화물 농도가 크게 산정되므로 이를 해결하기 위하여 확산계수의 평균값을 대입한다. 확산계수 평균값 $D_m(t)$ 은 Fig. 3과 같이 시간 t 까지의 확산계수를 적분하여 시간으로 나눈 값으로 나타낼 수 있다.

본 연구에서는 이러한 확산계수의 시간의존성을 식 (7a) 및 (7b)와 같이 나타내었다(Poulsen, 1993).

$$D_m(t) = \frac{D}{1-n} \left(\frac{t_o}{t} \right)^n \quad (t < t_c) \quad (7a)$$

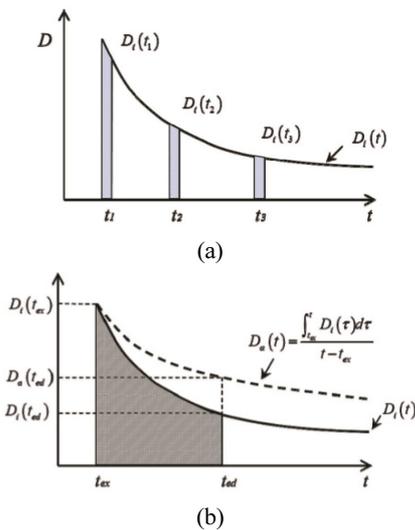


Fig. 3 (a) Determination of instantaneous diffusion coefficient, (b) apparent diffusion coefficient(Note: Dark area indicates test or exposure duration) (Yanbo et al., 2015)

$$D_m(t) = \frac{D}{1-n} \left(\frac{t_o}{t} \right)^n \left[1 - n + n \left(\frac{t_c}{t} \right) \right] \quad (t \geq t_c) \quad (7b)$$

여기서, $D_m(t)$ 는 시간 t 에서의 평균 확산계수(m^2/sec) D 는 t_o 에서의 확산계수, t_c 는 확산계수가 더 이상 감소하지 않는 시간(일반적으로 30년)을 나타낸다(Moon et al., 2016).

콘크리트의 부식발생시점은 식 (7a) 또는 (7b)를 고려하여 식 (4)에서 시간항을 좌측으로 이항하여 정리하면 식 (9)와 같은 철근 부식개시 예측식으로 나타낼 수 있다.

$$t = \left[\left(\frac{2}{x} \cdot erf^{-1} \left(1 - \frac{c_{cr}}{c_s} \right) \right)^{-2} \cdot \frac{1-n}{D \cdot t_o^n} \right]^{\frac{1}{1-n}} \quad (8)$$

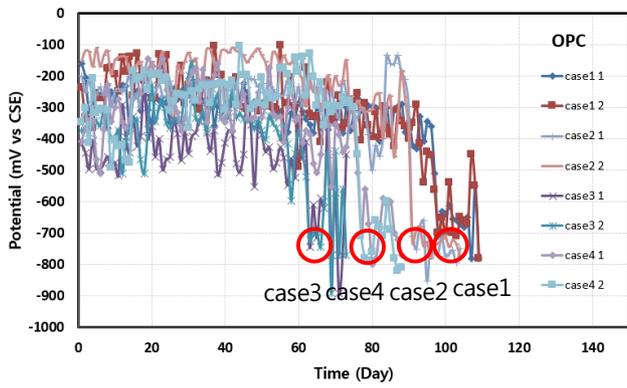
여기서, x 는 피복두께(m), c_{cr} 은 임계염화물량(kg/m^3)이며 t_o 는 촉진염화물시험시의 재령이다.

3. 실험결과 및 분석

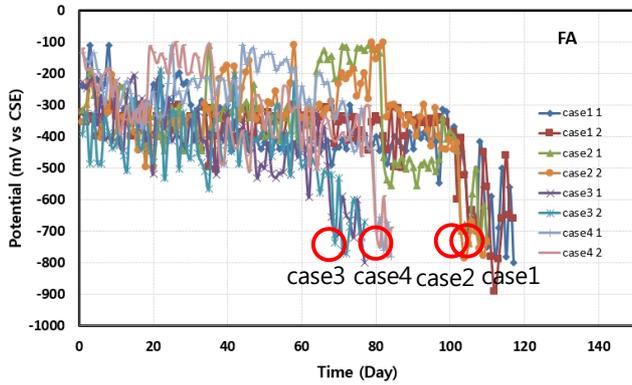
3.1 촉진부식시험의 모니터링 결과

철근부식모니터링은 반전지전위법을 사용하였으며, 기준 전극으로는 황산구리전극을 사용하였다. Romagmoli(2002)에 의하면 환산구리 전극에서는 자연전위가 -350 mV 이하인 경우 부식발생 확률을 90% 이상으로 판단하고 있으나, 선행연구 결과 자연전위의 절대값보다는 자연전위의 급변화 구간이 철근부식과의 상관성이 높다는 것을 확인하였다(Park and Jeong, 2014; Park and Lee, 2014). 따라서 본 연구에서는 -700 mV 이하에서 자연전위 측정그래프의 기울기 급변화시점을 부식발생시점으로 판단하였다. 촉진부식 case 1, 2, 3, 4 시험조건에 염해에 노출된 시편의 철근부식모니터링은 매일 실시하였으며, 모니터링 결과는 Fig. 4에 나타내었다. case 1, 2, 3, 4 모두 반전지전위법으로 철근부식모니터링을 실시한 결과 모든 시편에서 일정시간이 경과한 후 부식이 발생하였다고 판단되었다. 측정된 결과 값을 보면 비교적 안정적인 값을 보이다가 부식개시 시점으로 판단되는 구간에서 비슷한 시기에 전위가 급격히 상승하는 경향을 보였으며, 부식개시시점으로 판단되는 시기에 시편을 UTM을 이용하여 쪼개어 철근의 부식을 육안으로 확인하였으며 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 탄산화를 결합한 case 2, 4의 경우 페놀프탈레인 용액을 이용하여 탄산화 깊이를 실시하였다. 탄산화 깊이 측정결과 피복두께 이상으로 탄산화가 진행된 시편은 없었으며 1 mm 내외의 탄산화가 진행되어 탄산화 정도는 크지 않은 것으로 평가되었다.

건습반복 촉진시험방법별로 철근부식발생시기를 비교하

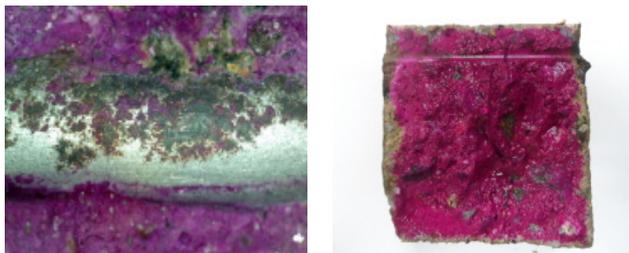


(a)



(b)

Fig. 4 Results of half-cell potential with time after accelerated corrosion test according to cyclic drying-wetting conditions in artificial seawater solution depending on mix proportion and the number of cycle: (a) OPC, (b) FA



(a)



(b)

Fig. 5 Photographs of corroded rebar and crushed specimen after accelerated corrosion test: (a) OPC, (b) FA

Table 8 Result of accelerated corrosion test

Type		Monitoring	Corrosion initiation time(day)
case 1	OPC	Half cell	98
	FA	Half cell	105
case 2	OPC	Half cell	91
	FA	Half cell	103
case 3	OPC	Half cell	63
	FA	Half cell	70
case 4	OPC	Half cell	77
	FA	Half cell	80

면 산소 및 인공해수의 공급을 연속적으로 받는 ponding 시험 방법인 case 3과 4가 일정기간 건습을 반복하는 case 1, 2 보다 부식이 촉진되었다. case 3과 case 4의 부식발생시의 차이는 온도차이에 기인한 것으로 판단된다. 탄산화 복합열화조건을 고려하여 탄산화 시험기에 넣은 case 4의 경우에는 온도가 15°C이며, 항온항습기에 넣은 case 3의 경우에는 온도가 65°C였으며 이러한 온도차이가 부식발생시점의 차이를 발생 시킨 것으로 판단된다. 선행연구인 침지조건에서의 시험에서도 온도가 높은 조건에서 부식이 촉진되는 결과를 얻었다(Park and Jeong, 2014). 탄산화에 의한 복합열화조건은 ponding 시험조건에서는 상대적으로 온도에 비해 영향을 미치지 못하였지만, 건습반복조건에서는 복합열화 조건인 case 2에서는 case 1보다 부식이 촉진되는 것으로 나타났다. 그러나 case 1과 2에서도 습윤 조건에서 약간의 온도차이가 있었던 점을 감안하면 상대적으로 탄산화에 의한 복합열화는 온도조건에 비하면 부식촉진에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 평가된다. case 1, 2, 3, 4 모두 동일하게 OPC보다 FA의 부식발생이 지연되었다. 또한 부식발생시점이 늦어질수록 FA의 부식 지연비가 커지는 경향이 나타났다. 재령이 증가할수록 포졸란 반응에 따른 강도 및 수밀성이 증가되는 FA 혼합 콘크리트의 물리적 특성이 반영된 결과로 평가된다. 각 case별로 배합에 따른 부식발생시점을 Table 8에 나타내었다.

3.2 염화물이온 침투저항성 시험결과

NT Build 492에 기초한 비정상상태 이동계수(Non-steady-

Table 9 Resistance to chloride ion penetration test results

Specimen	Non-steady-state migration coefficient(D_{nssm}) [$\times 10^{-12} m^2/s$]	Age (day)
OPC	3.840	7
FA	3.351	7
OPC	3.528	90
FA	2.036	90

state migration coefficient: D_{nssm}) 측정 실험에 따른 염화물이 온 침투저항성 평가결과 Table 9와 같다. 재령 7일에 측정된 염화물의 이동계수인 D_{nssm} 은 OPC와 FA가 유사한 것으로 나타났다. 재령 90일에 측정된 이동계수는 FA의 값이 OPC보다 감소하는 것으로 나타났다. FA의 경우 포졸란 반응으로 장기재령으로 갈수록 강도 및 수밀성이 증가하는 것으로 알려져 있으며 실제 확산계수 측정결과도 재령의 증가에 따라 OPC에 비해 큰 폭으로 감소하는 것으로 나타났다.

3.3 압축강도 시험결과

재령에 따른 압축강도 시험결과 Table 10에서와 같이 재령 14일까지는 OPC의 강도가 FA에 비해 높게 나타났으나, 28일 이후부터는 FA의 포졸란 반응에 따른 강도증가 효과로 FA의 강도가 OPC를 역전하는 현상이 나타났다.

3.4 장기폭로시험결과

해양환경시험장의 간판대에서 장기폭로시킨 시편에서 측정된 자연전위 모니터링 결과에 따른 부식 발생시점은 선행 연구에서 나타난 바와 같이 Table 11과 같다(Park, 2016). 장기폭로 시험결과도 촉진시험과 동일하게 FA의 부식 발생시점이 OPC보다 지연되는 것으로 나타났다.

3.5 부식발생시점의 예측

식 (9)를 통하여 OPC와 FA의 부식발생시점을 이론적으로 예측하였다. 해석을 위한 입력 변수인 표면염화물량인 c_s 및

Table 10 Result of compressive strength according to mix proportion due to change in age(MPa)

	7 days	14 days	28 days	56 days
OPC	20.49	26.52	27.01	28.48
FA	18.45	24.42	30.71	35.17

Table 11 Result of long term exposed corrosion test

Type	Monitoring	Corrosion initiation time(day)
case 1	OPC	415
	FA	525

Table 12 Analysis parameter

	OPC	FA
c_s (kg/m ³)	4.656	4.476
c_{cr} (kg/m ³)	1.375	1.375
D_r (10 ⁻¹² m ² /sec)	3.840	3.351
n	0.37	0.37

임계염화물량인 c_{cr} 은 Table 12에서와 같이 DuraCrete(2000)에서 제안한 값을 적용하였다. 기준 확산계수는 7일 재령에서의 비정상상태 이동계수 측정값을 기준으로 하였다. 재령계수의 경우도 OPC의 경우 DuraCrete 모델식을 기초로 하였으며, FA의 경우에는 DuraCrete 모델식에서 제안하는 0.93 적용시 일반적인 해석범위를 벗어나는 결과를 초래하였다. 재령계수가 증가할수록 부식발생시점이 지연되므로 이를 감안하여 보다 보수적인 결과도출을 위해 본 연구에서는 OPC와 FA에 모두 동일한 0.37을 적용하여 해석하였다.

해석결과는 Table 13과 같이 OPC의 부식발생시점은 380일로 예측되었으며, FA의 경우 510일로 예측되었다. 실제 장기폭로시험에 따른 부식발생시점은 OPC의 경우 415일이었으며 FA의 경우 525일로 나타났으므로 해석결과가 OPC에서는 35일, FA의 경우에는 15일 빠르게 예측되었다. 임계염화물 농도와 표면염화물 농도 등 해석 입력값 중 불확실한 변수가 많기 때문에 나타난 현상으로 판단된다. 예측결과와 실험값이 정확하게 일치하지는 않았지만 FA의 부식발생시점이 OPC에 비해 지연되는 것은 실험에서 뿐만 아니라 해석상으로도 명확하게 확인할 수 있었다. 이는 촉진부식시험결과에서도 일관성 있게 나타나는 결과로서 FA 혼합 콘크리트가 OPC 혼합 콘크리트보다 부식저항성능이 우수한 것을 확인할 수 있었다. 또한 실험결과 역시 어느 정도 타당한 범위 내에 있다고 평가할 수 있었다.

Table 13 Comparison of test and analysis result

Type	The time to initiation of corrosion(days)	
	test	analysis
OPC	415	380
FA	525	510

Table 14 Relative ratio of corrosion time between OPC and FA by test types and analysis results

Condition	Corrosion time(day)		relative ratio $\left(\frac{corrosion\ time_{FA}}{corrosion\ time_{OPC}}\right)$	Note
	OPC	FA		
analysis	380	510	1.34	tidal
long-term exposure	415	525	1.27	tidal
accelerated corrosion	98	105	1.07	case 1
accelerated corrosion	91	103	1.13	case 2
accelerated corrosion	63	70	1.11	case 3
accelerated corrosion	77	80	1.04	case 4

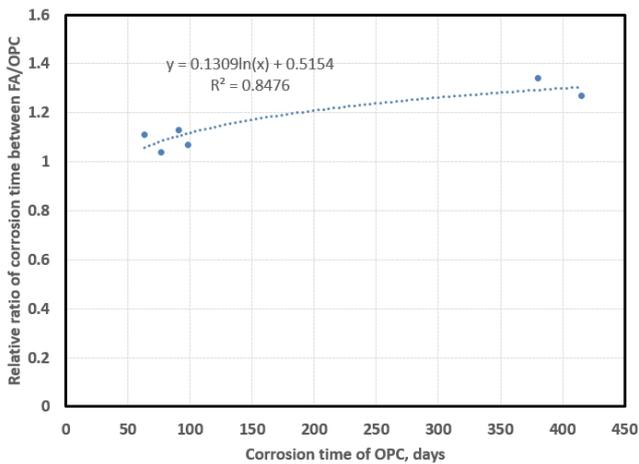


Fig. 6 The corrosion time of OPC vs. relative ratio of corrosion time between OPC and FA

축진부식 및 장기폭로시험 결과와 이론적 해석결과를 종합하면 Table 14와 같다. 해석상으로는 FA를 혼합한 콘크리트가 34% 정도 부식발생시점이 지연되는 것으로 예측되었으나, 실제 축진 실험결과에서는 4~13% 정도 지연되었으며, 장기폭로시험에서는 27% 정도 지연되는 것으로 나타났다. Fig. 6에서와 같이 부식발생시점이 늦어질수록 OPC 대비 FA 부식발생시점 대비(FA부식발생시점/OPC부식발생시점)가 커지는 경향이 나타났다. 즉, 재령이 증가할수록 FA가 OPC에 비해 부식발생시점이 더욱 지연되는 현상을 나타낸 것이다. 회귀분석 결과 재령과 부식발생상대비는 로그함수 관계를 가지고 있는 것으로 나타났다. 포졸란 반응에 따른 FA의 장기강도 증진에 따른 내구성 향상 효과가 반영되는 것으로 판단된다.

3. 결론

플라이애시를 시멘트 대비 20% 치환한 콘크리트 배합인 FA에 대한 철근의 축진 및 장기 부식시험 및 압축강도, 염화물이온침투저항성시험, 해석적 예측 등을 통하여 얻은 결과를 OPC 배합과 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 건습반복 및 탄산화의 복합열화를 고려한 총 4가지 경우의 축진부식시험결과 모든 시험경우에서 FA가 OPC보다 부식이 4~13% 정도 지연되었다. 축진시험방법에 따른 비교 결과 일정기간의 습윤과 건조를 반복한 case 1, 2보다는 시편 상부에 인공침지대를 설치하여 산소 및 염수의 공급이 계속되는 염수 ponding 시험법인 case 3, 4에서 배합철근의 부식이 축진되는 것으로 나타났다. 또한 탄산화를 고려한 복합열화의 효과보다는 온도의 영향이 더 크게 작용

하는 것으로 나타났다.

- 2) 압축강도 시험결과 재령 28일을 기점으로 FA의 강도가 OPC를 역전하는 현상이 나타났으며, 염화물이온침투저항성은 장기재령에서 FA가 OPC에 비해 더욱 작아지는 현상을 나타냈다.
- 3) 이론 예측식을 통해 구한 해석값은 실제 실험결과보다는 부식 발생시점이 빠르게 평가되었으며 전체적인 경향은 실험결과와 유사한 것으로 나타났다.
- 4) OPC의 부식 발생시점 대비 FA부식발생시점/OPC부식발생시점 상대비를 도표화한 결과 OPC의 부식발생시점이 늦어질수록 부식상대비가 커지는 것으로 나타났다. 즉, 재령이 커질수록 FA의 부식지연효과가 더욱 커지는 것을 확인할 수 있었으며, OPC 대비 최대 27% 철근부식 지연효과가 있는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 상명대 교내연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

Crank, K. (1975), *The Mathematics of Diffusion*, The Clarendon Press (2), Oxford, 19-21.

DuraCrete Final Report. (2000), *General Guidelines for Durability Design and Redesign*, The European Union-Brite EuRam III.

KS F 2599-2. (2008), *Standard test method for the accelerated corrosion of reinforced concrete (wet-drying cycles method)*, *Korean Industrial Standards*.

Kwon, S. J. (2015), Evaluation of Service Life in RC Column under Chloride Attack through Field Investigation : Deterministic and Probabilistic Approaches, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, 19(5), 67-74. (In Korean)

Mun, J. M., Kim, J. Y., Kim, Y. J., Oh, G. S., and Kwon, S. J. (2016), Analysis Technique for Chloride Penetration using Double-layer and Time-Dependent Chloride Diffusion in Concrete, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, 19(5), 83-91. (In Korean)

NT Build 492. (1999), *Concrete, Mortar and Cement-base Repair Materials : Chloride Migration Coefficient From Non-Stead-State Migration Experiments*, *Nordtest Method*.

Oh, S. G. (2011), An Evaluation of Chloride Attack Resistibility of Concrete Mixed with Fly Ash, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, AIK, 27(6), 91-98. (In Korean)

Otieno, M., Beushausen, H., and Alexander, M. (2014), Chloride-induced Corrosion of Steel in Cracked Concrete-Part II: Corrosion Rate Prediction Models, *Cement and Concrete Research*, 79, 386-394.

- Park S. B., and Oh, K. C. (1997), An Experimental Study on the Seawater Resistance of Steel Fiber Reinforced Concrete using Fly Ash, *Journal of the Korea Concrete Institute*, KCI, 9(3), 189-197. (In Korean)
- Park, S. S., and Lee, M. W. (2014), Study on the Correlation Between Long-term Exposure tests and Accelerated Corrosion tests by the Combined Damage of Salts, *Corrosion Science and Technology*, KCSS, 13(6), 214-223. (In Korean)
- Park, S. S. (2016), A Study on the Durability Between Cyclic Drying-Wetting Accelerated Corrosion Test, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, 20(4), 136-143. (In Korean)
- Park, S. S., and Jeong, J. W. (2014), A Study of Accelerated Corrosion Test and Chloride Penetration Analysis with Artificial Seawater Immersion Condition, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, 18(1), 93-99. (In Korean)
- Park, S. S., and So, B. T. (2016), A Study on Accelerated Corrosion Test by Combined Deteriorating Action of Salt Damage and Freeze-Thaw, *Corrosion Science and Technology*, KCSS, 15(1), 18-27. (In Korean)
- Poulsen, E. (1993), On a Model of Chloride Ingress into Concrete, Nordic Mini Seminar-Chloride Transport, Department of Building Materials, Gothenburg.
- Romagnoli, R., Batic, R. O., Vetere J. D., and Sota, I. T. (2002), The Influence of the Cement Paste Microstructure on Corrosion and the Adherence of Reinforcing bars as a Function of the Water-cement Ratio, *Anti Corrosion Methods and Materials*, 49(1), 454-462.
- Saetta, A. V., Scotta, R. V., and Vitaliani, R. V. (1993), Analysis of Chloride Diffusion into Partially Saturated Concrete, *ACI Materials Journal*, ACI, 90(47), 441-451.
- Shin, J. I., Ryu, T. E., Yang, S. K., and Koo, B. K. (2000), Durability of Recycled Aggregate Concrete Incorporating Fly Ash, *Journal of the Korea Concrete Institute*, KCI, 13(1), 23-29. (In Korean)
- Thomas, M. D. A., and Bent, E. C. (2002), Computer Program for Predicting the Service Life and Life-Cycle Costs of Reinforced Concrete Exposed to Chloride, *Life 365 Manual*, SFA, 2-28.
- Yanbo, L., Francisoco, J. P. M., and Mario, A. P. (2015), Determination of Chloride Diffusion Coefficient in Concrete by Electrical Resistivity Method, *ACI Materials Journal*, ACI, 112(M60), 631-640.
- Yoo, S. W. (2013), The Present State and Prospect of Fly Ash Quality of Domestic Thermal Power Plant, *Magazine of Korean Recycled Construction Resources Institute*, KRRCR, 8(2), 8-11. (In Korean)
- Zhang, T. and GjØrv, O. E. (1994), An Electrochemical Method for Accelerated Testing of Chloride Diffusivity in Concrete, *Cement and Concrete Research*, 24(8), 1534-1548.

Received : 11/15/2016

Revised : 11/26/2016

Accepted : 11/28/2016

요 지 : 플라이애시가 시멘트의 대체재로 사용되면서 플라이애시는 콘크리트의 특성변화에 중요한 역할을 하고 있다. 본 연구에서는 보통 콘크리트와 플라이애시를 혼입한 콘크리트의 철근부식에 대한 저항성을 평가하였다. 부식속도가 가장 빠른 간만대 환경을 모사한 최적 건습 반복시험방법을 찾고 해양환경폭로시험장의 간만대에 장기간 노출된 시편의 철근부식모니터링 시험결과와의 비교를 통해 FA 혼입에 따른 OPC 대비 부식 지연비를 도출하였다. 반전지전위법에 의한 부식 모니터링 결과 인공해수에 3일간 침지 후 4일간 건조의 반복 조건보다는 염수를 시편 상부에 침지시켜 염수 및 산소의 공급이 계속되는 염수 ponding 시험법이 부식을 촉진시키는 것으로 나타났다. 모든 시험법에서 OPC에 비해 FA의 철근 부식이 지연되었다. FA의 철근부식 지연비율은 재령이 증가할수록 증가하였으며 OPC 대비 최대 27%까지 철근부식이 지연되었다. 그 결과 플라이애시 콘크리트는 재령이 증가할수록 철근부식 저항성능이 향상됨을 알 수 있었다.

핵심용어 : 플라이애시, 촉진부식시험, 장기폭로시험, 철근부식, 탄산화 복합열화
