

2년 양생된 Fly Ash 콘크리트의 염화물 확산 특성 평가

Evaluation of Chloride Diffusion Characteristics in Concrete with Fly Ash Cured for 2 Years

윤용식¹ · 황상현² · 권성준^{3*}

Yong-Sik Yoon¹ · Sang-Hyeon Hwang² · Seung-Jun Kwon^{3*}

(Received November 27, 2018 / Revised February 7, 2019 / Accepted February 21, 2019)

When RC(Reinforced Concrete) structures are exposed to harsh environment, deterioration phenomenon occurs, and the corrosion in rebar due to chloride intrusion is known as representative deterioration, so called chloride attack. In this paper, chloride resistance performance of 2 years aged concrete is evaluated considering 3 levels of water to binder ratio(0.37, 0.42, and 0.47) and 2 levels of substitution ratio of fly ash(0% and 30%). Accelerated chloride diffusion coefficient tests referred to Tang's method, total passed charge tests referred to ASTM C 1202, and compressive strength tests referred to KS F 2405 are performed. With adaptation of the previous test results and the results from this study, time-dependent chloride diffusion characteristics are analyzed for each concrete. The FA(Fly Ash) concrete has higher chloride resistance performance than OPC(Ordinary Portland Cement) concrete. According to the evaluation standard of ASTM C 1202, the FA concrete has "Moderate" grade after 49 days while OPC concrete does "Moderate" grade after 365 days. As the results of time-parameter for chloride diffusion, OPC concrete and FA concrete show the decreasing behavior of time-parameters with increasing water to binder ratio. Also, FA concrete has 1.57~2.74 times of time-parameter than OPC concrete. That's cause is thought that the time-parameter indicates the gradient of decreasing of diffusion coefficient. FA concrete has higher time-parameters than OPC concrete by pozzolanic reaction of FA.

키워드 : 염해, 플라이애시, 촉진 염화물 확산계수, 통과 전하량, 시간의존성지수

Keywords : Chloride attack, Fly ash, Accelerated chloride diffusion coefficient, Passed charge, Time-parameter

1. 서론

콘크리트는 뛰어난 경제성과 고내구성인 건설재료로서 세계적으로 매해 55억 톤 이상이 사용되고 있는 범용적인 건설재료이다 (Metha and Monteiro 2009). 대부분의 경우 콘크리트는 내부에 철근 보강재를 매립하여 철근콘크리트(RC: Reinforced Concrete) 구조 및 PSC(PSC: Pre-Stressed Concrete) 구조로서 사용되며, 이 경우 내부 보강재의 부식은 구조물의 구조적, 내구적 문제를 초래하게 된다(Oh et al. 2016; Yoon et al. 2018). RC 및 PSC 구조가 가혹한 외부 환경에 노출되거나 시공 후 사용기간이 증가함에 따라 이러한 철근 부식으로 인한 문제가 발생되게 된다. 또한 염분

제거가 확실하게 되지 않은 해사의 사용 등으로 인해 내부 철근의 부식문제가 발생할 수도 있다(KCI 1996). 염해 철근부식 문제를 해결하기 위해 임계 염화물량을 증가시키는 방청제 및 에폭시 코팅 철근의 개발, 염소 이온의 확산성을 저감시키고자 콘크리트 혼화재료 및 콘크리트 표면 처리 기술 등이 개발되어왔다. 그중에서도 고로슬래그 미분말(GGBFS: Granulated Ground Blast Furnace Slag)과 플라이애시(FA: Fly Ash) 등의 혼화재료를 콘크리트에 혼합하여 사용하는 방법은 1960년대부터 꾸준히 적용되어 왔으며, 공학적-경제적으로 그 성능이 입증되었다(Oh et al. 2016; Lee and Kwon 2012; Kim 2010).

플라이애시는 화력 발전소에서 석탄을 연소시킬 때 발생하는

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

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

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

³한남대학교 토목환경공학과 부교수 (Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea)

특정입도 범위($1\mu\text{m}\sim 100\mu\text{m}$)의 입상 잔사이다(KS L 5405 2016). 플라이애시를 콘크리트에 혼입하여 사용하면 포졸란 반응에 의해 내부 공극 구조가 치밀하게 되어 장기 내구성능이 향상되게 되며 특히 염해 저항성능을 개선시키는 데 효과적이다(Metha and Monteiro 2009; Nath and Sarker 2011). 또한 최근에 지구 온난화 문제 등 CO₂ 배출로 인한 환경 문제가 전 세계적으로 대두되고 있는데, 시멘트 제조 시 전체 CO₂ 발생량 중 약 7%가 발생하는 것으로 알려져 있으며, 플라이애시와 같은 혼화재료를 시멘트의 대체 재료로 활용함으로써 이러한 환경문제를 저감시키려는 노력도 활발히 이루어지고 있다(Kwon et al. 2014; Park and Lim 2015).

콘크리트의 염화물 확산 거동을 평가하는 방법은 대표적으로 두 가지가 있는데 시편을 염수에 침지시켜 Fick's 2nd law의 일반 해에 의한 겉보기 염화물 확산계수를 평가하는 방법과 전위차 구배를 원동력으로 염화물 이온의 확산을 촉진시키는 전기적 촉진 시험 방법이 있다. 겉보기 염화물 확산계수를 도출하여 염화물 확산 거동을 평가하는 방법은 실제 환경에서의 확산 거동을 평가할 수 있고 콘크리트 내부 염화물량을 직접적인 해로 확인할 수 있다는 장점이 있으나, 수개월의 실험기간을 요한다는 단점이 있다. 전기적 촉진 시험을 이용하면 실제 환경에서의 염화물 확산 거동을 평가할 수는 없으나, 수 시간 내에 확산계수를 평가하여 여러 콘크리트 배합의 염해 저항성능을 비교 평가할 수 있다(Yoo 2010). Tang's method와 ASTM C 1202 등이 대표적인 전기적 촉진 시험 방법으로서 활발히 사용되고 있다(Tang and Nilson 1992; ASTM C 1202 2005).

콘크리트 구조물의 설계 시 구조물의 외부 환경 및 사용 용도를 고려하여 적절한 내구수명을 산정하는 것은 안전성 및 경제성 확보에 매우 중요하다. 염해 내구수명 해석에 활발하게 이용되고 있는 Life-365 소프트웨어는 Fick's 2nd law에 준하여 결정론적 방법으로 RC 구조물의 내구수명을 해석한다(Thomas and Bentz 2002). Life-365에서는 시간의존성지수를 제안하여 내구수명 해석을 수행하는데 이 값은 재령의 증가에 따른 확산계수가 감소되는 정도를 나타내어 내구수명 해석 시 중요하게 고려하여야 할 인자이다.

본 연구에서는 3가지 수준의 물-결합재 비(0.37, 0.42, 0.47)와 플라이애시 치환율(30%)을 고려하여 촉진 염화물 확산계수, 통과 전하량, 압축강도를 재령 730일에 대하여 평가하였다. 또한 실험 결과 및 기존의 제안식을 활용하여 각 배합의 시간의존성지수를 실험적으로 산출하여 비교 평가하였다.

2. FA 콘크리트의 내구성능 평가 방법

2.1 FA 콘크리트 배합

본 연구에서는 OPC 콘크리트 시편과 플라이애시 30% 치환 혼입 콘크리트 시편을 3가지 수준의 물-결합재 비(0.37, 0.42, 0.47)를 고려하여 제작하였다. Table 1에 본 연구에서 사용한 배합표를 나타내었으며 Table 2와 Table 3에는 본 연구에서 사용한 골재 및 고성능 감수제의 특성을 나타내었다.

본 연구에서는 폴리카본산계 감수제를 콘크리트에 혼입하여 사용하였는데 이 감수제는 기존의 나프탈렌계 감수제보다 슬럼프 유지성능이 우수할 뿐 아니라 초기강도 발현에 효과적으로 알려져 있다(Lee et al. 2004).

Table 1. Concrete mixture for this study

Type	W/B (%)	Unit weight(kg/m ³)					S.P. (% of wt.)
		W	C	FA	S	G	
OPC	37	168	454	0	767	952	1.10
	42	168	400	0	787	976	1.00
	47	168	357	0	838	960	0.95
FA 30	37	168	318	136	745	952	1.40
	42	168	280	120	768	953	1.20
	47	168	250	107	820	939	1.00

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

Table 2. Properties of sand and gravel

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

F.M. : Fineness Modulus

Table 3. Properties of super plasticizer

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

2.2 촉진 염화물 확산계수 평가 방법

3가지 수준의 물-결합재 비 및 플라이애시 혼입률을 고려하여 촉진 염화물 확산계수를 평가하고자 Tang's method에 준하여 실험을 수행하였다. 이 시험방법은 전기적 이동과 확산을 동시에 고려하여 이론상 가장 합리적이며 비정상상태의 확산계수를 구할 수 있는 방법이다(Tang and Nilson 1992). 염화물 이온의 일 방향 침투를 유도하기 위해 원주형 공시체를 50mm 두께의 디스크 시편으로 커팅한 뒤, 에폭시를 옆면에 도포하였다. 에폭시가 도포된 디스크 시편을 대상으로 Cell I(- 극)에는 0.5M의 염화나트륨 수용액(NaCl)을 Cell II(+ 극)에는 포화 수산화칼슘(Ca(OH)₂) 수용액을 적용하여 8시간 동안 30V의 전압을 인가하였다(Tang and Nilson 1992). 그 후 시편을 할렬하여 쪼개진 면에 질산은(AgNO₃) 수용액(0.1N)을 분무하여 은색으로 변하는 부분을 염화물 이온의 침투 영역으로 판단하였다. Fig. 1에 Tang's method 모식도 및 조건을 나타내었다.

위의 과정으로 측정된 염화물 이온의 침투깊이와 식(1) 및 식(2)를 활용하여 각 배합의 촉진 염화물 확산계수를 도출하였다.

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

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

여기서, $D_{r_{cpt}}$ 는 비정상상태에서의 촉진 염화물 확산계수(m²/sec), R 는 기체상수(8,314J/mol·K), T 는 절대온도(K), L 는 시편두께(m), z 는 이온전자가(1.0), F 는 패러데이상수(96,500J/V·mol), U 는 전위차(V), x_d 는 비색법에 의한 침투깊이(m), t 는 전위차의 적용시간(sec), C_d 는 비색법에 의한 반응농도(mol/l), C_0 는 음극 Cell의 염소이온농도(mol/l)를 나타낸다.

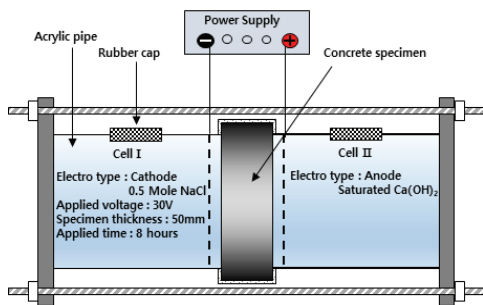


Fig. 1. Mimetic diagram and test condition for Tang's method

본 연구의 이전 재령일 선행 연구(Yoon and Kwon 2018)에서는 초장기재령 콘크리트의 염화물 거동을 평가하고자 각 배합별로 다량의 시편을 제조하였다. 이로 인해 초기재령에서 시편의 운반 및 양생 문제로 재령 28일에 촉진 염화물 확산계수 및 통과 전하량을 평가하지 못하였다. 따라서 재령 28일의 촉진 염화물 확산계수는 기존에 수행된 동일 배합 연구(SERI 2003)에서 인용하였다.

2.3 통과 전하량 평가 방법

재령 730일에 각 배합에 대상으로 ASTM C 1202에 따라 통과 전하량을 평가하였다. 이 실험 방법으로 콘크리트 시편의 염화물 이온 침투저항성을 정성적으로 평가할 수 있다. 실험의 모식도는 2.2절(Fig. 1)과 동일하지만 실험 조건은 다르다. 에폭시가 도포된 두께 50mm의 디스크 시편을 대상으로 Cell I(- 극)에는 3%의 염화나트륨 수용액(NaCl)을 Cell II(+ 극)에는 0.3M 수산화나트륨(NaOH) 수용액을 적용하여 6시간 동안 60V의 전압을 인가한다. 통과 전하량을 30분 간격으로 측정된 후 식(3)을 활용하여 통과 전하량을 도출하였다. 도출된 통과 전하량은 Table 4와 같이 평가된다(ASTM C 1202 2005). 본 연구의 선행 연구에서는 재령 28일에 통과 전하량 실험을 수행하지 못하였다. 따라서 재령 28일 통과 전하량은 식(4)와 같은 기존에 제안된 촉진염화물 확산계수와 통과 전하량 간의 상관식과 재령 28일 촉진 염화물 확산계수 결과를 활용하여 도출하였다(Berke and Hicks 1994).

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

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

$$D = 0.0103 \times 10^{-12} \times Q^{0.84} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (4)$$

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

Table 4. Evaluation standard for chloride resistance by ASTM C 1202

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

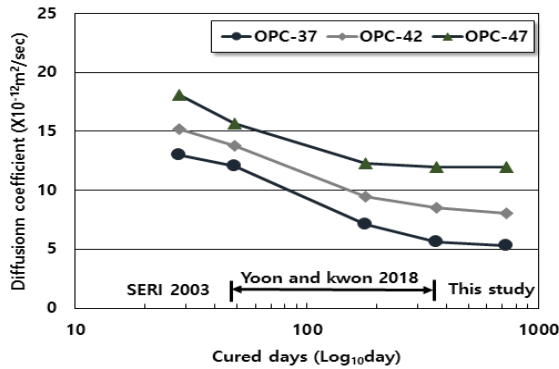
2.4 압축강도 평가 방법

재령 730일에 물-결합재 비 및 플라이애시 혼입률을 고려하여 KS F 2405에 준하여 압축강도를 평가하였으며 기존의 동일배합에서 평가된 1년 이하의 압축강도 값과 비교 평가하였다(Yoon and Kwon 2018).

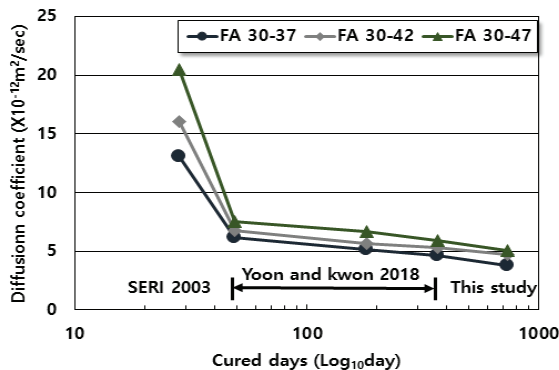
3. 평가 결과

3.1 촉진 염화물 확산계수 평가 결과

재령 28일 실험 결과(SERI, 2003), 재령 49일에서 365일에 해당하는 실험 결과(Yoon and Kwon 2018)는 사전 연구들에서 인용하였으며, 재령 730일의 평가 결과를 추가하여 각 배합의 촉진 염화물 확산계수 거동을 평가한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 아래의 모든 평가 결과 그래프들에서 배합명(OPC, FA 30)과 “-” 다음의 숫자는 물-결합재 비를 나타낸다. 예를 들어 FA 30-37은 물-결합재 비 0.37의 플라이애시 30% 치환 혼입 배합을 의미한다.



(a) OPC



(b) FA 30

Fig. 2. Test results for diffusion coefficient considering W/B and substitution ratio of FA

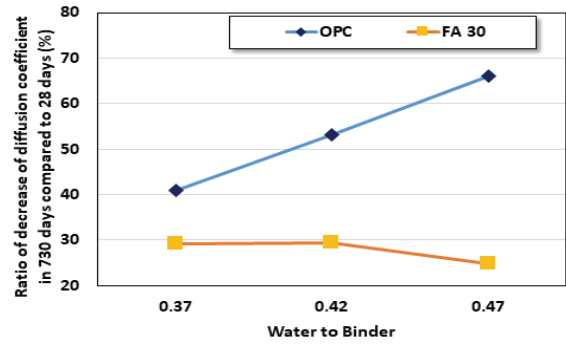


Fig. 3. Decreasing ratio in accelerated diffusion coefficient by curing effect

물-결합재 비가 낮을수록 낮은 촉진 염화물 확산계수가 나타났으며, 플라이애시 혼입 콘크리트는 초기재령일(28일)에서는 OPC 콘크리트 대비 100.2%~113.4% 높은 확산계수를 나타냈다. 재령 49일에서부터 플라이애시 콘크리트는 OPC 콘크리트보다 낮은 확산계수를 나타내기 시작하였으며 최종 재령일(730일)에서는 OPC 콘크리트 대비 42.7%~71.1%의 값을 나타내었다. 이는 시멘트의 수화반응 외에 플라이애시의 포졸란 반응에 의해 생성되는 안정한 규산화칼슘수화물이 염화물 확산을 제어하기 때문으로 사료된다 (Metha and Monteiro 2009). 재령 28일 대비 730일에서의 감소율을 평가하면 OPC 배합에서는 41.0%~66.0%, FA 배합에서는 24.9%~29.3%의 감소율을 나타내었다. 각 배합의 재령 28일 대비 730일에서의 촉진 염화물 확산계수 감소율을 Fig. 3에 나타내었다.

3.2 통과 전하량 평가 결과

재령 730일에서 각 배합의 통과 전하량을 평가한 후 재령에 따라 변화하는 통과 전하량 거동을 평가한 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

3.1절의 촉진 염화물 확산계수 결과 동향과 마찬가지로 물-결합재 비가 낮을수록 낮은 통과 전하량이 나타났으며 FA 배합에서 OPC 배합 대비 낮은 통과 전하량이 나타났다. 이는 두 시험 모두 강 전위 상태에서 염화물 이온의 이동을 원리로 하는 실험 방법이기 때문이다. FA 배합은 재령 49일에서부터 “Moderate” 이하의 등급에 속하는 반면에 OPC 배합은 재령 49일의 경우 모든 배합에서 “High” 등급을 나타내 플라이애시 혼입 배합이 적절한 양생기간을 확보한다면 뛰어난 내구성능을 나타낼 수 있는 것으로 보인다. 또한 플라이애시의 포졸란 반응에 기인하여 재령 28일 대비 730일에서의 감소율은 OPC 배합에서는 34.4%~41.9%, FA 30 배합에서는 13.7%~19.3%로 평가되었다. Fig. 5에 각 배합의 재령 28일 대비 730일에서의 통과 전하량 감소율을 나타내었다.

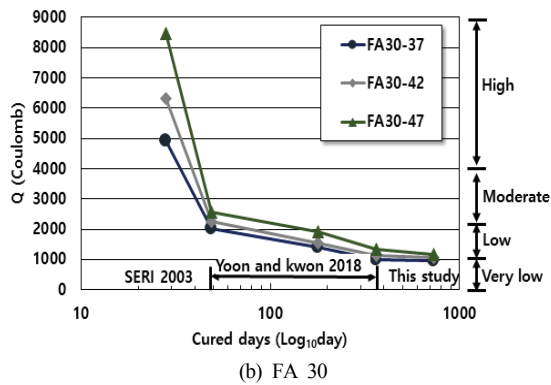
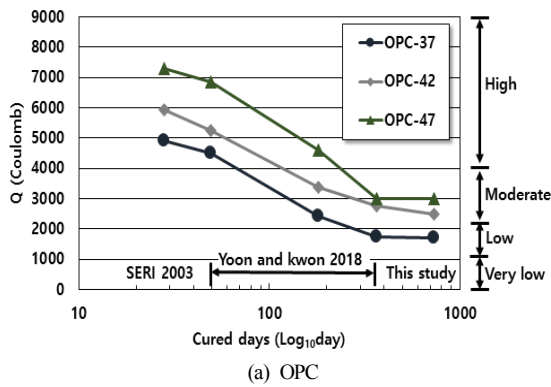


Fig. 4. Test results for passed charge considering W/B and substitution ratio of FA

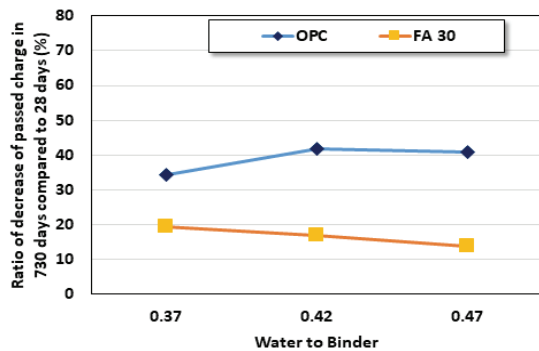
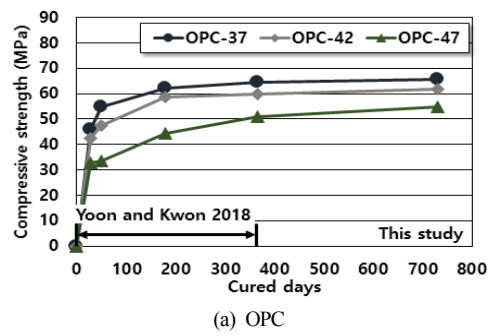


Fig. 5. Decreasing ratio in passed charge by curing effect

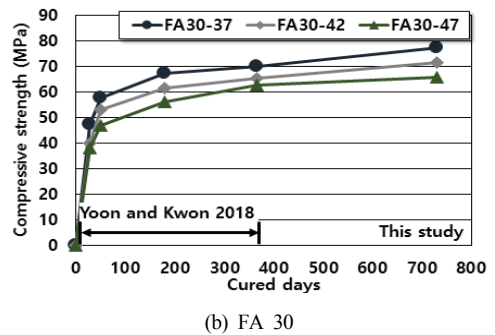
3.3 압축강도 평가 결과

물-결합재 비 및 플라이애시 치환률을 고려하여 재령의 변화에 따라 증가하는 압축강도 거동을 Fig. 6에 나타내었다.

재령이 증가할수록, 물-결합재 비가 낮을수록 강도가 높게 평가되었다. 또한 기존에 알려진 바와 다르게 초기 재령일(28일)에서부터 FA 배합에서 OPC 배합 대비 동등이상의 강도를 나타냈다. 특히 재령 365일과 730일 사이의 증가율이 FA 배합에서는



(a) OPC



(b) FA 30

Fig. 6. Test results for compressive strength considering W/B and substitution ratio of FA

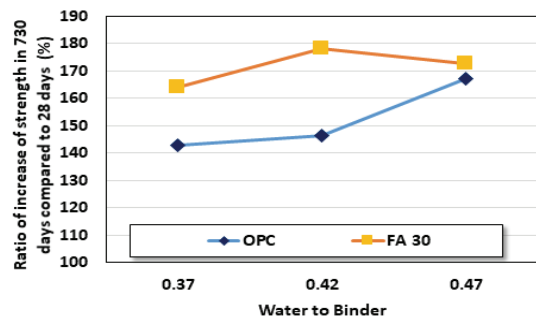


Fig. 7. Increasing ratio in compressive strength by curing effect

105.0%~110.2%, OPC 배합에서는 101.7%~107.9%로 평가되었다. 플라이애시의 포졸란 반응으로 인해 장기재령에서도 OPC 배합 대비 높은 강도 증가가 발생한 것으로 사료된다. 재령 28일 대비 730일에서의 강도 증가를 평가 결과를 Fig. 7에 나타냈다. OPC 배합에서는 142.9%~167.1%, FA 배합에서는 164.1%~178.1%의 증가율을 나타냈다.

4. Fly Ash 콘크리트의 시간의존성지수 평가

본 절에서는 기존의 연구를 참고하여 각 배합의 시간의존성지

수를 산출하였다(Thomas and Bentz 2002). 본 연구에서 사용한 Life-365 모델에서는 시간의존성지수 산정 시 겉보기 염화물 확산 계수를 사용하므로 본 연구의 재령 28일, 180일, 365일, 730일 촉진 염화물 확산계수를 촉진 염화물 확산계수와 겉보기 염화물 확산계수 간의 상관관계에 적용시켜 겉보기 염화물 확산계수로 변환한 후 사용하였다. 겉보기 염화물 확산계수와 촉진 염화물 확산계수 간의 상관관계를 식(5)에 나타내었다(Polder et al. 2007).

$$D_{rcpt} = 1.16D_{app} + 0.32 \times 10^{-12} (R^2 = 0.96) \quad (5)$$

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

Life-365 모델에서는 식(6)과 같이 시간의존성지수를 도출하도록 제안하고 있다. 식(6)에 Log 관계를 적용하면 식(7)과 같이 나타낼 수 있으며, 이를 회귀분석하여 시간의존성지수 값을 도출하였다(Thomas and Bentz 2002). Fig. 8에는 각 배합의 시간의존성지수를 평가한 결과를 나타내고 있다.

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

$$\text{Log} \left(\frac{D(t)}{D_{ref}} \right) = m \times \text{Log} \left(\frac{t_{ref}}{t} \right) \quad (7)$$

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

본 연구에서는 기준 시간(t_{ref})을 재령 28일로 설정하였다. 본 연구에서는 재령 28일 시험 결과를 동일 배합 연구(SERI 2003)에서 인용하였기 때문에 모든 재령일을 포함하여 시간의존성지수를 산출할 경우 FA 배합에서 상관계수가 크게 떨어지는 문제가 발생하였다. 또한 재령 49일을 기준 재령일로 설정하여 회귀분석할 경우 FA 배합에서 매우 낮은 시간의존성지수 값이 평가되었는데, 이는 재령 28일과 49일 사이에 플라이애시의 포졸란 반응에 의해 확산계수 저감이 크게 발생하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 FA 배합의 포졸란 반응이 시간의존성지수에 미치는 영향과 전체적인 시간의존성지수의 일관성을 위하여 시간의존성지수 산정 시 재령 49일 확산계수를 제외하고 나머지 재령일의 확산계수로 회귀분석을 실시하였다.

또한 Life-365에서는 결합재의 종류 및 혼화재료 혼입률에 따

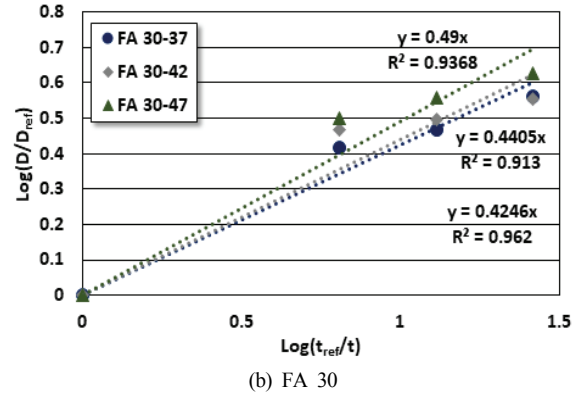
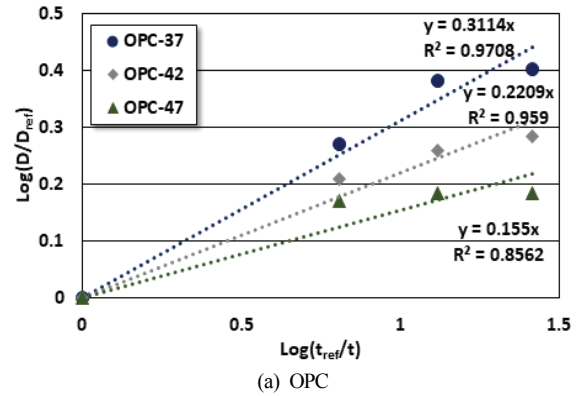


Fig. 8. Results for time-parameter by regression analysis

라 시간의존성지수 산정식을 제안하고 있는데, 이를 식(8)에 나타내었다(Thomas and Bentz 2002).

$$m = 0.2 + 0.4(\%FA/50 + \%SG/70) \quad (8)$$

여기서, %FA와 %SG는 플라이애시 및 고로슬래그 미분말의 치환률(%)을 나타낸다.

본 연구의 결과를 회귀분석하여 얻은 시간의존성지수와 식(8)에 의한 시간의존성지수를 비교 평가한 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

모든 배합에서 물-결합재 비가 높아질수록 시간의존성지수가 감소하는 경향을 나타내었으며 물 결합 재비의 영향은 OPC 배합에서 FA 30 배합보다 크게 나타났다. OPC 배합은 물-결합재비에 증감에 따라 최대 약 49.8%, FA 30 배합의 경우 최대 약 86.7%의 시간의존성지수 감소율을 나타냈다. 또한 기존의 산정식의 경우 물-결합재비의 증감을 고려하지 않기 때문에 실험에 의한 시간의존성지수 값을 배합별로 평균으로 하여 산정식에 의한 시간의존성지수 값과 비교평가하면, OPC 배합의 경우 산정식보다 실험값이 1.15배로, FA 30 배합의 경우 산정식에 의한 값 대비 실험값이 1.03

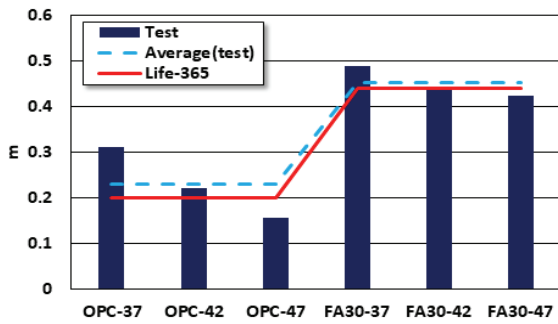


Fig. 9. Comparative evaluation of time-parameter

바로 평가되어 기존의 제안식에 의한 시간의존성지수와 실험값에 의한 시간의존성지수 간의 차이가 크게 발생하지 않았다. 또한 OPC 배합의 경우 실험값에 따르면 물-결합재 비의 증감에 따라 시간의존성지수가 크게 변화하는데 기존의 제안식에서는 이를 고려하지 않고 있으므로 내구성 설계 시 이에 대한 반영이 필요하다고 보인다. 실험값에 의한 시간의존성지수의 경우, FA 30 배합에서 OPC 배합 대비 약 1.57배~2.74배로 나타났다. 이는 시간의존성지수가 겉보기 염화물 확산계수가 감소하는 기울기를 나타내기 때문인데, FA 30 배합의 경우 포졸란 반응에 기인하여 OPC 배합보다 큰 폭의 확산계수 감소가 나타나기 때문이다.

5. 결론

본 연구에서는 3가지 수준의 물-결합재 비(0.37, 0.42, 0.47)와 플라이애시 혼입률(30%)을 고려하여 콘크리트의 염해 내구성능(촉진 염화물 확산계수, 통과 전하량)과 압축강도를 평가하였다. 또한 평가된 촉진 염화물 확산계수와 기존의 이론들을 활용하여 각 배합의 시간의존성지수를 도출하였다. 본 연구의 결론은 아래와 같다.

- 1) 모든 배합에서 재령이 증가함에 따라 촉진 염화물 확산계수가 감소하였는데 플라이애시 치환 배합에서는 포졸란 반응에 기인하여 OPC 배합보다 높은 감소율을 나타내었다. 재령 28일 대비 재령 730일에서의 촉진 염화물 확산계수 감소율을 평가하면 OPC 배합의 경우 41.0%~66.0%의 감소율을, FA 30 배합의 경우 24.9%~29.3%의 감소율을 나타냈다.
- 2) 각 배합의 통과 전하량 평가 결과 촉진 염화물 확산계수와 비슷한 거동을 나타내었는데, 이는 두 실험 방법 모두 강 전위 상태에서의 염화물 이온의 이동을 기반으로 하는 실험 방법이기 때문이다. 평가된 통과 전하량을 ASTM C 1202에

준하여 등급 평가하면 FA 30 배합은 재령 49일에서부터 Moderate 이하의 등급에 포함되게 된다. 따라서 플라이애시 혼입 배합이 적절한 양생기간을 확보할 경우 우수한 내구성능을 나타낼 수 있다고 사료된다.

- 3) 압축강도 평가 결과 물-결합재비가 낮을수록 높은 값이 평가되었으며 재령 28일에서부터 FA 30 배합이 OPC 배합 동등이상의 강도를 나타내었다. 재령 28일 대비 730일에서의 강도 증진율을 평가하면, OPC 배합의 경우 142.9%~167.1%, FA 30 배합에서는 164.1%~178.1%로 플라이애시 치환 배합에서 더 높은 증가율을 나타내었다.
- 4) 각 배합의 시간의존성지수를 평가한 결과, 모든 배합에서 물-결합재 비가 증가할수록 시간의존성지수가 감소하는 경향을 나타내었다. FA 30 배합에서는 OPC 배합 대비 1.57배~2.74배의 시간의존성지수를 나타냈는데 이는 시간의존성지수가 겉보기 염화물 확산계수가 감소하는 기울기를 나타내기 때문이다. 또한 기존의 제안식에서는 시간의존성지수 산정 시 물-결합재 비를 고려하지 않는데, OPC 배합의 경우 물-결합재 비의 증감에 따라 시간의존성지수가 크게 변화하므로 이에 대한 고려가 필요하다고 사료된다.

Conflict of interest

None.

감사의 글

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

References

- ASTM C 1202. (2005). Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, American Society for Testing and Materials.
- Berke, N.S., Hicks, M.C. (1994). Predicting chloride profiles in concrete, CORROSION, **50(3)**, 234-239.
- KCI. (1996). Latest Concrete Engineering, Kimoonang, Seoul, 453-459 [in Korean].
- Kim, H.J. (2010). A Study on the Development of Functional Concrete Using Permeating Agents and Photocatalyst, Ph.D Thesis, Jeonbuk University [in Korean].

- KS L 5405, (2016). Fly Ash, Korea Standard Service Network, 1–8 [in Korean].
- Kwon, S.O., Bae, S.H., Lee, H.J., 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 [in Korean].
- Lee, J.W., Kim, K.M., Bae, Y.K., Lee, J.S. (2004). “Study on the field application according to the early strength of the concrete admixed with polycarboxylate superplasticizer,” Korea Concrete Institute Academic Conference, Korea Concrete Institute, Pyeongchang, Korea, 200–203 [in Korean].
- Lee, S.H., Kwon, S.J. (2012). Experimental study on the relationship between time-dependent chloride diffusion coefficient and compressive strength, Journal of the Korea Concrete Institute, **24(6)**, 715–726 [in Korean].
- Metha, P.K., Monteiro, P.M. (2009). Concrete–Structure, Properties, and Materials, 2nd Edition, Prentice Hall, New–Jersey, 1–7, 271–284.
- Nath, P., Sarker, P. (2011). Effect of fly ash on the durability properties of high strength concrete, Procedia Engineering, **14**, 1149–1156.
- Oh, K.S., Moon, J.M., Park, K.T., Kwon, S.J. (2016). Evaluation of load capacity reduction in RC beam with corroded FRP hybrid bar and steel, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, **20(2)**, 10–17 [in Korean].
- Park, K.C., Lim, N.G. (2015). Chloride penetration of concrete mixed with high volume fly ash and blast furnace slag, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, **19(1)**, 90–99 [in Korean].
- Polder, R.B., van der Wegen, G., Boutz, M. (2007). “Performance based guideline for service life design of concrete for civil engineering structures – a proposal discussed in the netherlands,” International RILEM Workshop on Performance Based Evaluation and Indicators for Concrete Durability, Madrid, Spain, 31–39.
- SERI. (2003). Evaluation of Chloride Ion Diffusion Characteristics of High Durability Concrete, Samsung Engineering Research Institute, Final report [in Korean].
- Tang, L., Nilsson, L.O. (1992). Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field, ACI Materials Journal, **89(1)**, 49–53.
- Thomas, M.D.A., Bentz, E.C. (2002). Computer Program for Predicting the Service Life and Life–cycle Costs of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides, Life 365 Manual, SFA, 2–28.
- Yoo, J.G. (2010). Durability Design of Concrete and Evaluation of Field Application on Reinforced Concrete Structure Exposed to Marine Environment, Ph.D Thesis, Chungnam University [in Korean].
- Yoon, Y.S., Kwon, S.J. (2018). Evaluation of time-dependent chloride resistance in HPC containing fly ash cured for 1 year, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, **22(4)**, 52–59 [in Korean].
- Yoon, Y.S., Ryu, H.S., Lim, H.S., Koh, K.T., Kim, J.S., Kwon, S.J. (2018). Effect of grout conditions and tendon location on corrosion pattern in PS tendon in grout, Construction and Building Materials, **186(2018)**, 1005–1015.

2년 양생된 Fly Ash 콘크리트의 염화물 확산 특성 평가

콘크리트 구조물이 극심한 열화 환경에 노출되는 경우 열화현상이 발생하게 되는데, 대표적인 열화 현상으로는 염해에 의한 철근부식이 있다. 본 연구에서는 3가지 수준의 물-결합재 비(0.37, 0.42, 0.47) 및 2가지 수준의 플라이애시 치환율(0%, 30%)을 고려하여 재령 2년 콘크리트 시편을 대상으로 염해 저항 성능을 평가하였다. Tang's method에 준하여 촉진 염화물 확산계수를, ASTM C 1202에 준하여 통과 전하량을, KS F 2405에 준하여 압축강도를 평가하였다. 또한 기존의 제안식들과 촉진 염화물 확산계수 결과를 활용하여 각 배합의 시간의존성 확산 특성을 분석하였다. 플라이애시 혼입 배합은 OPC 배합 대비 뛰어난 내구성 성능을 나타내는데, 통과 전하량 평가기준에 따르면 재령 49일부터 “Moderate” 등급 이하에 포함되는 반면 OPC 배합은 재령 1년에서야 모든 물-결합재 비에서 “Moderate” 등급 이하에 포함되었다. 각 배합의 시간의존성지수를 도출한 결과 모든 배합에서 물-결합재비가 증가함에 따라 시간의존성지수가 감소하는 경향을 나타내었다. 또한, 플라이애시 혼입 배합에서 OPC 배합 대비 1.57 배~2.74배의 시간의존성지수가 평가되었다. 이는 시간의존성지수가 확산계수가 감소하는 기울기를 나타내기 때문이며, 플라이애시의 포졸란 반응에 의해 FA 배합에서 OPC 배합 대비 높은 시간의존성지수를 나타내었다.