

1년 양생 조건의 Fly Ash를 혼입한 고성능 콘크리트의 시간의존적 염해저항성 평가

윤용식¹, 권성준^{2*}

Evaluation of Time-Dependent Chloride Resistance in HPC Containing Fly Ash Cured for 1 Year

Yong-Sik Yoon¹, Seung-Jun Kwon^{2*}

Abstract: To control chloride attacks which is a representative deterioration in RC(Reinforced Concrete) structures, many studies have been conducted. Above all, a method using mineral admixture was known to be effective for corrosion protection. In this study, durability test about chloride attacks was carried out for concrete specimens containing FA(Fly Ash)-representative concrete mineral admixture and OPC concrete specimens considering 3 different levels of W/B(Water to Binder). Accelerated chloride diffusion coefficient tests referred to Tang's method, total passed charge tests referred to ASTM C 1202, and compressive strength tests based on KS F 2405 were performed at each target age day. Also, based on previous studies of 28 days, time-parameter which is a key parameter for diffusion behavior is evaluated and its relations with compressive strength at the age of 365 days is evaluated. After the age of 49 days, chloride resistance of FA concrete is much improved than that of OPC concrete, which arose out of stable hydrates due to pozzolan reaction of fly ash. Time-parameter of FA concrete is evaluated to be about 1.5 times larger than that of OPC concrete. Also, time-parameter of FA concrete has a linearly decreasing relation while that of OPC concrete has a linearly increasing relation with compressive strength development.

Keywords: Accelerated chloride diffusion coefficient, Compressive strength, Fly ash, Passed charge, Time-parameter

1. 서 론

콘크리트는 뛰어난 내구성능과 경제성으로 인해 오랜 기간 활용되어온 건설재료이며, 콘크리트에 철근을 매립한 철근콘크리트(RC : Reinforced Concrete)는 콘크리트의 인장력에 취약한 단점을 보완하기 때문에 토목 및 건축 구조물과 구조부재로 활발히 사용되고 있다. 철근콘크리트 내부의 철근은 부동태 피막(Passive layer)에 의해 외부 열화인자로부터 보호받게 되는데, 사용기간이 증가하게 되면 부동태피막이 파괴되어 내부 철근에 열화인자가 침투하고 이로 인해 철근의 부식이 발생한다(Broomfield, 1997; Song et al., 2005). 철근의 부식이 시작되면 철근의 체적이 부식 전 대비 약 3~4배 정도 증가하여 피복 콘크리트의 박락을 유발해 구조물의 미관을 해칠 뿐 아니라 철근의 단면적이 감소하여 구조적 문제가 발생하게 된다(Lee and Lee, 2000; RILEM, 1994). 특히, 해양환경에 노출된 철근

콘크리트는 알칼리성이 쉽게 저하하게 되고 이에 따라 내부 철근이 활성상태가 되어 더욱 부식에 취약해진다고 알려져 있다(Al Amoudi and Maslehuddin, 1993). 이러한 열화현상을 억제하기 위해 많은 연구가 진행되어 왔고 그 중에서도 콘크리트에 혼화재를 혼입하는 방법이 대표적으로 알려져 있다(Lee and Kwon, 2012; Oh et al., 2016; Kwon et al., 2007).

콘크리트의 대표적인 혼화재료 중 하나인 플라이애시(FA : Fly Ash)는 미분탄 연소 보일러의 연소가스로부터 집진기로 채취하는 특정입도 범위(1 μm ~ 100 μm)의 입장잔사를 말한다(KS L 5405, 2016). 콘크리트에 플라이애시를 혼입하게 되면 장기 강도 및 내구성능이 일반 콘크리트 대비 향상되는데 이는 시멘트의 수화반응 외에 플라이애시의 포졸란 반응에 의해 발생한 추가적인 수화물이 원인이다(Metha and Monteiro, 1993). 최근에는 플라이애시의 재활용률을 높이고 이산화탄소(CO₂) 저감 효과를 기대하고자 시멘트를 플라이애시로 35%~60%까지 대량 치환하여 사용하는 HVFAC(High Volume Fly Ash Concrete)에 대한 연구도 활발히 진행 중이다. 또한, 수화열 및 건조수축으로 야기되는 균열을 제어하기 위해 높은 단위결합재량을 가진 고성능 콘크리트에 혼입되어 사용되고 있다(Jung et al., 2012; Kwon et al., 2014; Ko et al., 2012).

콘크리트의 염화물 확산 거동은 염화물 확산계수를 도출하

¹정회원, 한남대학교 건설시스템공학과, 공학석사

²정회원, 한남대학교 건설시스템공학과, 부교수, 교신저자

*Corresponding author: jjuni98@hannam.ac.kr

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

•본 논문에 대한 토의를 2018년 8월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 9월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

여 평가하는 것이 일반적이다. 대표적인 염화물 확산계수 평가 방법은 Fick's 2nd law의 일반해에 의해 겉보기 염화물 확산계수를 평가하는 방법과 전기화학적 이론을 도입하여 전위차 구배를 원동력으로 염화물 이온의 이동을 촉진시키는 전기적 촉진 시험 방법이 있다. 겉보기 염화물 확산계수 실험의 경우 염화물량을 직접적인 해로 확인이 가능하지만 최대 수개월의 실험 기간이 필요하다는 단점이 있다. 그러나 전기적 촉진 실험 방법을 이용하면 수시간내에 염화물 확산계수를 평가할 수 있다(Cheon et al., 2017; Oh et al., 2016; Yoo, 2010). 대표적인 전기적 촉진 실험 방법으로는 Tang's method와 ASTM C 1202가 있는데, Tang's method는 전기적 이동과 확산을 동시에 고려하기에 이론상 가장 합리적이고 비정상상태의 확산계수를 구할 수 있는 장점을 갖고 있으며, ASTM C 1202는 콘크리트 시편의 염화물 이온 침투저항성을 통과된 총 전하량으로 평가하는 공인된 방법이다(Tang and Nilson, 1992; ASTM C 1202, 2005).

콘크리트 구조물의 내구수명 예측은 안전성 및 경제성 확보에 매우 중요하다. 콘크리트 구조물의 염화물 확산계수와 시간의존성 변화는 염해에 대한 과다 설계를 제어하고 합리적인 내구수명 설계를 유도할 수 있으므로 많은 연구들이 수행되어 왔다(Thomas and Bamforth, 1999). 기존에 제안된 Life-365모델에서는 시간의존성지수를 제안하여 이 값을 내구수명 평가에 활용하고 있으며, 최근 국내에서 이 모델을 활용한 염해의 시간의존성에 대한 연구가 활발히 진행되어왔다(Thomas and Bentz, 2002; Lee and Kwon, 2017; Kwon, 2016).

본 연구에서는 물-결합재비 3수준(37%, 42%, 47%), 플라이애시 혼입률 2수준(0%, 30%)을 고려하여 촉진 염화물 확산계수, 통과전하량, 압축강도를 재령 365일까지 평가하였으며 재령이 증가함에 따라 변화하는 실험 결과의 거동을 분석하였다. 촉진 염화물 확산계수는 Tang's method에 준하여, 통과전하량은 ASTM C 1202에 준하여 평가하였으며 Life-365 모델 및 기존의 문헌을 참고하여 각 배합의 시간의존성지수를 도출하였다. 또한, 시간의존성지수와 압축강도간의 상관관계를 분석하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 콘크리트 배합 및 시편 제작

본 연구에서는 OPC 콘크리트 배합과 시멘트를 플라이애시로 30% 치환한 콘크리트 배합에 대하여 물-결합재비(W/B)를 3가지 수준(37%, 42%, 47%)으로 변화시켜 총 6가지 배합을 수행하였다. Table 1에 본 연구의 배합표를 나타내었으며 Table 2와 Table 3에는 본 연구에서 사용한 골재 및 고성능 감

수제의 특성을 나타내었다.

Table 1 Mix proportions for OPC and Fly Ash concrete

	W/B (%)	Unit weight(kg/m ³)					S.P (%)
		W	C	FA	Fine Agg.	Coarse Agg.	
OPC	37	168	454	0	767	952	1.1
	42	168	400	0	787	976	1
	47	168	357	0	838	960	0.95
FA	37	168	318	136	745	952	1.4
	42	168	280	120	768	953	1.2
	47	168	250	107	820	939	1.0

Table 2 Physical properties of 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

Table 3 Properties of super-plasticizer

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

각 배합에 대하여 지름 100mm, 높이 200mm의 원주형 공시체를 제작하였으며, 그 후 촉진 염화물 확산계수 및 통과전하량 평가 실험을 위해 원주형 공시체를 50mm 두께로 커팅하여 디스크 시편을 제작하였다. 또한, 모든 시편은 각 목포 재령일(28일, 49일, 180일, 365일)까지 20°C 항온 수중 양생되었다.

2.2 콘크리트의 염해저항성 평가 방법

2.2.1 촉진 염화물 확산계수 평가 방법

각 배합의 촉진 염화물 확산계수를 평가하기 위해 Tang's method에 준하여 염화물 확산 실험을 실시하였다. 본 연구에서는 각 배합별로 다량의 시편을 제작했기에 초기재령에서 시편의 운반 및 양생의 문제가 발생하여 재령 28일에 촉진 염화물 확산계수를 평가하지 못하였다. 따라서 재령 28일의 촉진 염화물 확산계수 값은 기존의 동일 배합 연구의 결과 값을 인용하였다(SERI, 2003). 음극(-, Cell I)에는 0.5M의 염화나트륨(NaCl) 수용액을, 양극(+, Cell II)에는 포화 수산화칼슘(Ca(OH)₂) 수용액을 적용하여 30V의 전압을 8시간 동안 인가하였다. 그 후 시편을 할렬하여, 좌면 부분에 0.1N의 AgNO₃ 용액을 분무해 은색으로 변하는 부분을 염소이온 침투깊이로 측정하였다. Fig. 1에는 촉진 염화물 확산계수 실험 모식도 및 조건을, Fig. 2에는 염소이온 침투깊이 측정영역 모식도를 나타내었다(Tang and Nilson, 1992).

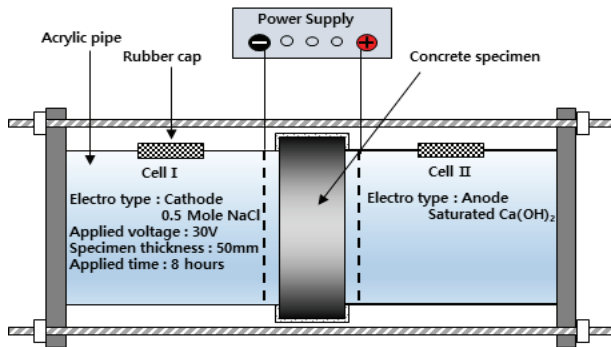


Fig. 1 Diagram and conditions for Tang's method

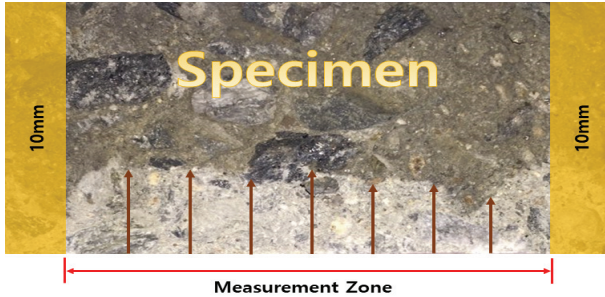


Fig. 2 Diagram for measurement zone of Tang's method

측정한 염소이온 침투 깊이의 평균값을 식 (1)에 사용하여 촉진 염화물 확산계수를 도출한다.

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

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

여기서, $D_{r_{cpt}}$ 는 비정상상태에서 구한 전위차 촉진 염화물 확산계수(m^2/sec), R 은 기체상수($8.314J/mol \cdot K$), T 는 절대온도(K), L 은 시편두께(m), z 는 이온전자가(1.0), F 는 패러데이 상수 ($96,500J/V \cdot mol$), 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.

2.2.2 통과전하량 평가 방법

ASTM C 1202에서 제안하는 통과 전하량 측정 실험은 염소이온 침투 저항성을 정성적으로 평가하는 실험 방법으로 알려져 있다. 2.1.1절과 마찬가지로의 이유로 재령 28일에 통과 전하량을 측정하지 못하였기에 재령 28일의 통과전하량 값은 기존의 연구에서 제안된 촉진 염화물 확산계수와 통과전하량 간의 상관식(식 (3))을 사용해 도출하였다. 실험의 모식도는

2.1.1절과 같지만 실험 조건은 다른데 두께 50mm의 디스크 시편을 대상으로 음극(-, Cell I)에는 3% NaCl 수용액을, 양극(+, Cell II)에는 0.3M NaOH 수용액을 적용하여 6시간동안 60V의 전압을 인가하였다. 통과 전류량은 30분 간격으로 측정하였으며 식(4)을 이용해 통과 전하량을 도출하였다. 이 값은 ASTM C 1202에서 제안하는 Table 4에 의해 등급이 나뉜다(ASTM C 1202, 2005).

$$D = 0.0103 \times 10^{-12} \times (Q_{total})^{0.84} \quad (3)$$

여기서, D 는 촉진 염화물 확산계수(m^2/sec), Q_{total} 은 통과 전하량을 나타낸다.

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{330} + I_{360}) \quad (4)$$

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

Table 4 Evaluation standard of total passed charge 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

2.3 확산계수의 시간의존성지수(m) 평가 방법

확산계수의 시간의존성 평가에는 SFA(Silica Fume Association)의 Life-365 모델(식 (5))을 사용하였다. 식 (5)는 Log 관계를 활용하여 식 (6)과 같이 나타낼 수 있으며 선형회귀분석을 통해 시간의존성지수를 도출해낼 수 있다.

$$D_t = D_{ref} \left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^m \quad (5)$$

$$\operatorname{Log}\left(\frac{D_t}{D_{ref}}\right) = m \times \operatorname{Log}\left(\frac{t_{ref}}{t}\right) \quad (6)$$

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

또한, Life 365 매뉴얼에서는 시간의존성지수 산정식(식 (7))을 제안하고 있는데 OPC 및 SF(Silica Fume) 콘크리트는 0.2로 시간의존성지수를 고정하고 있으며, FA 치환율은 최대

50%, GGBFS 치환율은 최대 70%로 제한하고 있다(Thomas and Bentz, 2002).

$$m = 0.2 + 0.4(FA/50 + SG/70) \leq 0.6 \quad (7)$$

여기서, FA 와 SG 는 플라이애시 및 고로슬래그의 치환률(%)을 나타낸다.

Life 365 모델에는 겔보기 염화물 확산계수가 사용되지만 본 연구에서는 겔보기 염화물 확산계수를 측정하지 않았으므로 기존의 연구에서 제안한 겔보기 염화물 확산계수와 촉진 염화물 확산계수 간의 상관관계 식(식 (8))을 활용하여 겔보기 염화물 확산계수를 도출한 뒤 Life 365 모델에 대입하여 시간 의존성 지수를 평가하였다(Polder et al., 2007).

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

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

2.4 콘크리트의 압축강도 평가 방법

압축강도 평가는 KS F 2405에 준하여 평가하였으며 측정된 강도 값은 시간의존성지수(m)와의 상관관계 평가에 활용되었다.

3. 평가 결과

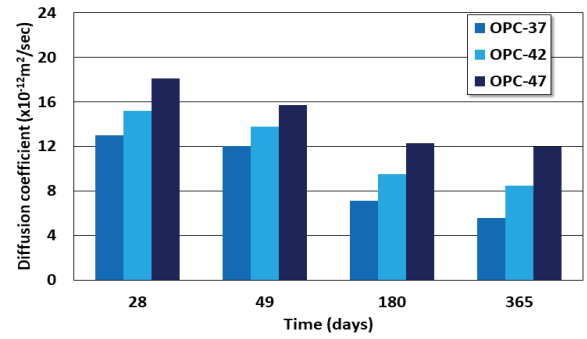
3.1 콘크리트의 염해저항성 평가 결과

3.1.1 촉진 염화물 확산계수 평가 결과

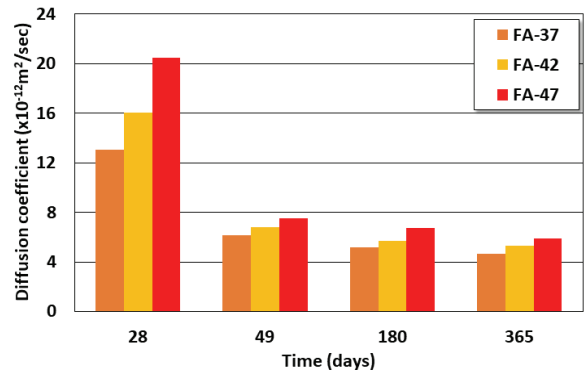
플라이애시의 치환률 및 물-결합재비의 변화에 따른 촉진 염화물 확산계수 거동 평가 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

기존의 연구 동향과 마찬가지로 초기재령일인 28일에서는 플라이애시 치환 배합에서 OPC 배합 대비 개선된 촉진 염화물 확산계수가 나타나지 않았으나 재령 49일부터 플라이애시 치환 배합에서 OPC 배합 대비 개선된 염해 저항성을 나타내었다(Nath and Sarker, 2011). 이는 시멘트의 수화반응 외에 플라이애시의 포졸란 반응으로 인해 생성된 추가적인 불용성의 안정한 규산화칼슘수화물이 원인으로 사료된다(Metha and Monteiro, 1993). 또한 모든 배합에서 물-결합재비가 높을수록 높은 확산계수가 나타났다. 재령 28일 대비 365일의 촉진 염화물 확산계수 감소율은 OPC 배합의 경우 43.1%~66.3%, 플라이애시 치환 배합의 경우 28.8%~36.2%로 나타났다. 또한, 플라이애시 치환 배합은 재령 28일 대비 49일에서 가장 큰

확산계수 감소 폭을 나타내었는데 플라이애시 치환 배합이 적절한 양생기간만 확보된다면 OPC 배합 대비 뛰어난 염해 저항성능을 나타내는 것으로 보인다.



(a) OPC concrete



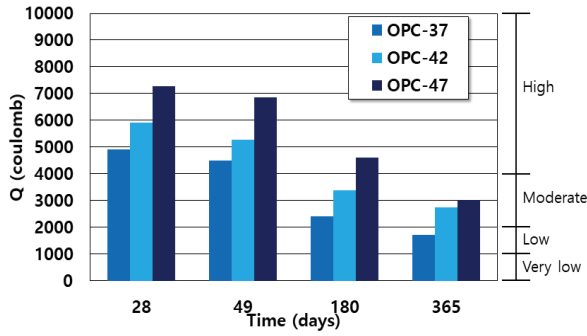
(b) FA concrete

Fig. 3 Evaluation of accelerated diffusion coefficient

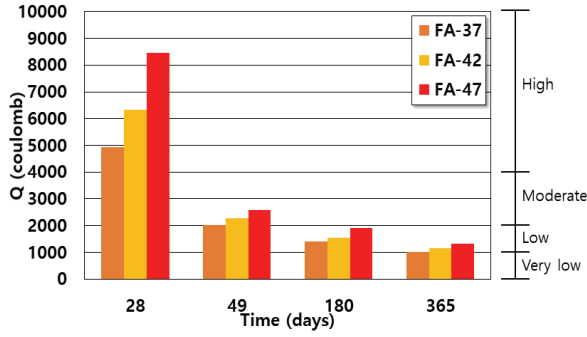
3.1.2 통과전하량 평가 결과

본 절에서는 플라이애시의 치환률 및 물-결합재비의 변화에 따른 통과전하량 거동을 평가하였으며, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

통과 전하량 결과 동향은 3.1.1절의 촉진 염화물 확산계수 결과 동향과 비슷하게 나타났다. 이는 두 실험 방법 모두 전기장내의 염소이온 이동 속도에 지배적인 시험 방법이기 때문이다. Table 4에 따르면 재령 28일의 모든 배합에서 High 등급을 나타냈다. 재령 180일에서부터 플라이애시 치환 배합은 모든 물-결합재비에서 Low 등급을 나타내었고, OPC 배합의 경우 물-결합재비 37%에서는 High 등급을, 42%, 47%에서는 Moderate 등급을 나타내었으며 최종 재령일인 365일에서 물-결합재비 37%에서는 Low 등급을, 물-결합재비 42%, 47%에서는 Moderate 등급을 나타내었다. 재령 28일 대비 365일의 통과전하량을 평가한 결과 OPC 배합의 경우 35.1%~46.5%를, 플라이애시 치환 배합의 경우 15.7%~20.4%의 감소율을 나타내었다.



(a) OPC concrete



(b) FA concrete

Fig. 4 Evaluation of passed charge by ASTM C 1202

3.2 시간의존성지수(m) 평가 결과

3.1.1절의 촉진 염화물 확산계수 결과로 겔보기 염화물 확산계수를 도출한 뒤, Life-365 모델(식 (5), 식 (6))을 이용해 시간의존성지수(m)를 도출하였다. 식 (8)을 이용하여 도출한 겔보기 염화물 확산계수를 Table 5에 나타내었다.

Table 5 Converted apparent chloride coefficient by accelerated chloride coefficient

	W/B (%)	Apparent chloride coefficient ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)			
		28 days	49 days	180 days	365 days
OPC	37	7.9	7.3	4.3	3.3
	42	9.3	8.4	5.7	5.1
	47	11.1	9.6	7.5	7.3
FA30	37	8.0	3.6	3.0	2.7
	42	9.8	4.0	3.4	3.1
	47	12.6	4.5	4.0	3.5

Fig. 5에는 Life-365 모델의 로그관계(식 (6))를 활용한 각 배합의 회귀분석 결과를, Fig. 6에는 각 배합의 시간의존성지수와 Life-365에서 제안하는 시간의존성지수 산정식(식 (7))에 각 배합의 특성을 대입하여 얻은 값의 비교 평가 결과를 나타내고 있다.

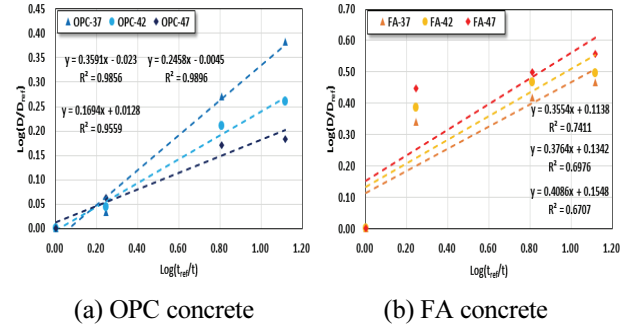


Fig. 5 Result of regression analysis for time-parameter(m)

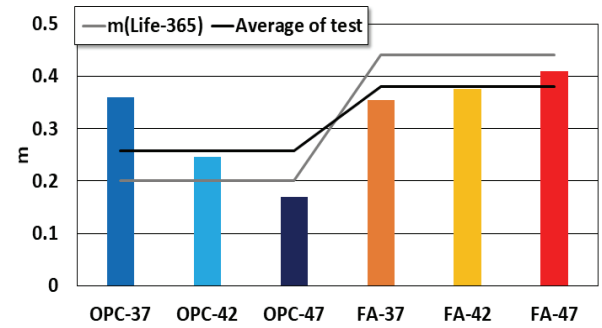


Fig. 6 Evaluation of time-parameter(m)

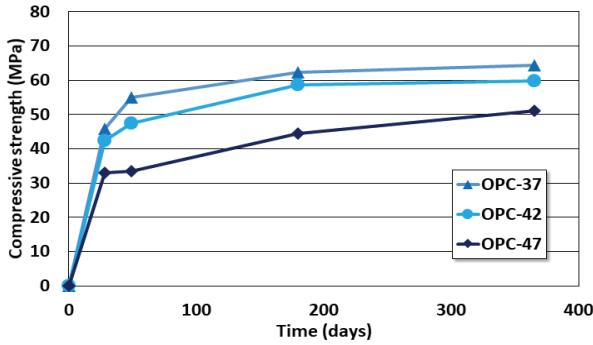
각 배합의 시간의존성지수 평균값을 비교하면 플라이애시 치환 배합에서 OPC 배합 대비 약 1.5배 높은 시간의존성지수가 나타났다. 시간의존성지수는 겔보기 염화물 확산계수가 감소하는 기울기를 나타내는 값이다. 그러므로 초기재령에서는 플라이애시 30% 치환 배합이 OPC 배합 대비 높은 겔보기 염화물 확산계수를 갖지만 최종 재령일에서는 시멘트의 수화반응 외에 추가적인 포졸란 반응으로 인해 OPC 배합보다 낮은 겔보기 염화물 확산계수 값을 갖게 되어 OPC 배합보다 높은 시간의존성지수를 나타내게 된다. 또한, OPC 배합에서는 물-결합재비가 낮을수록 높은 시간의존성지수가 나타났는데 이는 OPC 배합의 염화물 거동은 시멘트의 수화반응에 지배적이기 때문으로 사료되며, 플라이애시 치환 배합에서는 물-결합재비의 변화에 따른 시간의존성지수의 변화가 거의 나타나지 않았다.

본 연구의 실험값으로 얻은 시간의존성지수와 Life-365의 제안식(식 (7))으로 얻은 시간의존성지수를 비교 평가한 결과, OPC 배합에서는 본 연구의 실험값으로 얻은 시간의존성지수가 제안식으로 구한 시간의존성지수의 약 129.0%로, 플라이애시 치환 배합에서는 실험값으로 얻은 시간의존성지수가 제안식으로 구한 시간의존성지수의 약 86.4%로 나타났다. 이는 OPC 배합의 경우 물-결합재비의 증감에 따라 시간의존성지수가 크게 변하고 있는데 Life-365의 제안식에서는 물-결합재비의 증감을 고려하지 않아 OPC 배합의 시간의존성지수를 과소평가하고 있기 때문이다. 실험값으로 시간의존성지수를

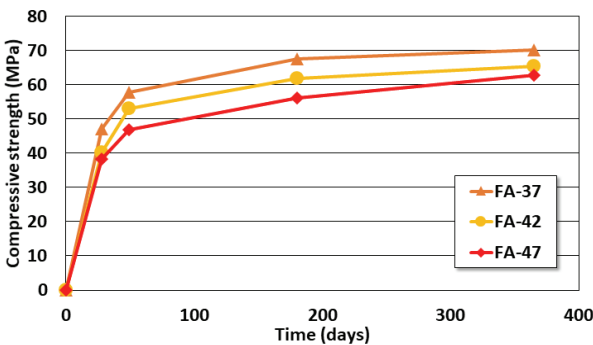
도출한 결과, OPC 배합이라 할지라도 물-결합재비가 상대적으로 낮은 배합(W/B=37%)에서는 높은 시간의존성지수를 나타내었다.

3.3 압축강도 평가 결과

KS F 2405에 준하여 재령 28일, 49일, 180일, 365일에서 각 배합의 압축강도를 평가하였으며, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다.



(a) OPC concrete



(b) FA concrete

Fig. 7 Evaluation of compressive strength by KS F 2405

모든 배합에서 물-결합재비가 낮을수록 높은 강도가 발현되었다. 또한, 초기재령인 재령 28일부터 플라이애시 치환 배합은 OPC 배합대비 동등이상의 강도 값을 나타내었다. 모든 배합에서 재령이 증가함에 따라 강도가 증가하는 경향을 나타내었는데 재령 28일 대비 365일의 압축강도 증가율은 OPC 배합에서 140.3% ~ 155.0%를, 플라이애시 치환 배합에서 148.7% ~ 164.4%로 플라이애시 치환 배합에서 OPC 배합대비 높은 강도 증가율을 나타냈다. 물-결합재비 47%의 OPC 배합에서 재령 49일 강도가 재령 28일 강도와 거의 비슷한 값이 나타났는데 이는 실험 오차로 간주되며 재령 180일에서 강도가 크게 상승하면서 이를 상쇄하였다.

3.4 시간의존성지수와 압축강도 간의 상관관계 평가 결과

본 절에서는 3.2절의 시간의존성지수(m)와 3.3절의 압축강도 간의 상관관계를 평가하였다. 압축강도의 경우 플라이

애시 치환 배합의 포졸란 반응을 충분히 고려하기 위해 최종 재령일인 재령 365일의 값을 사용하여 상관관계를 분석하였다. Fig. 8에 상관관계 평가 결과를 나타내었다.

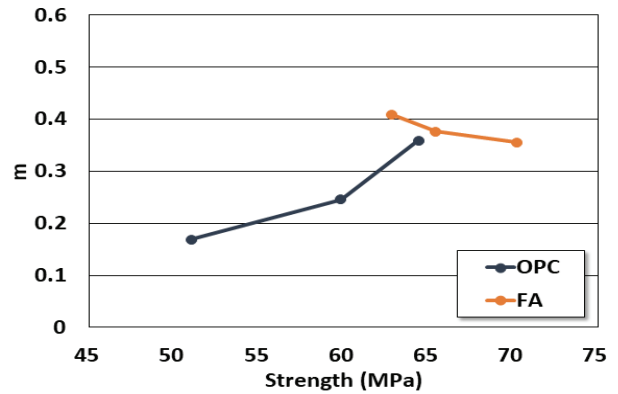


Fig. 8 Evaluation of relation between time-parameter and compressive strength

OPC 배합의 경우 압축강도가 증가할수록 선형적으로 시간의존성지수가 증가하는 경향을, 플라이애시 치환 배합은 압축강도가 증가할수록 선형적으로 시간의존성지수가 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 OPC 배합에서는 물-결합재비가 낮은 배합에서 높은 압축강도와 시간의존성지수를 나타내었기 때문이다. 또한 플라이애시 치환 배합의 경우, 압축강도는 물-결합재비가 낮은 배합에서 높은 값을 나타내었고 시간의존성지수는 물-결합재비가 높을수록 다소 높은 값이 나타나 기울기는 OPC 배합보다 적었으나 선형적으로 감소하는 경향을 나타내었다.

4. 결론

본 연구에서는 플라이애시 치환률 및 물-결합재비의 증감을 고려하여 재령의 증가에 따라 변화하는 축진 염화물 확산계수, 통과전하량, 압축강도 거동을 평가하였으며, 기존의 연구결과인 28일 실험결과를 참고하여 염해에 대한 시간의존성지수를 산출하여 고찰하였다. 또한 시간의존성지수와 재령 365일의 압축강도 간의 상관관계를 평가하였다.

- 1) 축진 염화물 확산계수의 경우, 재령 49일부터 플라이애시 치환 배합에서 OPC 배합 대비 낮은 값이 나타났으며, 재령 28일 대비 365일의 축진 염화물 확산계수의 감소율은 플라이애시 치환 배합에서 28.8% ~ 36.2%로, OPC 배합에서 43.1% ~ 66.3%로 나타났다. 플라이애시 치환 배합이 초기에는 OPC 보다 높은 값을 나타냈지만 재령이 증가함에 따라

- 라 포졸란 반응에 의해 OPC 배합보다 낮은 값을 나타냈다.
- 2) 통과 전하량 평가 결과, 재령 28일에서는 모든 배합에서 High 등급에 포함되지만 플라이애시 치환 배합은 모두 재령 180일부터 Low 등급에 포함되었고 OPC 배합은 재령 365일에도 물-결합재비 37% 배합만이 Low 등급에 포함되었다. 적절한 양생기간이 확보된다면 플라이애시 치환 콘크리트는 뛰어난 염해 저항성을 나타낼 수 있는 것으로 사료된다. 각 배합의 재령 28일 대비 365일의 통과전하량 감소율은 OPC 배합에서 35.1% ~ 46.5%, 플라이애시 치환 배합에서 15.7% ~ 20.4%로 나타났다.
 - 3) 시간의존성지수 도출 결과, 플라이애시 치환 배합에서 OPC 배합 대비 약 1.5배 높은 시간의존성지수가 도출되었다. OPC 배합이라 할지라도 상대적으로 물-결합재비가 낮은 배합(W/B=37%)에서는 높은 값이 나타났으며, OPC 배합의 경우 제안식에 의한 시간의존성지수가 실험 값에 의한 시간의존성지수보다 낮게 나타났고 플라이애시 치환 배합의 경우 OPC 배합과 반대의 경향을 나타냈다.
 - 4) 압축강도 거동의 경우, 모든 배합에서 물-결합재비가 낮을 수록 높은 강도를 나타내었고, 플라이애시 치환 배합에서 재령 28일부터 OPC 배합 대비 동등이상의 강도를 나타내었다. 재령이 28일에서 365일로 증가함에 따라 플라이애시 치환 배합의 강도 증가율이 OPC 배합보다 크게 나타났는데 플라이애시 치환 배합의 경우 148.7% ~ 164.4%, OPC 배합의 경우 140.3% ~ 155.0%로 나타났다. 또한 재령 365일의 압축강도와 시간의존성지수 간의 상관관계평가 결과, OPC 배합은 압축강도가 증가할수록 선형적으로 시간의존성지수가 증가하는 경향을, 플라이애시 치환 배합에서는 압축강도가 증가할수록 선형적으로 시간의존성지수가 감소하는 경향을 나타내었다.

감사의 글

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

References

- Al-Amoudi, O. S. B., and Maslehuddin, M. (1993), The effect of chloride and sulfate ions on reinforcement corrosion, *Cement and Concrete Research*, 23(1), 139-146.
- 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.
- Broomfield, J. P. (1997), *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair*, E&FN, London, 1-15.
- Chun, J. H., Ryu, H. S., Yoon, Y. S., and Kwon, S. J. (2017), Crack and Time Effect on Chloride Diffusion Coefficient in Nuclear Power Plant Concrete with 1 Year Curing Period, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 21(6), 83-90.
- Jung, S. H., Choi, Y. C., Moon, K. D., and Choi, Y. J. (2012), Development of green construction materials utilizing high volume coal combustion products, *Proceedings of the Korean Recycled Construction Resource Institute*, 12(1), 169-172.
- Ko, J. H., Yoo, S. Y., Koo, J. S., Moon, H. J., Kim, J. J., and Park, S. J. (2012), An Experimental Study to Apply for High-Rise Construction according to Various Technical Properties of Ultra High-Strength Concrete, *Journal of the Architectural Institute of Korea : Structure & Construction*, 28(1), 85-92.
- KS F 2405. (2015), Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete, KSSN, 1-3.
- KS L 5405. (2016), Fly ash, KSSN, 1-8.
- 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.
- Kwon, S. J., Park, S. S., Lee, S. M., and Kim, J. H. (2007), A Study on Durability Improvement for Concrete Structures Using Surface Impregnant, *Magazine of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 11(4), 79-88.
- 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.
- Lee, H. S., and Kwon, S. J. (2017), Analysis Technique on Time-dependent PDF (Probability of Durability Failure) Considering Equivalent Surface Chloride Content, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 21(2), 46-52.
- Lee, S. H., and 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.
- Lee, S. Y., and Lee, J. B. (2000), Application of electrochemical corrosion measurement techniques for rebars in concrete, *Journal of the Corrosion Science Society of Korea*, 29(6), 313-324.
- Metha, P. K., and Monteiro, P. J. M. (1993), *Concrete-Structure, Properties and Materials*, 2nd edition, Prentice Hall, New-Jersey, 271-284.
- Nath, P., and 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., and Kwon, S. J. (2016), Chloride Diffusion Coefficients in Cold Joint Concrete with GGBFS, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 20(5), 44-49.
- Oh, K. S., Moon, J. M., Park, K. T., and 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.
- 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.
- RILEM. (1994), Durability Design of Concrete Structures, Report of RILEM Technical Committee 130-CSL, E&FN, London, 28-52.
- SERI. (2003), Evaluation of chloride ion diffusion characteristics of high durability concrete, Samsung Engineering Research Institute, Final report.
- Song, H. W., Kwon, S. J., Byun, K. J., and Park, C. K. (2005), A Study on Analytical Technique of Chloride Diffusion Considering Characteristics of Mixture Design for High Performance Concrete using Mineral Admixture, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 25(1A), 213-223.
- 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.
- 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.
- Thomas, 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.
- 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.

Received : 03/15/2018

Revised : 06/18/2018

Accepted : 06/30/2018

요 지 : 철근콘크리트 구조물의 대표적인 열화현상인 염해를 억제하고자 여러 가지 연구가 진행되었는데, 그 중에서 혼화재료를 콘크리트에 혼입하여 사용하는 방법이 대표적으로 알려져 있다. 본 연구에서는 대표적인 콘크리트 혼화재료인 플라이애시를 혼입한 콘크리트와 OPC 콘크리트에 대하여 3가지 수준의 물-결합재비(37%, 42%, 47%)를 고려해 내구성능 평가를 실시하였다. 각 목표 재령일에서 Tang's method에 준하여 촉진 염화물 확산계수 측정 실험을, ASTM C 1202에 준하여 통과전하량 측정 실험을, KS F 2405에 준하여 압축강도 실험을 실시하였다. 또한, 기존의 연구결과인 재령 28일의 실험결과를 참고하여 확산계수에 대한 시간의존성지수(m)를 도출하여 고찰하였으며, 장기재령의 압축강도와 시간의존성지수 간의 상관관계를 평가하였다. 재령 49일부터 플라이애시 혼입 콘크리트에서 OPC 콘크리트 대비 개선된 염해 저항성을 나타내었으며 이는 포졸란 반응에 의해 생성된 불용성의 수화물이 원인으로 사료된다. 플라이애시 혼입 콘크리트에서 OPC 콘크리트 대비 약 1.5배 높은 시간의존성지수를 나타내었으며, 압축강도와와의 상관관계 평가 결과, OPC 콘크리트는 압축강도가 증가할수록 선형적으로 시간의존성지수가 증가하는 경향을, 플라이애시 콘크리트는 압축강도가 증가할수록 선형적으로 시간의존성지수가 약간 감소하는 경향을 나타냈다.

핵심용어 : 촉진 염화물 확산계수, 압축강도, 플라이애시, 통과 전하량, 시간의존성지수
