

재령에 따른 플라이 애쉬 콘크리트의 염소이온 확산특성

Chloride Ion Diffusion Characteristics of Fly ash Concrete with Age

이 재 호
Lee, Jae Ho

이 광 명**
Lee, Kwang Myong

정 영 수***
Chung, Young Soo

ABSTRACT

One of the major degradation processes of reinforced concrete (RC) structure is corrosion of reinforced steel due to chloride attack. Severe environments, such as marine environment and exposure to de-icing salts, could accelerate the steel corrosion of RC structures through the chloride ion intrusion into concrete. In order to delay this degradation process, several kinds of admixtures have been used in concrete mix. In this study, effective diffusion coefficient of chloride ion (D_{eff}) and total passed charge of concrete with and without fly ash were measured using electrical method. It is found that fly ash concrete has much less chloride ion coefficient than ordinary concrete at later age. By analyzing the test results, D_{eff} at 28 and 90 days was obtained as a function of water-binder ratio (W/B) and an equation for predicting D_{eff} with age was proposed considering the decreasing rate of D_{eff} .

1. 서 론

최근 콘크리트 구조물의 내구성에 대한 관심이 국내외적으로 높아져 철근 콘크리트(RC) 구조물의 열화 과정에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 해양 환경에 영향을 받는 장소에 위치하거나 제빙화학제의 사용이 빈번한 환경 조건하의 RC구조물을 열화 시키는 요인 중 가장 주요한 인자는 염소이온의 침투에 의한 철근의 부식이다.¹⁾ 따라서 염소이온의 확산 특성을 연구함으로써 철근매설 깊이에서의 부식 개시 시간을 예측하고, 이를 통해 구조물의 사용 수명을 평가하기 위한 시도가 활발히 이루어지고 있다.^{2,5)} 또한, RC구조물의 염소이온 확산을 지연시켜 사용수명을 증진할 목적으로 다양한 종류의 혼화재료를 사용한 고내구성 콘크리트가 개발되어 실제 현장에 적용되고 있다.⁶⁾ 본 연구에서는 혼화재로 플라이 애쉬를 사용한 고내구성 콘크리트의 통과전하량 및 염소이온의 확산 계수값을 측정하여 콘크리트 내로의 염소이온 확산 특성을 규명하였다. 또한, 재령의 증가에 따른 확산계수의 감소경향과 물-결합재 비와의 상관관계를 실험 결과를 통해 분석하였다.

* 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 석사과정

** 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 교수

*** 정회원, 중앙대학교 토목공학과 교수

2. 실험 연구

2.1 재료 및 배합비

재료는 D사의 1종 시멘트와 플라이 애쉬를 사용하였으며, 이들의 화학적 조성 및 물리적 특성을 Table 1과 같다. 잔 골재는 비중이 2.51이고 흡수율이 1.52%인 강모래, 굵은 골재는 최대 치수가 20 mm인 화강암 채석을 사용하였다. 실험에서 사용한 콘크리트의 배합비는 Table 2에 나타냈으며, 세 가지 종류의 물-결합재비(W/B)에 대하여 일반 콘크리트(OPC) 및 시멘트 양의 20%를 플라이 애쉬로 치환한 콘크리트(FA20)로 구분하였다. 보통강도 콘크리트인 배합 1과 4에는 AE 감수제를, 나머지 고강도 콘크리트 배합에는 나프탈렌 계열의 고성능 감수제(HRWR)를 사용하였다.

Table 1 Chemical composition and physical properties of cement and fly ash

Material	Chemical composition (%)							Physical properties	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	LOI	Specific gravity	Blaine (cm ² /g)
Cement	20.7	5.2	3.0	62.4	4.7	2.4	1.36	3.15	3,450
Fly ash	56.7	21.2	6.0	6.7	1.4	0.1	3.44	2.27	3,375

Table 2 Mix proportions of concrete(kg/m³)

Mix type	Mix no.	Water	Cement	Fly ash	Aggregate		AEWR (B×%)	HRWR (B×%)	W/B
					Fine	Coarse			
OPC	1	185	370	-	754	969	0.5	-	0.50
	2	158	450	-	672	1061	-	1.5	0.35
	3	148	550	-	617	1060	-	2.4	0.27
FA20	4	185	296	74	744	956	0.5	-	0.50
	5	158	360	90	661	1043	-	1.5	0.35
	6	148	440	110	605	1038	-	2.4	0.27

2.2 시편 제작

압축강도와 염소이온 확산실험을 위해 원주형 공시체(Ø100×200mm)를 제작하였다. 제작된 시편은 온도가 20℃, 습도가 50±3%인 항온항습실에서 24시간 양생한 후 탈형하여 실험 전까지 수중 양생하였다.

2.3 실험 방법

2.3.1 통과 전하량 측정 실험

통과 전하량 측정 실험은 ASTM C1202에 의거하여 실시하였으며, Fig. 1에 나타낸 바와 같이 확산 셀(cell)에 두께 5cm의 포화된 콘크리트 시편을 끼우고, 음극셀에는 3% NaCl 용액을, 양극셀에는 0.3M NaOH 용액을 각각 채운 후 DC 60V의 전압을 걸어 6시간 동안 매 30분마다 통과된 전류값을 측정하였다. 실험은 온도가 20℃이고 습도가 50±3%인 항온항습실에서 수행하였고, 총 통과전하량은

다음 식을 이용하여 구하였다.

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (1)$$

여기서, Q 는 통과전하량, I_0 는 전압이 가해진 순간의 전류값, I_t 는 전압이 가해진 후 t 시간에서의 전류값이다.

2.3.2 확산 계수 측정 실험

Fig. 1과 동일한 조건으로 DC $10.5 \pm 0.3V$ 의 전압을 걸어 7일간 수행하였고, 이를 통해 정상 상태에서의 전류값을 측정하였다. 실험 시 외부 조건은 통과전하량 측정 실험과 동일하며, 염소 이온의 유효 확산계수는 다음 식을 이용하여 결정하였다.³⁾

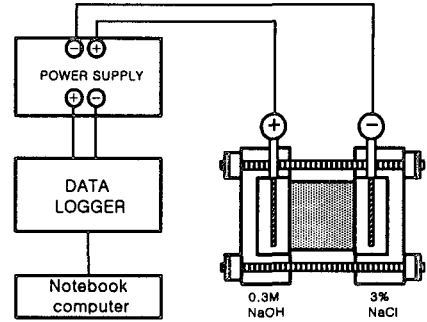


Fig. 1 Set up for electrical test

$$D_{eff} = \frac{RT}{nF^2} \cdot \frac{it_{cl}}{\Delta E} \cdot \frac{l}{A} \cdot \frac{1}{C_{cl}z_{cl}} \quad (2)$$

여기서, R 은 기체상수($8.3145 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$), T 는 절대 온도(K), ΔE 는 적용전압(V), l 은 시편 두께(cm), C_{cl} 은 NaCl 용액의 농도(mol/cm^3), z_{cl} 은 이온의 원자가, F 는 패러데이 상수, i 는 측정 전류값(A)이고 t_{cl} 은 염소이온의 이송수(transference number)를 나타낸다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 압축 강도

7일에서 1년 동안의 압축 강도 실험결과는 Table 3과 같다. 동일한 W/B인 경우, 재령 7일에서는 OPC 콘크리트가 FA20 콘크리트에 비하여 20~30% 정도 큰 경향을 나타냈으며, 재령 28일 이후에는 FA20 콘크리트의 강도가 OPC 콘크리트의 강도와 비슷하거나 더 큰 값을 나타내었다.

Table 3 Compressive strength (MPa)

Mix type	Mix no.	Age(days)				
		7	28	90	180	365
OPC	1	26.3	28.6	32.5	38.0	40.7
	2	42.6	46.9	49.8	56.7	63.8
	3	58.0	66.2	71.4	74.6	76.5
FA20	4	20.7	29.3	32.9	39.5	41.8
	5	36.8	45.0	48.7	56.9	63.3
	6	43.8	62.4	72.0	74.8	81.0

3.2 통과 전하량

통과 전하량 측정값은 콘크리트의 투과 특성을 나타낸다. 즉 통과전하량이 많을수록 투과성이 높아 염해에 대한 저항성이 낮다고 볼 수 있다.⁴⁾ 재령별 통과 전하량 실험결과를 나타내는 Table 4를 보면,

W/B가 낮을수록 통과전하량 값이 감소하는 경향을 나타냈으며, 각 배합에서 FA20 콘크리트의 경우에 초기에는 더 큰 값을 나타냈으나 재령 28일에는 OPC 콘크리트와 비슷한 값을, 그 이후로는 급격히 감소하여 OPC 콘크리트에 비해 매우 낮은 값을 나타내었다. 예를 들어, W/B가 0.35인 경우 재령 28일에서 FA20 콘크리트의 통과전하량이 OPC 콘크리트와 거의 비슷하였으나, 재령 90일에서는 1/2

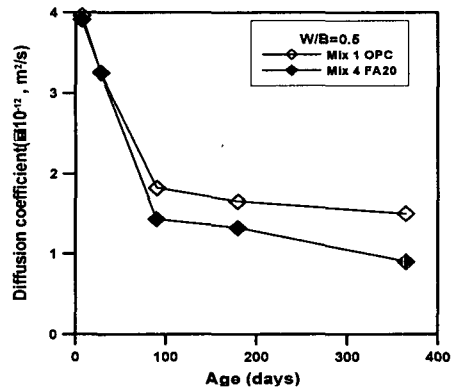
Table 4 Total passed charge(Q, coulombs)

Mix Type	Mix no.	Age(days)				
		7	28	90	180	365
OPC	1	10916	6155	5122	4558	4200
	2	6106	4165	3573	3287	2419
	3	4539	2664	2306	1977	1628
FA20	4	10727	5725	3128	1904	1050
	5	7649	4152	1879	1160	593
	6	5764	2642	948	758	401

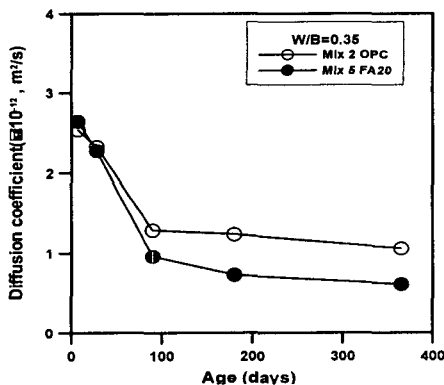
정도로, 재령 365일에서는 1/4 정도로, 재령이 증가함에 따라 통과전하량이 크게 감소하였다.

3.3 염소이온 확산 계수

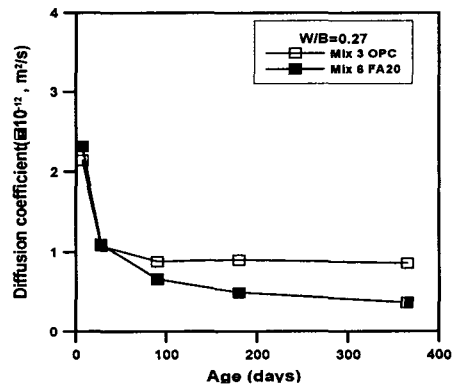
정상 상태에서의 염소이온의 유효 확산계수를 측정한 결과는 Fig. 3과 같다. W/B가 작아질수록 확산 계수는 감소하였고, 모든 경우에서 시간이 지남에 따라 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 수화 반응으로 인해 콘크리트 내의 공극 구조가 치밀해지는 것과 관련이 있는 것으로 사료된다. 즉, 염소 이온의 확산이 발생할 수 있는 콘크리트 내의 공극(수)이 감소함에 따라 염소이온의 확산 속도도 감소하게 되며, OPC 콘크리트에 비해 FA20 콘크리트는 더욱 현저히 감소하는 경향을 나타내었다.



(a) W/B=0.50

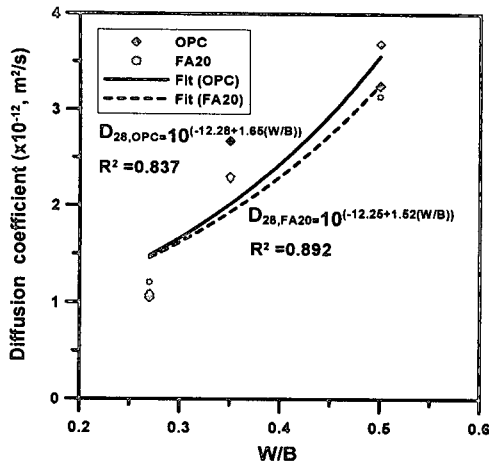


(b) W/B=0.35

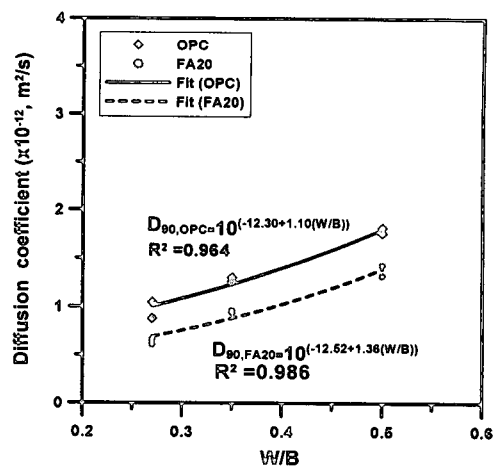


(c) W/B=0.27

Fig. 3 Effective diffusion coefficient of chloride ion with age



(a) For D_{28}



(b) For D_{90}

Fig. 4 Relation between W/B and effective diffusion coefficient of chloride ion at (a) 28 and (b) 90 days

3.4 염소이온 확산계수와 W/B 및 재령과의 관계

W/B에 따른 OPC 및 FA20 콘크리트의 재령 28일 염소이온 확산계수(D_{28}) 및 90일 확산계수(D_{90})를 밑이 10이고 지수부분은 W/B의 일차방정식으로 표현한 추정식을 Fig. 4의 (a), (b)에 나타내었다. 또한 Fig. 3과 같은 OPC 및 FA20 콘크리트의 재령에 따른 확산계수의 감소 경향을 다음과 같은 추정식을 적용하여 표현하였다.

$$D(t) = D_{ref} \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^m \quad (3)$$

여기서, $D(t)$ 는 t 시간(일)에서의 유효 확산계수, t_{ref} 는 기준재령(일), D_{ref} 는 기준 재령에서의 유효 확산계수, m 은 재령에 따른 유효 확산계수의 감소율을 나타내는 상수이다. 기준 재령이 28일과 90일인 경우의 유효 확산계수 값을 적용하여 추정된 확산계수의 감소계수(m)를 Table 5에 나타내었다. 표에 의하면, FA20 콘크리트의 확산계수는 재령 28일에서 OPC 콘크리트와 거의 비슷하였으나, 90일에서는 25% 정도 감소하였으며, 재령에 따른 확산감소계수 감소율은 OPC 콘크리트에 비해 FA20 콘크리트가 더 크게 나타났다. 기준 재령의 차이에 따른 예측결과의 정확성을 비교해 보면 재령 28일을 기준으로 한 경우보다 90일로 한 경우에서 예측식과 실측치와의 오차가 비교적 작게(R^2 값이 1에 더욱 근사하게) 나타남을 볼 때, 기준 재령은 90일이 더 적합할 것으로 사료된다.

5. 결론

- 1) 통과전하량 및 유효 확산계수 측정 실험으로부터 플라이 애쉬 콘크리트는 모든 배합에서 동일한 W/B를 갖는 일반 콘크리트에 비해 통과 전하량 및 확산계수가 낮은 결과를 얻었으며, 이로부터 플라이 애쉬 콘크리트가 염해에 대한 저항성이 우수함을 알 수 있다.

Table 5 Decay coefficient of diffusion coefficient with age

Mix type	Mix no.	D _{eff} (×10 ⁻¹²)		Decay coefficient of D _{eff} (m)		R ²	
		D ₂₈	D ₉₀	D _{ref} =D ₂₈	D _{ref} =D ₉₀	D _{ref} =D ₂₈	D _{ref} =D ₉₀
OPC	1	3.25	1.82	0.25	0.28	0.80	0.80
	2	2.30	1.29	0.22	0.32	0.61	0.89
	3	1.08	0.88	0.35	0.32	0.62	0.85
FA20	4	3.25	1.43	0.30	0.41	0.66	0.86
	5	2.27	0.96	0.30	0.42	0.56	0.85
	6	1.10	0.66	0.48	0.48	0.99	0.99

- 2) 염소 이온의 확산계수 측정 결과의 분석을 통해 W/B에 따른 OPC 및 FA20 콘크리트의 재령 28일과 90일에서의 염소이온 확산계수를 추정하는 식과 재령에 따른 확산 계수의 변화를 고려할 수 있는 식을 제안하였다. W/B가 낮을수록 또한 플라이 애쉬를 함유하는 경우, 임의 재령에서의 유효 확산계수는 작아지고, 재령에 따른 확산계수의 감소율은 증가하는 것으로 나타났다. 따라서, 동일한 W/B에서는 플라이 애쉬 콘크리트가 OPC 콘크리트에 비해 우수한 내구성능을 가질 것으로 판단된다.
- 3) 앞으로 다양한 배합비를 갖는 콘크리트의 확산계수 실험을 통해 확산계수 추정식의 상수가 결정된다면 보다 신뢰성이 높은 철근 콘크리트의 내구 수명 평가가 이루어질 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 KISTEP의 인위재해방재기술개발사업(M10113010001-02A2901-00310)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분에게 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. A. M. Neville, *Properties of concrete*, Forth Edition, Longman.
2. E. C. Bentz and M. D. A Thomas, *Life-365 Program manual.*, 2001.
3. C. Andrade, "Calculation of chloride diffusion coefficient in concrete from ionic migration measurement," *Cement and Concrete Research*. Vol 23. No.3, 1993, pp 724-742.
4. 오병환, 김광수, 장승엽, 김진춘, 최 룡, "플라이 애쉬 콘크리트의 내구성," *콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집*, 제10권, 2호, 1988, pp. 121-126.
5. 문한영, 김홍삼, 문재흠. 한아름, "콘크리트중의 염소이온 확산계수 추정 실험법의 비교," *콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집*, 제11권, 2호, 1999, pp. 787-790.
6. 조명석, 송영철, 류금성, 고경택, 김성욱, 이장화, "플라이애시 혼입 콘크리트의 내구성 평가," *콘크리트학회 봄 학술발표회*, 제14권, 1호, 2002, pp. 755-760.