

1년 양생된 고강도 원전 콘크리트의 염화물 확산에 대한 균열 및 시간효과

천주현¹, 류화성², 윤용식³, 권성준^{4*}

Crack and Time Effect on Chloride Diffusion Coefficient in Nuclear Power Plant Concrete with 1 Year Curing Period

Ju-Hyun Chun¹, Hwa-Sung Ryu², Yong-Sik Yoon³, Seung-Jun Kwon^{4*}

Abstract: Concrete structure for nuclear power plant is mass concrete structure with large wall depth and easily permits cracking in early age due to hydration heat and drying shrinkage. It always needs cooling water so that usually located near to sea shore. The crack on concrete surface permits rapid chloride intrusion and also causes more rapid corrosion in the steel. In the study, the effect of age and crack width on chloride diffusion is evaluated for the concrete for nuclear power plant with 6000 psi strength. For the work, various crack widths with 0.0~1.4 mm are induced and accelerated diffusion test is performed for concrete with 56 days, 180days, and 365 days. With increasing crack width over 1.0mm, diffusion coefficient is enlarged to 2.7~3.1 times and significant reduction of diffusion is evaluated due to age effect. Furthermore, apparent diffusion coefficient and surface chloride content are evaluated for the concrete with various crack width exposed to atmospheric zone with salt spraying at the age of 180 days. The results are also analyzed with those from accelerated diffusion test.

Keywords: Nuclear power plant concrete, Crack width, Steady-state condition, Diffusion coefficient, Age effect, Apparent diffusion coefficient

1. 서 론

1990년대까지도 콘크리트는 반영구적으로 사용할 수 있는 건설재료로 인식되어 왔으나, 해안가에 시공된 구조물은 매립된 철근의 부식으로 인해 많은 성능저하를 나타내고 있다(Broomfield, 1997; Song et al., 2006). 원전구조물의 경우 지속적인 냉각수의 유입이 필요하므로 해안가 근처에 위치하게 되는데, 해수에 직접 노출이 되는 취수구 이외에도 염화물의 비래에 따라 원전 격납고 및 부대시설은 염해에 따른 철근부식의 위험이 있다(Lee and Kwon, 2016; Yang and Moon, 2012).

원전 구조물은 FA(Fly Ash)를 혼입한 콘크리트를 기본적으로 사용하고 있으며, ACI 304.3R-96, ACI 211.1-91, ACI 301의 기준을 따른다(ACI 304.3R-96, 1996; ACI 211.1-91, 2009). 이러한 기준에서는 사용되는 결합재, 혼화재, 골재 등의 사용재료

와 물-결합재 비, 슬럼프 및 공기량 등의 배합사항을 규정하고 있다. 원전구조의 격납구조는 벽체 단면이 수 m에 이르는 매스콘크리트 구조물로서 초기재령에서의 건조수축 및 수화열에 따른 균열이 발생하기 쉬우며(Chung and Lee, 2012; Lee et al., 2016; Song et al., 2001; Chung et al., 2004), 발생된 균열은 외부 염화물 이온의 영향에 따라 염화물 유입을 가속화 시킨다. 유입된 염화물 이온은 철근의 부식을 야기하고 철근주위의 팽창압에 의해 균열이 더욱 증가하며, 이는 피복 콘크리트의 박락 및 내력의 저하를 야기한다(Broomfield, 1997; Song et al., 2006; Chung et al., 2008; Kwon et al., 2009; Yokozeki et al., 1998). 콘크리트 내부로 유입된 염화물 이온은 재령의 증가에 따라 확산성이 감소된다. 이는 몇 가지 이유가 있으나, 재령의 증가에 따른 공극구조 개선과 이로 인한 확산 저감성(Ishida et al., 2009; Maekawa et al., 2003), 수화물 증가에 따른 자유 염화물 이온의 흡착량 증가(Thomas and Bamforth, 1999; Leng et al., 2000), 유입된 염화물 농도구배의 저하(Welty et al., 1989) 등을 주원인으로 고려할 수 있다.

건전부의 염화물 이동의 시간의존성 효과는 많은 연구에서 진행되어 왔으나(Park et al., 2012a; Yang et al., 2017a; Yang et al., 2017b), 균열부의 시간의존성 확산계수에 대한 연구는 매우 희박하다. 주로 정상상태(Steady-state condition)에 대해서 균열 폭 및 균열 조도(Roughness)를 고려한 연구가 진행 중이지만 시간에 따라 감소하는 균열특성은 고려하지 못하고 있다(Win et al., 2004;

¹정회원, 한국건설생활환경 시험연구원, 선임연구원

²정회원, (주)한양E&C 대표이사

³정회원, 한남대학교 건설시스템공학과 석사과정

⁴정회원, 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 2017년 12월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 1월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Park et al., 2012b; Gerard and Marchand, 2000; JSCE, 2007).

본 연구에서는 6000 psi급 고강도 원전 콘크리트에 균열을 인가하여 정상상태에서의 염화물 확산계수 시험을 수행하였다. 이를 위해 콘크리트를 재령 56일, 180일, 1년까지 양생하였으며, 시간에 따른 확산 저감성 및 균열 폭의 변화에 따른 확산특성을 같이 평가하도록 한다. 또한 축진 실험이외에 동일 배합을 가지는 균열부 콘크리트를 비말대에 노출시켰으며, 180일 재령의 겉보기 확산계수를 균열 폭과 함께 분석하였다.

2. 염화물 확산계수의 시간의존성에 따른 거동 해석

기존의 많은 연구에서 확산계수의 시간에 따른 감소를 모델링하고 있는데, 이는 공극구조의 개선에 따른 확산계수의 저감을 기초로 하고 있다(Song et al., 2005). 초기재령 콘크리트의 거동을 기반으로한 Ducom 프로그램에서는 다상수화복합 발열모델(MCHM: Multi-Component Hydration Model), 수분이동 모델(MTM: Moisture Transport Model) 등에서 수화도에 따른 공극구조변화와 수분이동 변화가 동시에 고려되므로 확산 및 유속을 고려한 플럭스(Flux)항에서 직접 감소된 염화물 유입을 고려하고 있다. 식(1)에서는 Nernst-Einstein Equation을 지배방정식으로 사용하는 모델에 대한 지배방정식을 나타내고 있다(Ishida et al., 2009; Maekawa et al., 2003).

$$\alpha_i \frac{\partial C_d}{\partial t} + \text{div} \left(\frac{\phi S}{\Omega} D_d \frac{\partial C_d}{\partial x} + q \right) + Q_d = 0 \quad (1)$$

여기서, C_d 은 염화물 이온(mol/l), α_i 는 비용량으로 ϕ (공극률)과 S (포화도)의 함수, Ω 는 자유수 이동을 고려한 조도계수, q 는 수압구배에 따른 유속항, Q_d 은 자유염화물 농도의 시간에 따른 흡착량을 나타낸다. 이러한 식을 사용할 경우, 재령에 따른 공극률의 감소와 수분이동의 감소가 α , ϕ , q 에 고려되어 염화물 이동이 감소된다.

실태조사 또는 장기 침지된 시편결과를 이용한 겉보기 확산계수에서는 식(2)와 같은 Fick's 2nd Law를 사용하고 있으며, 식(3)과 같은 시간의존성 확산계수를 사용하고 있다(Thomas and Bamforth, 1999; Thomas and Bentz, 2002).

$$C(x,t) = C_0 \left(1 - \text{erf} \frac{x}{2\sqrt{D(t) \cdot t}} \right) \quad (2)$$

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

여기서, $D(t)$ 는 시간의존성 확산계수(m^2/year), t 는 시간(year), C_0 는 표면염화물량(kg/m^3), $C(x,t)$ 는 거리(x)와 시간(t)에 따른 염화물량을 나타낸다. D_{ref} 와 t_{ref} 는 기준시간에서의 확산계수와 기준시간을 나타낸다. 일반적으로 t_{ref} 은 28일을 가정한다. 시간의존성 지수(m)은 식(4)에 나타내었다(Thomas and Bentz, 2002).

$$m = 0.2 + 0.4(\%FA/50 + \%SG/70) \quad (4)$$

여기서, FA , SG 는 각각 플라이애쉬와 슬래그의 치환율을 나타내며, 플라이애쉬인 경우 50%, 슬래그인 경우 70%를 최대값으로 하고 있다.

염화물 확산의 주된 기제는 농도차에 의한 구배(Gradient)이다. 식(1)에서는 재령에 따른 확산계수의 저감을 공극률 또는 수분이동과 같은 물리적인 항으로, 식(2) 및 (3)에서는 간단한 시간에 따른 지수함수 모델로 고려하고 있음을 알 수 있다.

3. 사용재료 및 염화물 확산계수 실험계획

3.1 사용재료 및 배합

원전용 배합조건에 맞추어 6000 psi(41 MPa) 배합을 사용하였으며, 이를 Table 1에 나타내었다. 또한 사용된 골재 특성은 Table 2에, 사용된 시멘트 및 혼화제의 물리적, 화학적 특성은 Table 3에 나타내었다.

3.2 압축강도 실험

압축강도 시험은 시편을 20°C 온도에서 수중양생 하였으며, 56일, 180일, 365일 기간을 양생조에 존치한 뒤, KS F 2405 규정에 의거하여 시험을 수행하였다.

Table 1 Mix proportions for nuclear power plant concrete

Grade (psi)	G _{max} (mm)	W/B	S/a	W	Binder		Coarse Agg.	Fing Agg.
					C	FA		
6,000	19	40	44.4	162.8	325.5	81.4	938.8	748.9

W/B: Water to binder ratio, S/a: Sand to aggregate, W: Water, C: Cement, FA: Fly ash, Agg.: aggregate

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	25	2.64	0.82	6.87

F.M.: Fineness Modulus

Table 3 Physical and chemical properties of binder

Types	Chemical composition(%)							Physical properties	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Ig. loss	Specific gravity (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)
OPC	21.96	5.27	3.44	63.41	2.13	1.96	0.79	3.16	3,214
FA	55.66	27.76	7.04	2.70	1.14	0.49	4.3	2.19	3,621

3.3 정상상태 촉진 실험 및 겔보기 확산실험

3.3.1 균열유도

계획된 양생기간 이후 염화물 확산시험을 하기 전에 시편에 균열을 유도하였다. 콘크리트 표면에 균열게이지를 균열의 진전 방향과 수직을 이루도록 부착하였다. 이후 하중의 증가에 따른 균열 폭을 측정한다 뒤 제하(Unloading)을 하였다. 정확한 균열 폭을 도출할 수 없으므로 0.1 mm 단위로 그룹핑하기 위해 다양한 균열을 유도하였다. 하중 인가 시에는 균열 폭이 증가하며, 제하시 균열 폭은 감소하게 되는데, 최종적으로 제하이후의 균열 폭을 최종 균열 폭으로 산정하였다. Table 4에서는 균열 인가 사진을

을 나타내었으며, 지름 100 mm, 높이 200 mm인 실린더 시편을 100 mm 높이로 커팅하여 시편에 균열을 유도하였다.

3.3.2 정상상태 촉진실험

ASTM C 1202에서 규정된 장치와 실험방법을 적용하여 균열을 가진 디스크 콘크리트 시편(D:100 mm, H:100 mm)을 준비하였다. 시편의 측면은 에폭시로 코팅하여 1방향 염화물 유입을 유도하였으며, 시편의 양쪽에 확산셀을 장착하였다. Andrade 방법에 따라 양극부(anode)에는 0.1M NaOH 용액을, 음극부(cathode)에는 0.1M NaOH가 포함된 0.5M의 NaCl 용액을 각각 채우고 30V의 전압을 소정의 시간동안 인가하였다. 염화물 침투 확산이 정상 상태에 도달할 때까지 전류계를 통해 일정한 간격으로 통과 전류를 측정하였으며, 측정된 전류는 식(5)를 이용하여 정상상태의 촉진확산계수를 도출하였다(Andrade, 1993).

$$D_{eff} = \frac{RT}{nF^2} \frac{i t_d}{\Delta E} \frac{L}{A} \frac{1}{C_d Z} \quad (5)$$

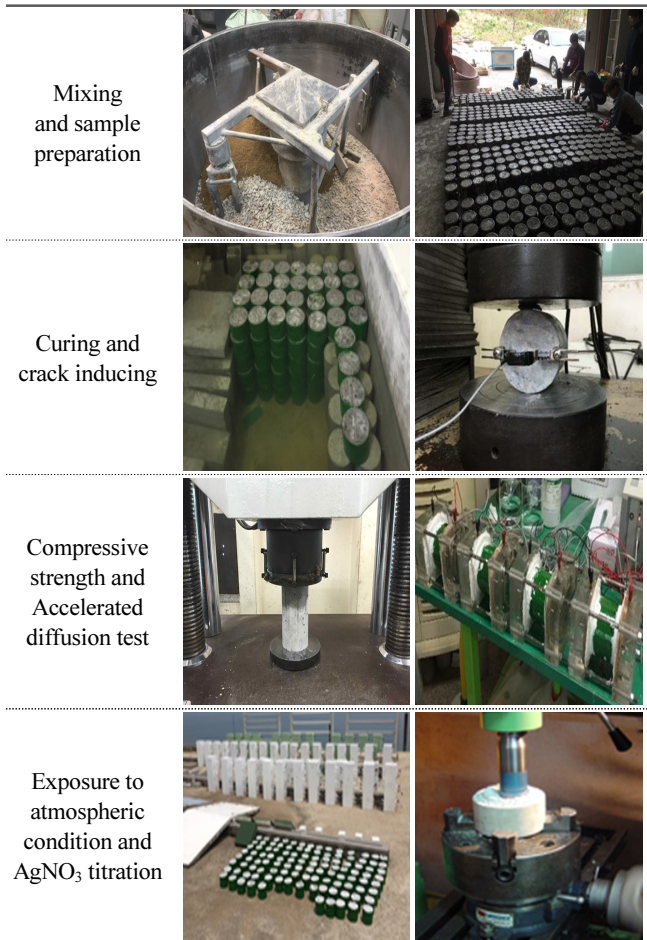
여기서, R 은 기체상수(8.314 J/K · mol), T 는 절대온도(K), Z 는 이온가, F 는 Faraday 상수(9.648×10⁴ J/V · mol), i 는 시편 통과 전류(Ampere), t_d 은 이동수, A 는 시편의 단면적(m²), ΔE 는 전압(Volt), L 은 시편의 두께(m), C_d 은 확산셀에서의 염화물 이온 농도(mol/l)를 나타낸다.

3.3.3 겔보기 확산계수 실험

동일한 원전 배합 콘크리트에 균열을 유도한 뒤, 해안가 비말대에 균열면을 노출시켜 180일 후 전 염화물 및 자유염화물의 확산성을 분석하였다. 콘크리트 미분쇄 시료를 대상으로 AASHTO T 260에 따라 질산은 용액을 이용한 전위차 적정법으로 산 가용성 염소이온량을 측정한다. 이 방법은 기지의 질산은(AgNO₃) 표준용액을 소량씩 첨가하면서 이때 선택성이온전극의 전위를 기록하고 당량점으로부터 식(6)과 같이 시료의 염소이온 농도를 계산한다.

$$\alpha^- = \frac{3.545 (NV)}{W} \quad (6)$$

Table 4 Process of the test including mix, crack-inducing, and measuring stage



여기서, Cl^- 은 미분쇄된 콘크리트 분말시료 중의 염소이온 농도(중량%), N 은 $AgNO_3$ 표준용액의 노르말 농도(N), V 은 종말 점에서의 질산은 표준용액 사용량(ml), W 은 미분쇄된 콘크리트 분말시료의 중량(g)을 나타낸다.

Fig. 1에서는 전위차 측정법에 따른 실험 절차를 나타내고 있으며 Table 4에서는 본 실험에 따른 절차를 표로 정리하였다.

4. 고강도 원전콘크리트 확산계수의 시간 및 균열특성

4.1 압축강도 특성 변화

재령 56일, 180일, 365일에 대한 압축강도 결과 Fig. 2에 도시하였다. 평균값은 56.8 MPa, 59.2 MPa, 61.2 MP로 재령에 따른 강도발현을 나타내었다.

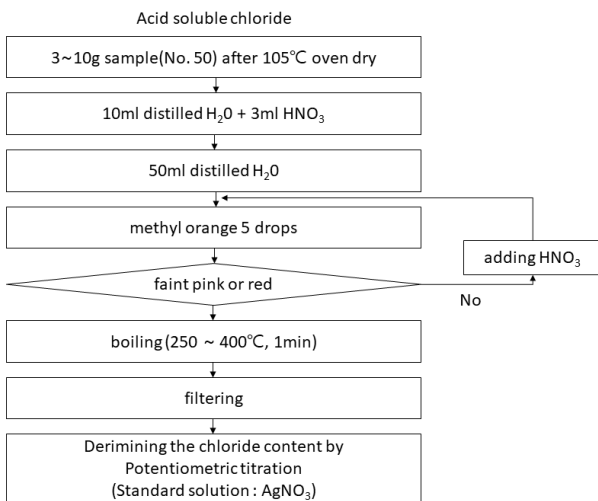


Fig. 1 Process of chloride determination by potentiometric titration

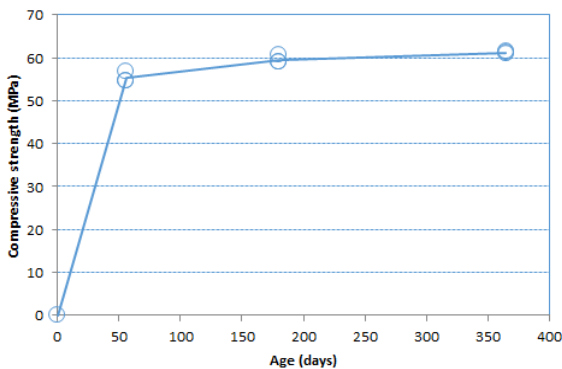


Fig. 2 Compressive strength with ages

4.2 균열 폭 및 재령에 따른 확산계수의 변화

본 절에서는 재령에 따른 균열부 콘크리트의 확산계수 변화를 나타내었다. Fig. 3에서는 각 재령에 따른 균열부 확산계수를 나타내고 있으며, Fig. 4에서는 각 재령의 건전부 콘크리트 확산계수 결과에 따른 변화비율을 나타내었다.

재령 56일 건전부 콘크리트의 확산계수는 $3.84 \times 10^{-12} m^2/sec$ 로 평가되었는데, 균열 폭의 증가에 따라 확산계수는 증가하였다. 균열폭 0.4 mm ~ 0.5 mm에서는 2.7배 수준으로 증가하였고, 1.0 mm에서는 3배 수준으로 증가하였다. 재령 180일 및 365일에서도 경향을 비슷하게 관측되었다. 180일 재령에서는 균열폭 0.4 mm일 때, 1.3배의 증가를, 1.0 mm일 때, 2.9배 수준으로 증가하였다. 또한 365일 재령에서는 최대 2.7배 정도로 증가함을 알 수 있다. 비정상상태의 확산계수 실험에서는 초기에 균열 폭에서의 염화물 유입이 크게 발생하여 0.4 mm 균열 폭에서 150 ~ 160배의 확산계수 증가가 평가된다. 그러나 정상상태 실험에서는 균열을 포함한 콘크리트 단면 전체의 염화물 거동이 측정되므로 보통 0.4 mm 균열 폭에서 2.7 ~ 3.0배의 증가를 나타내고 있다(Park et al., 2012a). 본 연구결과에서는 약간 감소된 2.5배 수준의 증가를 나타내는데, 재령의 증가로 인해 균열부 확산계

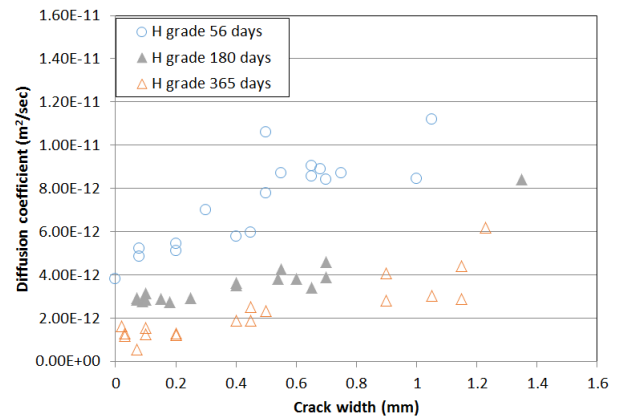


Fig. 3 Crack width and enlarged diffusion coefficient

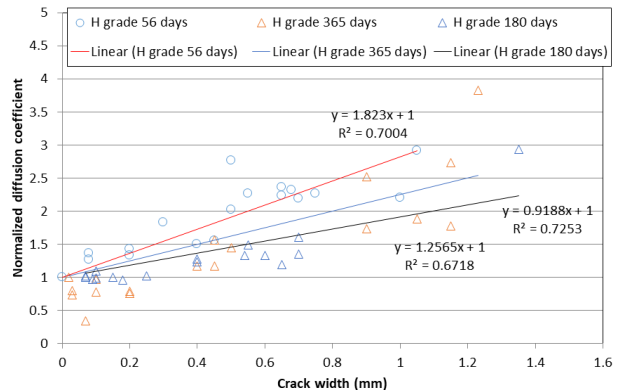


Fig. 4 Crack width and normalized diffusion coefficient

수의 증가폭이 감소하였기 때문이다. 또한 기존의 균열을 가진 보통강도의 콘크리트에서의 정상상태 확산성은 균열폭에 비선형적으로 증가하는데, 고강도 원전 콘크리트의 경우 선형에 가까운 결과가 도출되었다.

균열 폭이 증가할수록 확산계수는 비선형적인 지수함수 형태로 증가하지만 균열 폭 및 재령효과를 비교하기 위하여 Fig. 3에서는 선형 회귀분석을 수행하였다. 식(7)~식(9)에서는 각 재령에 따른 균열부 콘크리트의 확산증가에 대한 회귀분석 결과를 나타내었다.

$$Y_{56} = 1.823w + 1 \quad R^2=0.700 \quad (7)$$

$$Y_{180} = 0.919w + 1 \quad R^2=0.725 \quad (8)$$

$$Y_{365} = 1.2565w + 1 \quad R^2=0.672 \quad (9)$$

여기서 Y_i 는 i 재령에서의 확산계수 증가율이며, w 는 균열 폭 (mm)을 나타낸다. 재령이 증가할수록 기울기가 감소하는 경향이 나타나는데, 이는 균열부 확산계수 역시 시간에 따라 감소하고 있음을 나타내고 있다.

4.3 재령 및 균열폭에 따른 확산계수 변화 정량화

본 절에서는 재령 및 균열효과를 하나의 식으로 도출하기 위한 정량화 작업을 수행하도록 한다. 하나의 재령에 대하여 균열 폭에 따른 확산계수의 변화는 비선형으로 증가하므로 지수함수로 각각의 함수를 회귀분석 하며, 다음과 같은 절차를 가지도록 한다.

- 회귀분석 지수함수 모델링: 기존의 연구에 따라 균열부의 지수함수의 비선형적 회귀분석을 수행 :
 $Y = A(t)\exp(Ew)$: w 균열폭(mm)
- 0.0~0.1 mm, 0.1~0.2 mm 등 0.1 mm 간격으로 각 재령에 따른 평균 확산계수 도출(56일, 180일, 365일의 결과에 대하여 수행)
- 각 기준 값에 대하여 지수함수식을 회귀분석할 때, 56일 재령에 대해서는 1의 절편을 가져야 하고 180일 및 365일 재령에 대해서는 56일 결과를 기준으로 한 감소비를 절편으로 가지도록 회귀분석.
- a)에서 제안된 식에서 $A(t)$ 는 재령에 대한 감소를 나타낼 수 있으며, E 값은 균열 폭에 대하여 회귀분석.
- 각 회귀분석 결과에 대한 값을 이용하여 재령 및 균열에 대한 영향을 고려하는 상관성 도출.

Table 5에서는 각 균등화된 확산계수비를 나타내고 있으며, 이를 Fig. 5에 도시하였다. 균열폭에 대한 평균화 작업을 할 때, 각 균열폭을 0.1 mm 단위로 등급화 하였으며, 평균값의 100%를 초과하는 편차는 제외하여 다시 평균화하였다.

Fig. 5에서 알 수 있듯이 재령에 따른 기울기($A(t)$)는 재령의 증가에 따라 1.000(56일 재령), 0.616(180일 재령), 0.215(365재령)로 감소하였으며, 지수 값인 E 는 0.8366, 0.8419, 1.1116으로 작은 폭으로 증가하였다. 이는 균열 폭에 따른 확산계수의 증가 비율은 재령에 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다. Fig. 6에서는 $A(t)$ 및 E 의 변화를 재령에 따라 분석하였다.

A 에 대해서는 명확한 선형회귀분석 결과가 도출되었으나, E 에 대해서는 재령이 56일에서 365일로 증가함에도 큰 차이를 보이지 않았으므로 E 는 0.8366으로 동일하게 가정하였다.

Table 5 Normalized crack width and diffusion coefficient

Averaged crack width	Increasing ratios		
	56 days	180 days	365 days
0.05	1.000	0.616	0.215
0.15	-	0.625	0.260
0.25	1.141	0.630	0.231
0.35	1.514	-	-
0.45	1.263	0.773	0.388
0.55	1.946	0.873	0.432
0.65	1.906	0.778	-
0.75	1.846	0.915	-
0.85	-	-	-
0.95	-	-	0.633
1.05	2.120	-	0.561
1.15	-	-	0.670
1.25	-	-	1.138
1.35	-	2.946	-

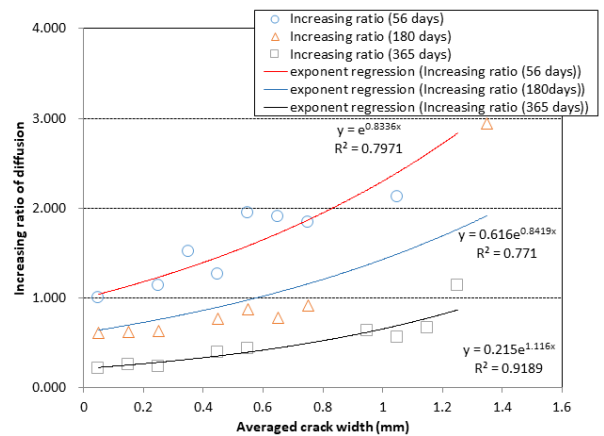


Fig. 5 Normalized crack width and changes in diffusion coefficient

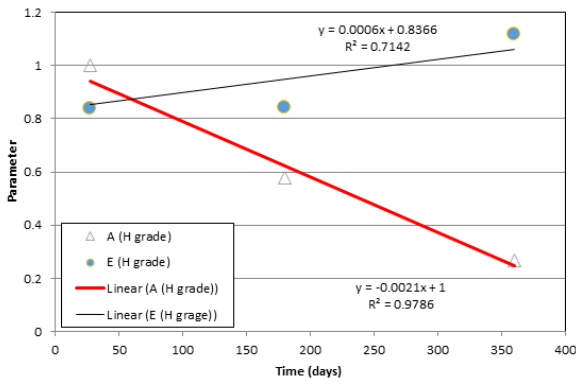
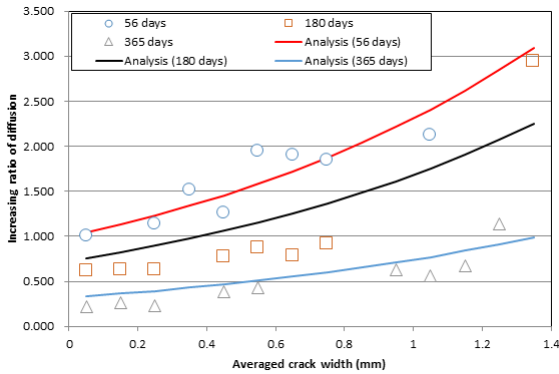
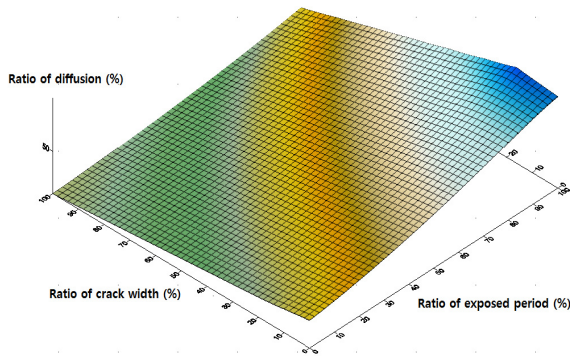


Fig. 6 Regression analysis on parameters(A and E)



(a) Comparison with test and the proposed analysis



(b) Contour from the results

Fig. 7 Regression analysis and contour for the results

이상의 결과를 하나의 식으로 정리하면 식(10)과 같이 나타낼 수 있으며 이 식을 이용한 결과와 관계 Contour를 Fig. 7에 나타내었다.

$$Y = [(-0.0022(t - t_{ref}) + 1)] \exp[0.8366w] \quad (10)$$

여기서, Y는 확산계수의 증가 비를, t는 재령, t_{ref} 는 기준재령(56 days)을 나타낸다.

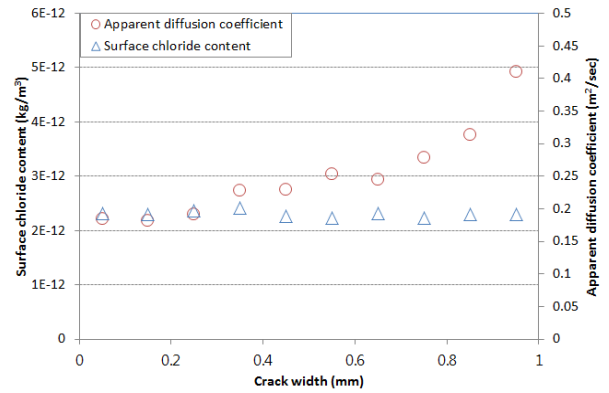


Fig. 8 Apparent diffusion coefficient and surface chloride content

4.4 균열 폭의 증가에 따른 겉보기 확산계수

3년 동안 축진 및 겉보기 확산계수 시험이 예정되어 있으나, 제한된 일정으로 인해 겉보기 확산계수는 180일 시험결과만 제시하도록 한다. 염화물 프로파일을 Fick's 2nd Law를 기준으로 회귀분석 할 경우 표면염화물량 및 겉보기 확산계수를 도출할 수 있다. 표면염화물량은 노출환경에 다르며, 일반적으로 10~12년까지는 선형적으로 빠르게 증가하며 그 이후는 크게 증가하지 않는다(JSCE, 2002). 해수 중에서는 보통 $18.0 \sim 22.0 \text{ kg/m}^3$ 의 수준을 가지고 있다. 180일 경과 시 겉보기 확산계수는 $0.0 \sim 0.1 \text{ mm}$ 균열 폭에서 $2.2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ 수준의 확산계수를 나타냈으나, 0.4 mm 에서는 125% 수준으로 증가하였으며, 1.0 mm 균열 폭에서는 223%로 증가하였다.

축진확산계수 실험보다 겉보기 확산계수는 낮게 평가되었는데, 이는 표면염화물량이 매우 낮으며 비말대 노출환경 기간이 짧기 때문이다. 표면염화물량은 균열 여부와 관계없이 $0.18 \sim 0.2 \text{ kg/m}^3$ 의 수준을 나타냈는데, 균열이 표면염화물량에 미치는 영향은 작은 수준으로 기존의 연구결과와 비슷한 경향을 보이고 있다(Kwon et al., 2009). 표면염화물량은 비래지역의 노출기간의 연장에 따라 증가하리라 예상된다. Fig. 8에서는 재령 180일의 겉보기 확산계수 및 표면염화물량을 나타내고 있는데, 깊이 10 mm 에 대한 분말을 채취하였으며, 이를 평균한 값을 사용하였다.

5. 결론

본 연구에서는 6000 psi 급 원전 콘크리트에 대하여 56일, 180일, 1년의 양생기간에 따른 정상상태 영동실험을 수행하고 균열 및 재령이 확산성에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

1) 재령 56일 건전부 콘크리트서의 확산계수는 3.84×10^{-12}

m²/sec로 평가되었는데, 균열 폭 0.4 mm~0.5 mm에서는 2.7배 수준으로 증가하였고, 1.0 mm에서는 3배 수준으로 증가하였다. 180일 재령에서는 균열 폭 0.4 mm일 때, 1.3배의 증가를, 1.0 mm일 때, 2.9배 수준으로 증가하였으며, 365일 재령에서는 최대 2.7배 정도로 증가함을 알 수 있다.

- 2) 균열 폭 및 재령에 따른 확산계수의 정량화를 위하여, 건전부의 확산계수 저하는 재령의 함수로, 균열 폭에 따른 확산계수 증가는 균열 폭의 지수 함수로 구현하였다. 재령에 따른 건전부의 확산저감성은 1년 경과 시 21.5% 수준으로 크게 감소하였으나 균열 폭의 증가에 미치는 영향은 상대적으로 미비하였다.
- 3) 180일 동안 비말대에 노출된 균열부 콘크리트의 겉보기 확산계수는 0.0~0.1 mm 균열 폭에서 2.2×10^{-12} m²/sec 수준으로 평가되었다. 균열 폭이 0.4 mm로 증가할 때, 확산계수는 125% 수준으로 증가하였으며, 1.0 mm 균열 폭에서는 223%로 증가하였다. 또한 표면염화물량은 노출기간이 짧으며 비말대이므로 0.18~0.2 kg/m³으로 매우 낮게 평가되었고, 균열 폭에 따른 표면염화물량의 변화는 거의 없었다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 2015 1520101090).

References

ACI 211.1-91. (2009), Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete, ACI Committee Report, 1-7.

ACI 304.3R-96. (1996), Heavy weight Concrete: Measuring, Mixing, Transporting, and Placing, ACI Committee Report, 1-8.

Andrade, C. (1993), Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurement, *Cement and Concrete Research*, 23, 724-742.

Broomfield, J. P. (1997), Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair, E&FN, London, 1-15.

Chung, C. H. and Lee, H. J. (2012), Evaluation of Structural Behavior of SC Walls in Nuclear Power Plant with Openings, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, 32(5A), 277-287.

Chung, L., Jay kim, J. H., and Yi, S. T. (2008), Bond Strength Prediction for Reinforced Concrete Members with Highly Corroded Reinforcing Bars, *Cement and Concrete Composites*, 30(7), 603-611.

Chung, L., Won, J. H., and Cho, S. H. (2004), Structural Performance of Reinforced Concrete Columns due to Corroded Main and Hoop

Bars, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 3(10), 3-10.

Gerard, B. and Marchand, J. (2000), Influence of cracking on the diffusion properties of cement-based materials Part I: Influence of continuous cracks on the steady-state regime, *Cement and Concrete Research*, 30(1), 37-43.

Ishida, T., Iqbal, P. O., and Anh, H. T. L. (2009), Modeling of chloride diffusivity coupled with non-linear binding capacity in sound and cracked concrete, *Cement and Concrete Research*, 39, 913-923.

JSCE (2002), Concrete Library 109: Proposal of the Format for Durability Database of Concrete, Japan Society of Civil Engineering (JSCE), Tokyo, Japan.

JSCE (2007), Standard Specification for Concrete Structures—Design; JSCE Guidelines for Concrete 15, Japan Society of Civil Engineering (JSCE), Tokyo, Japan.

Kwon, S. J. (2016), Service Life Evaluation through Probabilistic Method Considering Time-Dependent Chloride Behavior, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 28(2), 149-156.

Kwon, S. J., Na, U. J., Park, S. S., and Jung, S. H. (2009), Service life prediction of concrete wharves with early-aged crack: Probabilistic approach for chloride diffusion, *Structural Safety*, 31, 2009, 75-83.

Lee, H. S. and Kwon, S. J. (2016), Effects of Magnetite Aggregate and Steel Powder on Thermal Conductivity and Porosity in Concrete for Nuclear Power Plant, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 1-8.

Lee, Y., Cha, S. R., and Kim, J. K. (2016), Heat Transfer and Stress Analysis of Reactor Containment Building for Various Concrete Mix Proportions in Severe Weather Conditions, *The 2016 World Congress: Structure Congress*, IASEM, Jeju, Korea, 1-14.

Leng, F., Feng, N., and Lu, X. (2000), An Experiment Study on the Properties of Resistance to Diffusion of Chloride Ions of Fly Ash and Blast Furnace Slag Concrete, *Cement and Concrete Research*, 30(6), 989-992.

Maekawa, K., Ishida, T., and Kishi, T. (2003), Multi-Scale Modeling of Structural Concrete, Tylor&Francis, London and Newyork, 1st Edition, 291-352.

Park, S. S., Kwon, S. J., and Jung, S. H. (2012a), Analysis technique for chloride penetration in cracked concrete using equivalent diffusion and permeation, *Construction and Building Materials*, 29, 183-192.

Park, S. S., Kwon, S. J., Jung, S. H., and Lee, S. W. (2012b), Modeling of water permeability in early aged concrete with cracks based on micro pore structure, *Construction and Building Materials*, 27(1), 597-604.

Song, H. W., Cho, H. J., Park, S. S., Byun, K. J., and Maekawa, K. (2001), Early-age cracking resistance evaluation of concrete structure, *Concrete Science and Engineering*, 3, 62-72.

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.

Song, H. W., Pack, S. W., Lee, C. H., and Kwon, S. J. (2006), Service Life Prediction of Concrete Structures under Marine Environment Considering Coupled Deterioration, *Journal of Restoration of Buildings and Monuments*, 12(4), 265-284.

Thomas, M. D. A. and Bamforth, P. B. (1999), Modeling Chloride Diffusion in Concrete: Effect of Fly Ash and Slag, *Cement and*

- Concrete Research*, 29(4), 487-495.
- 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, SFA, 12-56.
- Welty, J. R., Wicks, C. M., and Wilson, R. E. (1989), Fundamental of Momentum, Heat, and Mass Transfer, John Wiley & Sons Inc, Hoboken.
- Win, P. P., Watanabe, M., and Machida, A. (2004), Penetration profile of chloride ion in cracked reinforced concrete, *Cement and Concrete Research*, 34(7), 1073-1079.
- Yang, K. H. and Moon, J. H. (2012), Mix Proportions and Physical Properties of Heavy Weight Concrete for Nuclear Power Plant, *The Korea Institute of Building Construction*, 12(3), 9-14.
- Yang, K. H., Cheon, J. H., and Kwon, S. J. (2017a), Modeling of chloride diffusion in concrete considering wedge-shaped single crack and steady-state condition, *Computers and Concrete*, 19(2), 211-216.
- Yang, K. H., Singh, J. K., Lee, B. Y., and Kwon, S. J. (2017b), Simple Technique for Tracking Chloride Penetration in Concrete Based on the Crack and Width under Steady-State Conditions, *Sustainability*, 9(2), 1-14.
- Yokozeiki, K., Okada, K., Tsutsumi, T., and Watanabe, K. (1998), Prediction of the service life of RC with crack exposed to chloride attack, *Japan Symposium of Rehabilitation of Concrete Structure*, 10(1), 1-6.

Received : 07/18/2017

Revised : 09/21/2017

Accepted : 10/30/2017

요 지 : 원전콘크리트는 두꺼운 벽체를 가진 매스콘크리트 구조이며 시공초기에 건조수축 및 수화열에 따른 균열이 발생하기 쉽다. 또한 냉각수를 항상 필요로 하므로 해안가에 위치하는데, 균열이 발생한 콘크리트에서는 염화물 이온의 유입으로 인해 철근 부식이 빠르게 발생한다. 본 연구에서는 6000 psi 급 고강도 원전콘크리트 배합을 이용하여 재령 및 균열에 따른 확산계수의 변화를 분석하였다. 이를 위해 재령 56일, 180일, 365일 동안 양생된 콘크리트에 균열폭을 0.0~1.4 mm까지 유도하였으며 정상상태의 촉진 확산실험을 수행하였다. 균열폭의 증가에 따라 확산계수는 최대 2.7~3.1배로 증가하였으며, 재령의 증가에 따른 확산계수의 저감성이 크게 평가되었다. 또한 180일 동안 비탈대에 노출된 균열부 콘크리트에 대하여 겉보기 확산계수 및 표면염화물량을 평가하였으며, 촉진 실험결과와 비교를 수행하였다.

핵심용어 : 원전콘크리트, 균열 폭, 정상상태, 확산계수, 재령효과, 겉보기 확산계수
