

원전 안전관련 콘크리트 구조물의 수명예측을 위한 재령계수에 대한 연구

이춘민¹, 윤의식², 김성수^{3*}

A Study of Time Dependent Diffusion for Prediction Service Life in NPPs Safety Related Concrete Structures

Choon-Min Lee¹, Eui-Sik Yoon², Seung-Soo Kim^{3*}

Abstract: Nuclear power plant concrete structures are in contact with the coast, and durability due to chloride attack is very important because it is used as cooling water by taking seawater. For this purpose, a 3-year long-term saltwater immersion test was carried out to evaluate chloride ion diffusion coefficient and age exponent (m). The m values of the foundation with 4,000 class was 0.35 ~ 0.39, similar to KCI or ACI suggested values. essential service water constructions and tunnels of 5,000 class were 0.44 ~ 0.53 and 6,000 class, and 0.62 of reactor containment buildings were similar to the proposed values of FIB. As a result of the prediction of the service life with the measured age coefficient, all the safety related concrete structures of the nuclear power plants satisfied the service life of more than 60 years.

Keywords: Time-Dependent Diffusion, Chloride Diffusion Coefficient, Aging Exponent, Prediction Service Life

1. 서 론

최근 콘크리트 구조물의 해양환경 신축이 증가하고 있으며 대부분의 구조물은 사회기반시설물로 공용년수를 고려하여 내구성 향상을 위한 공법을 다양하게 적용하고 있는 실정이다. 하지만 이러한 구조물은 해양환경이라는 특수한 환경으로 인한 내구성능 저하가 예상된다.(Sharouri et al., 2017; Choinska et al., 2007; Wang et al., 2016) 특히 전력사용의 증가에 따라 건설된 원자력발전소 콘크리트 구조물은 발전소 특성상 냉각수가 필요로 하기 때문에 호수 또는 해안가에 인접한 구조물이 대부분을 차지하고 있다.

해양환경의 콘크리트 구조물은 염화물에 노출되고, 염화물 이온은 Fick's 제 2 확산법칙에 의해 콘크리트 내로 확산되며, 확산 특성은 노출기간에 따라 감소하게 된다.(Collepari et al., 1972; Takewaka et al., 1988; Mangat and Molloy, 1994) 해수를 취수하여 냉각수로 사용하는 원전 구조물은 해수에 직접 접하는 구조물이 있어 이에 대한 내구성 확보를 위하여 설계단계에서부터 다양한 수명 예측과 함께 고품질의 재료를

사용하여 시공하고 있는 실정이다. 콘크리트 구조물의 내구성 설계에 있어 설계자들은 대부분 재료의 물리적 특성에 주의를 기울여 왔지만 현재에 이르러서는 구조물의 수명예측 등의 여러 가지 이유 때문에 재료의 내구특성에 관한 연구의 필요성이 커지고 있다.

하지만 이러한 노력에도 원자력발전소 콘크리트의 내구성에 대한 역학조사 결과 OPC만을 사용한 최초의 원자력발전소 구조물은 해양환경에서 40년간 상업운전을 종료한 구조물이다. 설계기법에 따라 콘크리트표준시방서(이하, KCI) 및 ACI에서 제안된 경험식의 확산계수와 재령계수를 적용하여 염해에 대한 내구수명을 예측한 결과 7년으로 산정되어 현실적으로 차이가 있음을 확인하였다.

한편, KCI, ACI 및 FIB는 염화물이온확산계수 및 재령계수에 대한 연구를 기반으로 그 모델식을 제시하고 있다.(MLIT, 2009; ACI 365.1R, 2000; CEB-FIP, 2006) 그러나 각 코드 기반의 시간의존계수는 재료적 측면, 사용환경에 따라 제시된 계수는 상이하고, 콘크리트를 과소평가 하여 설계 시에 콘크리트 피복두께의 증가, 결합재량 증가 등의 과다 설계로 이어질 수 있으므로 이를 보완할 연구가 필요한 실정이다.

따라서 본 연구는 플라이애시를 사용한 원자력발전소 콘크리트 구조물의 안전관련 콘크리트 구조물의 역학적 특성과 해양 콘크리트 내구성 증가 가장 큰 요인인 염해로 인한 염화물 이온확산계수와 재령계수를 산출하고자 3년 동안의 실증시험을 수행 하였고, 이를 통해 원전 콘크리트 구조물의 현실적이고 신뢰도 기반의 실측 재령계수를 도출 하고자 하였다.

¹정회원, 대전대학교 박사과정

²정회원, 한국원자력안전기술원 책임연구원

³정회원, 대전대학교 교수, 교신저자

*Corresponding author: sskim@daejin.ac.kr

Department of Civil and Environmental Eng. Daejin University, 1007, Hoguk-ro, Pocheon-si, Gyeonggi-do, Rep. of Korea

• 본 논문에 대한 토의를 2019년 5월 1일까지 학회로 보내주시면 2019년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

2. 원전의 설계요건

원자력발전소는 심층방어(Defense in Depth) 개념으로 물리적 다중방벽과 다단계 방호로 이루어져 있으며(Kim, 2012) 그 중 최종방벽의 역할을 하는 콘크리트 구조물의 안전성은 매우 중요하다 할 수 있다. 1970년대 고리원자력발전소 이래로 국내의 원전은 현재까지 25기가 운영 되고 있고, 5기가 건설 중이며, 구조물의 구성은 해안지역 내에 위치하는 RCB(Reactor Containment Building), TGB(Turbine Generator Building), 기타 보조건물로 이루어져 있으며, 해수에 직접 접하는 구조물로 ESW(Essential Service Water), 취·배수 터널로 이루어져 있다.

원전의 설계요건은 전력산업기술기준 SN 원자력구조(Nuclear Safety Related structures)에 설계, 시험 및 검사, 노출 환경에 따라 내구성 요건으로 물-결합재비, 동결융해에 의한 최소 압축강도 및 공기량, 황산염 노출에 의한 물-결합재비, 최소 압축강도, 철근부식방지에 의한 콘크리트 구성재료의 염화물이온 농도, 최소 압축강도 및 최소 피복두께 제한치 등으로 설계 되어있다.(KEPIC, 2010)

3. 실험계획 및 방법

3.1 사용재료

시멘트는 포틀랜드 시멘트의 표준 규격 요건을 만족하는 원전용 1종 보통포틀랜드 시멘트를 사용하고(ASTM C150, 2018) 혼화재료로 콘크리트용 Fly-ash 와 Natural pozzolan 요건을 만족하는 플라이애시를 사용하였으며(ASTM C618, 2019), Table 2에 시멘트 및 플라이애시의 화학성분을 나타내고 있다. 콘크리트 골재류를 위한 표준규격을 만족하는 골재를 사용하고(ASTM C33, 2018) 각 시험결과를 Table 3에 나타내었다. 또한, 화학혼화제는 콘크리트 화학혼화제를 위한 표준 규격에 적합한 것을 사용하였다.(ASTM C494, 2017)

3.2 콘크리트 배합강도

현장 콘크리트의 품질은 골재, 시멘트 품질변동, 계량오차,

비비기 작업 등에 의해 공사기간 중 변동 요인을 고려하여 콘크리트 배합강도는 설계기준강도에 증가계수를 적용하여 정하며 구조물에 사용되는 배합강도는 Table 4에 나타내었다.

3.3 콘크리트 배합설계

콘크리트의 배합설계는 원전 콘크리트 생산시방서(CP-C2)를 따르고 미국 콘크리트 학회의 콘크리트 구조용, 보통, 중량, 매스 콘크리트 배합절차에 따라 골재원 마다 수행하며(ACI 211.1, 1991; ACI 301, 2010) 기준 W/B 배합에 $\pm 5\%$ 배합을 추가로 실시하고 압축강도 시험결과를 회기분석하여 강도에 따른 W/B를 결정한다. 이에 따른 확정배합의 결과를 Table 5에 나타내었다.

Table 1 NPPs Concrete Structure

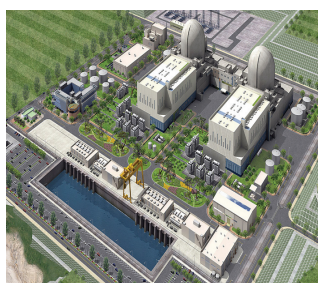
Item	Structues	
	RCB	Reactor Containment Building
	TGB	Turbine Generator Building
	ESW	Essential Service Water
	Tunnel	Seawater Intake and Outfall Tunnel
	Base	Basement

Table 2 Properties of cement and mineral admixtures

Items	Chemical compositions(%)							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Ig. loss	I.R.	Na ₂ O + 0.658 K ₂ O
Cement	20.48	5.72	3.67	2.74	2.46	1.70	0.20	0.85
Fly ash	85.72		-	0.44	3.70	-	-	-

Table 4 Required Average Compressive Strength

Spec. Compressive Strength (f _{ck} , Mpa)	Required Average Strength (f _{cr} , Mpa)
27.6	f _{ck} +8.27
34.5	f _{ck} +8.27
41.4	f _{ck} +9.65

Table 3 Properties of aggregates

Items	Gmax (mm)	S.G. (g/cm ³)	F.M.	Apsorp. (%)	Sound ness (%)	Flat and Elong. (%)	L.A Machine	O.I (Color)	Light weight (%)	#200 (%)	Unit weight (kg/m ³)	chloride (ppm)
Fine Agg.	-	2.36	2.75	0.99	0.6	-	-	No 1	0	1.1	-	53
Coarse Agg.	20	2.67	6.80	0.97	0.6	1	12.0	-	0	0.2	1,586	18
	25	2.66	6.40	0.85	0.6	2	12.3	-	0	0.4	1,602	23

Table 5 Mix Proportions for Each Structures

Structures	Class	W/B (%)	W (kg)	C (kg)	F/A (kg)	S (kg)	G	
							20 mm	25 mm
Basement	4,000	50	160	258	65	799	-	799
	4,000H	50	143	234	58	882	-	882
ESW	5,000	40	160	323	81	725	-	1016
	5,000H	40	142	292	73	817	-	1000
Tunnel	5,000T	40	171	343	86	676	990	-
RCB	6,000	40	163	329	82	759	942	-

본 실험에서는 평가 시험체를 원전 구조물의 현장 타설과 유사하게 모사하기 위해 원전 배치플랜트를 이용하여 제작을 수행하였고, 모의부재를 각 배합 타입별 제작 후 코어채취 및 시험체 가공을 실시하였다. 또한 염화물이온확산계수의 시간 의존특성을 검토하기 위하여 90일, 180일, 1년, 2년, 3년의 기간동안 염화물이온 3% 농도에 노출시켜 각 침지 재령일에 깊이별 프로파일 분석을 실시하였다.

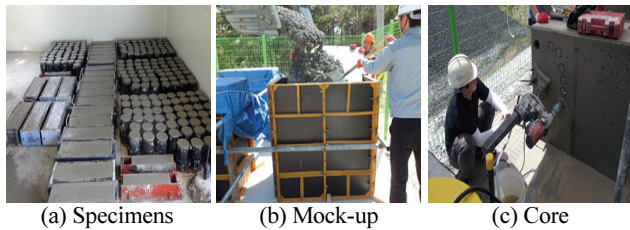


Fig. 1 Production of Test Specimens

3.4 평가방법

3.4.1 촉진시험에 의한 염분침투 평가

촉진시험에 의한 염화물이온확산계수(이하, D_{acc})는 NT BUILD 492시험을 통하여 평가하였고 50 mm 두께의 시편을 18 ± 2 시간동안 포화 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 용액으로 포화 시킨 후 슬리브로 체결하여 음극에 10% NaCl 양극에 0.3 M NaOH 용액을 채운 후 초기 전류 30 V를 가하면 콘크리트 특성에 따라 전류값이 나오게 되는데 이에 따라 적절한 전류값과 시험시간을 적용하고 촉진시키어 식 (1), (2)에 따라 촉진 염화물이온확산계수를 도출하였다.

$$D_{acc} = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{X_d - \alpha \sqrt{X_d}}{t} \quad (1)$$

$$E = \frac{U-2}{L} \quad (2)$$

$$\alpha = 2 \sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot \text{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2c_d}{c_0} \right) \quad (3)$$

여기서, D_{acc} 은 비정상상태의 염화물이온확산계수(m^2/s), z 는 이온전자가, F 는 페러데이상수($9.648 \times 10^4 \text{ J}/(\text{V}\cdot\text{mol})$), U 는 적용전압(V), R 은 기체상수($8.314 \text{ J}/(\text{K}\cdot\text{mol})$), T 는 온도, L 은 시편두께, X_d 는 평균 침투 깊이, t 는 시험시간, erf^{-1} 은 역 오차함수, c_d 는 염화물 축적으로 인한 변색(0.07 N, OPC), c_0 는 음극의 염화물 이온 농도(2 N)를 나타낸다.

3.4.2 규정 및 해석에 의한 염분침투 평가

(1) 콘크리트표준시방서에 의한 염분침투 평가

콘크리트표준시방서 해설 II에서는 염화물이온 확산계수의 시간의존성을 고려하였으며, 이는 콘크리트의 재령이 증가하면 콘크리트 미세구조의 변화에 따라 확산계수는 점차 낮아지게 되는 현상을 의미하며 식 (3), (4)와 같이 콘크리트 수화반응에 의해 확산계수가 시간의 경과에 따라 감소하는 것을 기본 가정으로 한다.

$$D_p = \frac{D_R}{1-m} \left(\frac{t_R}{t} \right)^m \quad (t < t_c = 30 \text{년}) \quad (4)$$

$$D_p = \frac{D_R}{1-m} \left[(1-m) + m \frac{t_c}{t} \right] \left(\frac{t_R}{t_c} \right)^m \quad (t \geq t_c = 30 \text{년}) \quad (5)$$

여기서, D_p 는 콘크리트의 염화물이온 확산계수의 예측값, D_R 은 기준 시간 t_R 에서의 염화물이온 확산계수를 나타내고, t_c 는 확산계수 감소한계(일반적으로 30년), m 은 재령계수(이하, m)를 나타낸다.

(2) ACI Life-365 Service Life Prediction Model

콘크리트의 사용수명 예측을 위하여 제정되었으며, 염해에 대하여 표면염화물이온 농도가 염화물이온 확산계수에 따라 철근 위치에서의 임계염화물이온 농도에 도달하는 시간을 산정하는 절차는 표준시방서의 방법과 유사하나 표면염화물이온 농도는 시간과 함께 변화하는 것을 적용하였다. 콘크리트 부재두께의 영향을 감안하고 염화물이온의 확산계수에 따른 피복두께의 영향이 깊이의 제곱에 비례하여 철근 위치에서 임계염화물이온 농도에 도달하는 시간을 산정하고 철근의 부식으로 인해 콘크리트가 허용균열에 이르는 시간까지를 사용수명으로 보고 있다. 염해에 의한 사용수명 산출을 위하여 전산프로그램이 개발되었으며(Life- 365 Service Life Prediction Model) 내구수명 예측에 설치구조물의 외부환경의 온도변화와 플라이애시, 고로슬래그, 실리카 폼의 사용량에 따른 내구수명 증대 효과를 감안하여 산정한다.

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

여기서, $D(t)$ 는 시간에 따른 염화물이온확산계수, D_{ref} 는 기준시간 t_{ref} 에 따른 염화물이온확산계수를 나타내고 t 는 재령, m 은 재령계수를 나타낸다.

(3) FIB Model Code for Durability Design

콘크리트의 안전도를 확보하기 위하여 제정되었으며, 염해에 대하여 표면염화물이온 농도가 염화물 확산계수에 따라 철근 위치에서 임계염화물이온 농도에 도달하는 시간을 산정하는 절차는 표준시방서의 방법과 유사하나 구조물의 기하형상, 시공에 사용된 재료, 구조물이 처할 환경 등의 요인이 반영된 저항변수를 입력하여 철근 위치에서의 임계염화물이온 농도 도달 시간을 산정하며, 철근의 부식으로 인해 콘크리트가 허용균열에 이르는 시간까지를 사용수명으로 보고 있다.

$$A(t) = \left(\frac{t_0}{t}\right)^a \quad (7)$$

여기서, $A(t)$ 는 기준시간 t_0 에 따른 염화물이온확산계수를 나타내며 t 는 재령, a 는 재령계수를 나타낸다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 압축강도 평가

콘크리트의 설계기준강도는 구조물의 특성에 따라 재령 91일에 28, 35, 42 MPa를 확보해야 하며, 콘크리트 압축강도는 ASTM C39 시험방법으로 재령별 압축강도시험을 수행한 결과를 Table 6에 나타낸 바와 같이 재령 91일에 설계기준강도를 만족하는 것으로 나타났으며, 재령 91일 이후의 압축강도는 재령 365일 까지 지속적으로 소폭 증가하는 것으로 나타났다.

Table 6 Result of Compressive Strength

Class	Compressive Strength(MPa)				
	7 Days	28 Days	91 Days	180 Days	365 Days
4,000	16.6	27.7	37.6	40.4	42.1
4,000H	19.8	29.5	35.7	43.0	43.2
5,000	30.9	37.4	46.2	51.1	53.9
5,000H	33.4	41.9	57.4	59.3	60.2
5,000T	28.3	41.5	50.2	56.0	58.5
6,000	28.6	39.7	49.2	53.6	59.6

4.2 촉진시험에 의한 염화물이온 확산계수

촉진시험에 의한 염화물이온확산계수는 재령 28일 및 재령 365일에 수행하였으며 그 결과를 Table 7에 나타내었다. 재령

365일에서는 재령 28일보다 전체적으로 낮아지는 것을 확인하였으며, 설계강도 차이에 따라서 확산계수가 감소하는 것을 확인하였다. 화학혼화재료의 종류에 따라 다른 영향을 4,000, 5,000 Class에서 검토한 결과 고성능감수제를 사용한 콘크리트의 염소이온확산계수가 작아지는 결과가 나타났으며, 이는 고성능 감수제를 사용으로 인한 유동성 증가에 따른 콘크리트 다짐효과 상승 및 조직의 치밀함으로 나타난 결과로 판단된다.

Table 7 Result of NT BUILD 492 Test

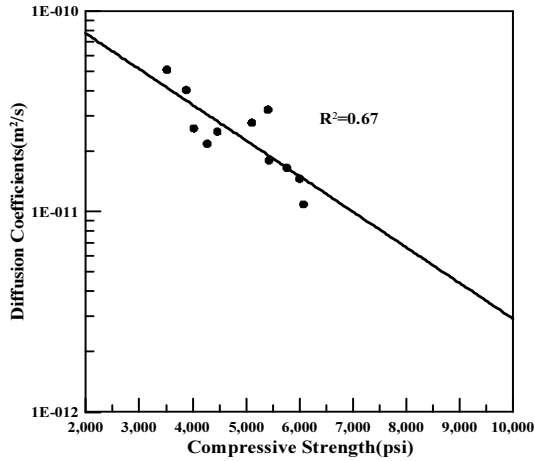
Class	$D_{acc}(10^{-12}, m^2/s)$	
	28 Days	365 Days
4,000	26.0	7.92
4,000H	21.8	7.75
5,000	13.8	3.43
5,000H	10.9	3.10
5,000T	11.6	3.59
6,000	13.5	3.73

4.3 강도특성에 따른 촉진염분 침투 특성

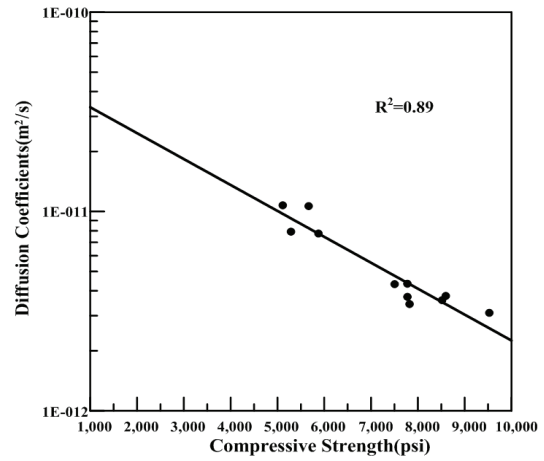
콘크리트 압축강도와 D_{acc} 와의 관계를 분석하기 위해 재령 28일, 365일의 D_{acc} 와 압축강도의 관계를 Fig. 2에 나타내었다. 모든 배합에서 28일 압축강도와 28일 D_{acc} 와의 관계는 결정계수 0.67로 나타났고, 365일 압축강도와 365일 D_{acc} 의 결정계수는 0.89로 재령이 증가할수록 결정계수는 높아지는 것을 보아 플라이애시를 사용한 콘크리트는 초기재령보다 장기재령에서 압축강도와 염화물이온확산계수의 높은 상관관계가 형성되는 것을 알 수 있다.

4.4 장기침지시험에 의한 염화물이온확산계수

장기침지시험에 의한 염화물이온확산계수는(Long-term Immersion Chloride Diffusion Coefficients, 이하 D_{lt})콘크리트 시편에 단면침투를 위하여 한면을 제외한 모든면에 에폭시 코팅을 수행한 시편을 사용하고 염화물이온 3%에 노출시킨 각 콘크리트 배합의 시편을 각 침지재령에 표면으로부터 0.5 mm 간격으로 2 mm 씩 미분말화 하였다. 미분말화된 콘크리트 깊이별 시료를 Automation Titration 장비를 이용하여 AASHTO T260 방법으로 식 (7)과 같이 염화물이온량을 90일, 180일, 1년, 2년, 3년간의 염화물이온에 노출된 재령일에 염화물 프로파일 분석을 수행하였고 D_{lt} 결과를 Table 8에 나타내었다. 이를 분석하면 91일부터 1,095일 까지 4,000 Class에서는 8.30E-12 ~ 3.69E-12 m^2/s 이며, 4,000H Class는 6.42E-12 ~ 2.47E-12 m^2/s , 5,000 Class는 4.17E-12 ~ 1.45E-12 m^2/s , 5,000H Class는 3.89E-12 ~ 1.16E-12 m^2/s , 6,000 Class는 4.22E-12 ~ 0.92E-12 m^2/s 를 나타내고 있다. 또한 4,000,



(a) D_{acc} and Compressive Strength(28 Days)



(b) D_{acc} and Compressive Strength(365 Days)

Fig. 2 D_{acc} and Compressive Strength with Ages

Table 8 Chloride Diffusion Coefficients

Class	Long-term Chloride Diffusion Coefficients(m ² /s)				
	91 Days	180 Days	365 Days	730 Days	1,095 Days
4,000	8.30E-12	4.76E-12	4.79E-12	4.24E-12	3.69E-12
4,000H	6.42E-12	3.81E-12	3.69E-12	2.93E-12	2.47E-12
5,000	4.17E-12	2.46E-12	2.11E-12	1.75E-12	1.45E-12
5,000H	3.89E-12	2.36E-12	1.49E-12	1.32E-12	1.16E-12
5,000T	4.12E-12	2.83E-12	1.92E-12	1.53E-12	1.29E-12
6,000	4.22E-12	1.97E-12	1.49E-12	1.38E-12	0.92E-12

4,000H Class는 W/B 50% 배합에서 D_{it} 는 6.42E-12 ~ 2.47E-12 m²/s이고, W/B 40% 배합인 5,000, 5,000H, 5,000T, 6,000 Class에서는 3.89E-12 ~ 0.92E-12 m²/s,로 염화물이온 확산계수 평가 결과를 나타내고 있다.

$$Cl^- = \frac{3.545(NV)}{W} \quad (8)$$

여기서, Cl^- 은 미분말화된 콘크리트 중의 염분농도(%), N 은 질산은($AgNO_3$) 표준용액의 노르말(N) 농도, V 는 당량 점에서의 질산은 용액 사용량(ml), W 는 미분말 콘크리트 중량(g)를 나타낸다.

4.5 장기노출에 의한 추정 재령계수(m)

D_{it} 는 노출기간이 증가함에 따라 지속적으로 감소하고 선형적인 관계를 나타냄으로 선형회귀분석으로 분석하였고 이를 통해 m을 추정 하였고, Table 9에 KCI, ACI, FIB의 제안된 m과 본 실험결과를 Fig. 3 ~ Fig. 8에 나타내었다.

KCI, ACI의 m은 원전의 콘크리트 배합인 F/A 20%를 치환한 경우 0.36으로 비교적 작은 결과를 나타내고 있는데 이는

다양한 치환율 및 W/B 반영하고 있는 것으로 판단되며, F/A 를 사용한 FIB의 m은 0.6으로 재령계수가 가지는 최대치로 설명하고 있다. 또한 본 연구에서 m은 W/B 50% 기준에서 0.35 ~ 0.39로 평가 되었고, W/B 40% 기준에의 배합에서 0.44에서 최대치인 0.6으로 평가 되었다.

Table 9 Comparison Various Code m and This Study

Code	Time Exponent	
	Equation	m
KCI	0.2 + 0.4(F/A/50 + SG/70)	0.36
ACI		
FIB	-	0.6
This Study	-	W/B 50% :0.35~0.39 W/B 40% :0.44~0.62

Note) Using F/A 20%

4.6 염분침투 특성에 의한 내구수명예측

원자력 발전소 콘크리트 구조물의 수명예측을 위하여 원전의 콘크리트 설계치와 평가된 D_{it} , m과 KCI와 ACI에서 제안된 염화물이온확산계수는 식 (8)을 참조 하여 물-시멘트비 40%를 기준으로 하여 환산하면 7.94×10^{-12} m²/s이며, 플라이애시 20% 기준의 m은 0.36 이다. 이를 사용하여 콘크리트

중의 염화물이온 확산에 관한 기초방정식인 Fick's 2nd law 식 (9)를 사용한 수명예측 결과를 Table 10에 나타내었다.

$$D_R = 10^{-12.06+2.4(W/B)} \quad (9)$$

$$C_d - C_i = (C_s - C_i) \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_d t}}\right)\right) \quad (10)$$

여기서, W/B 는 물-결합재비, D_R 은 물-결합재비에 따른 염화물이온확산계수, C_d 는 위치 x (cm), 시간 t (년(y), 또는 sec)에서 염화물이온농도의 설계값(kg/m³), C_i 는 초기염화물이온농도, C_s 는 표면염화물이온농도, erf 는 오차함수, $\operatorname{erf}(s) = \frac{2}{\pi^{1/2}} \int_0^s e^{-\lambda^2} d\lambda$, D_d 는 염화물이온의 유효확산계수(m²/s)를 나타낸다.

Table 10 Estimation Service Life NPPs Structures

Structure	Cover (mm)	Critical Chloride Contents	Service Life (m*)	Service Life (m**)
Base	50	Binder × 0.4%	15	>60
ESW	75		10	>60
Tunnel	75		11	>60
RCB	50		28	>60

Note) m* : KCI, ACI Rcommend, m** : This Study

KCI 및 ACI에서 제안된 D_R 와 m 값을 사용하여 안전관련 콘크리트 구조물의 내구수명을 예측한 결과 KCI의 경우 Base에서 15년, ESW에서 10년, Tunnel의 경우 11년, RCB에서 28년의 내구수명 예측결과를 나타내었다. 또한 본 연구에서 도출된 D_{it} 과 m 값을 사용하여 내구수명을 예측한 결과 원전의 모든 안전관련 콘크리트 구조물은 설계수명 60년 이상을 만족하는 결과를 나타내었다. 이러한 결과는 염화물이온확산계수와 재령계수의 사용은 제안값 보다 실제 실험을 통하여 평가하는 것이 실제적인 구조물의 사용수명 예측에 도움이 될 것으로 판단된다.

5. 결 론

원전의 안전관련 콘크리트 구조물의 수명예측을 위한 재령계수에 대한 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 원전 콘크리트의 압축강도시험을 수행한 결과를 Table 6에 나타난 바와 같이 재령 91일에 설계기준강도를 만족

하는 것으로 나타났으며, 재령 91일 이후의 압축강도는 재령 365일 까지 지속적으로 소폭 증가하는 것으로 나타났다.

- 2) 촉진염화물이온확산계수는 모든 Class의 배합에서 3.73 ~ 26.0 × 10⁻¹² m²/s으로 평가되었고, 플라이애시 20% 사용한 원전배합은 28일 재령 기준의 D_{acc} 와 365일 재령 기준의 D_{acc} 는 확산계수의 감소는 매우 큰 폭으로 떨어지는 것을 확인할 수 있었다.
- 3) D_{acc} 와 압축강도의 재령 28일의 관계는 결정계수 0.67이며, 재령 365일 관계는 0.89로 장기적인 D_{acc} 의 감소와 압축강도의 증가로 결정계수가 높아지는 것을 알 수 있다.
- 4) m 의 실측값을 도출하기 위하여 3년간의 장기침지시험을 통하여 D_{it} 를 평가하였고, 이를 통하여 m 은 4,000 Class 기준에서 0.35 ~ 0.39로 평가되었고, 5,000 및 6,000 Class 기준에의 배합에서 0.44에서 최대치인 0.6으로 평가되어 KCI 및 ACI의 제안값인 0.36보다 높게 도출되었다.
- 5) KCI 및 ACI에서 제안된 염화물이온확산계수와 m 을 이용하여 원전의 안전관련 콘크리트 구조물의 수명예측을 수행한 결과 Base에서 15년, ESW에서 10년, Tunnel의 경우 11년, RCB에서 28년의 내구수명 예측결과를 나타내었다. 또한 본 연구에서 도출된 D_{it} 과 실측된 m 값을 사용하여 내구수명을 예측한 결과 원전의 모든 안전관련 콘크리트 구조물은 설계수명 60년 이상을 만족하는 결과를 나타내었다.

감사의 글

본 논문은 2015년 한국수력원자력(주)에서 지원을 받아 수행한 신한울 1,2호기 콘크리트 내구성 평가를 기반으로 수행된 연구입니다.

References

1. M. Shakouri, D. Trejo (2017), A time-variant model of surface chloride build-up for improved service life predictions, *Cem. Concr. Compos.* 84, 99-110.
2. M. Choinska, A. Khelidj, G. Chatzigeorgiou, G. Pijaudier-Cabot (2007), Effects and interactions of temperature and stress-level related damage on permeability of concrete, *Cem. Concr. Res.* 37 (1) 79-88.
3. J. Wang, P.A.M. Basheer, S.V. Nanukkuttan, et al. (2016), Influence of service loading and the resulting micro-cracks on chloride

- resistance of concrete, *Constr. Build. Mater.* 108 56-66.
4. Korea Hydro & Nuclear Power Corporation (2015), Evaluation Shinhanul 1,2 Nuclear Power Plant Concrete Durability Report, 02.
 5. M. Collepardi, A. Marcialis, R. Turriziani (1972), Penetration of chloride ions into cement pastes and concretes, *J. Am. Ceram. Soc.* 55 (10) 534-535.
 6. K. Takewaka, S. Mastumoto (1988), Quality and cover thickness of concrete based on the estimation of chloride penetration in marine environments, *ACI Sp. Pub.* 109 (17) 381-400.
 7. P.S. Mangat, B.T. Molloy (1994), Prediction of long term chloride concentration in concrete, *Mater. Struct.* 27 (6) 338-346.
 8. M. Maage, S. Helland, E. Poulsen, et al. (1996), Service life prediction of existing concrete structures exposed to marine environment, *ACI Mater. J.* 93 602-608.
 9. Ministry of Land Infrastructure and Transport (MLIT) (2009), Concrete Standard Specification Appendix II Evaluation Concrete Durability, 637-672
 10. ACI Committee 365 (2000), Service Life Prediction State of the Art Report
 11. CEB-FIP, (2006) Model Code for Service Life Design, *The International Federation for Structural Concrete (fib), Task Group 5.6*, 16-33.
 12. Kim, H. J.(2012). Nuclear Safety and Regulation, 573.
 13. Korea Electric Power Inderstry Code (2010), SN Nuclear Safety Related Structures, SMB Concrete Containments, 10-12.
 14. ASTM C 150 (2018), Standard Specification for Portland Cement
 15. ASTM C 618 (2019), Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete
 16. ASTM C 33 (2018), Standard Specification for Concrete Aggregates
 17. ASTM C 494 (2017), Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete

Received : 04/04/2019

Revised : 04/13/2019

Accepted : 04/15/2019

요 지 : 원자력발전소 콘크리트 구조물은 해안가에 접해 있으며, 해수를 취수하여 냉각수로 사용하기 때문에 염해에 의한 내구성은 매우 중요하다. 이를 위해 3년간의 염해 장기침지시험을 실시하여 염화물이온확산계수의 변화 및 재령계수(m)을 평가한 결과 4,000 Class인 구조물 기초의 m은 0.35~0.39로 KCI나 ACI 제안값과 유사한 결과를 나타내었고 5,000 Class인 필수 냉각수 구조물 및 터널은 0.44~0.53, 6,000 Class인 원자로 격납건물은 0.62로 FIB 제안값과 유사하였다. 실측된 재령계수로 내구수명을 예측한 결과 원전의 모든 안전관련 콘크리트 구조물은 설계수명 60년 이상을 만족하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 시간의존계수, 염화물이온확산계수, 재령계수, 수명예측
