

원전 취배수 구조물 콘크리트 배합의 염소이온 확산특성 평가를 위한 실험적 연구

이호재^{1*}, 서은아²

Experimental Study for Evaluation of Chloride Ion Diffusion Characteristics of Concrete Mix for Nuclear Power Plant Water Distribution Structures

Ho-Jae Lee^{1*}, Eun-A Seo²

Abstract: In this study, the diffusion characteristics were evaluated using the concrete mix design of nuclear safety-related structures. Among the concrete structures related to nuclear power safety, we selected the composition of intake and drainage structures that are immersed in seawater or located on the tidal platform and evaluated the chloride ion permeation resistance by compressive strength and electrical conductivity and the diffusion characteristics by immersion in salt water. analyzed. Compressive strength was measured on the 1st, 7th, 14th, 28th, 56th, and 91st days until the 91st day, which is the design standard strength of the nuclear power plant concrete structure, and chloride ion permeation resistance was evaluated on the 28th and 91st. After immersing the 28-day concrete specimens in salt water for 28 days, the diffusion coefficient was derived by collecting samples at different depths and analyzing the amount of chloride. As a result, it was found that after 28 days, the long-term strength enhancement effect of the nuclear power plant concrete mix with 20% fly ash replacement was higher than that of concrete using 100% ordinary Portland cement. It was also found that the nuclear power plant concrete mix has higher chloride ion permeation resistance, lower diffusion coefficient, and higher resistance to salt damage than the concrete mix using 100% ordinary Portland cement.

Keywords: Nuclear power plant, Concrete, Durability, Chloride attack, Diffusion coefficient, Chloride ion penetration

1. 서 론

해양 및 해안 인접 환경에 노출되는 철근콘크리트 구조물의 철근부식은 해수에 포함된 염소 이온의 침투가 주요 원인 중 하나로 알려져 있다(Sharouri et al., 2017; Choinska et al., 2007; Wang et al., 2016). 비말대, 간만대에서의 염소이온은 건조된 콘크리트의 표면에 흡착되어 콘크리트 내부로 수분의 이동과 함께 흡수된다. 반면, 콘크리트가 항상 해수와 맞닿아 있는 침지대에서는 콘크리트 내부와 외부가 모두 수분으로 가득차 있으므로 해수 중 염분의 농도 차이에 의한 확산이 발생하여 콘크리트 내부로 염소이온이 침투하게 된다.

콘크리트 내부로 침투한 염소이온이 철근의 부식을 발생시킬 수 있는 일정 수준의 농도를 임계염화물량이라하며 철근 주변부의 염화물량이 임계염화물량까지 도달하는 시간을 일반적으로 구조물 또는 부재의 사용수명으로 산정한다. 임계

염화물량은 지역별 국가별 특성을 반영하여 산정하므로 ACI와 EC2 KCI 등 다루는 기준에 따라 차이가 있다. 2009년에 개정된 콘크리트 표준시방서 부록 편에는 콘크리트 구조물의 내구성편이 제정되어 콘크리트 내구성 저하원인에 따른 내구 수명을 평가할 수 있는 방법을 규정하였으며, 미국의 ACI와 유럽의 CEB-FIB에서도 모델식을 제안하여 내구수명을 산정하고 있다(MLIT, 2009; ACI 365.1R, 2000; CEB-FIP, 2006).

원자력발전소는 해안가에 건설되어 염해환경에 노출되는 대표적인 시설이다. 일반적으로 원자력발전소는 원자로의 냉각수를 안정적으로 공급받기 위해 해안가 지역에 건설되는데 염해로 인한 철근부식 위험성이 상존하는 특징이 있다.

원전콘크리트 구조물의 내구성 영향에 대한 문제점에 대해서는 국내에서도 1990년대 초반부터 연구를 수행하고 있다. 1993년 원자력안전기술원에서는 연구를 통해 원전 콘크리트 구조물의 열화와 관련된 규제방안을 마련하였다. 또한 한국 전력공사 전력연구원에서는 1996년 원전 안전성 관련구조물의 내구성 점검 절차를 마련했다. (KINS 1993, KICT 1996) 국내 최초의 상업용 원자력 발전소인 고리 1호기가 1978년 상업 운전을 시작했으며 그 이후 건설되고 운영 중인 원자력 발전소들도 운전기간이 40년 이상을 경과하고 있어 원자력 발전소 콘크리트 구조물의 내구성에 대한 연구가 진행되고 있다.

¹정회원, 한국건설기술연구원 구조연구본부 수석연구원

²정회원, 한국건설기술연구원 구조연구본부 전임연구원

*Corresponding author: h.lee@kict.re.kr

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Daehwa-Dong, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 10223, South Korea

•본 논문에 대한 토의를 2022년 11월 30일까지 학회로 보내주시면 2022년 12월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

이 연구에서는 현재 원자력 발전소에서 사용되고 있는 콘크리트 구조물의 배합설계를 이용하여 압축강도, 축진염화물 침투실험, 염수침지 실험을 통해 확산계수를 산출하는 연구를 수행하여 결과를 상호 비교하였다.

2. 실험재료 및 실험방법

2.1 적용배합

이 연구에 사용한 배합은 기존 원전콘크리트 구조물의 내구수명을 예측하기 위한 연구(Lee et al., 2019)의 배합표를 참고하여 해수와 직접적으로 접하는 콘크리트 구조물인 ESW (Essencial service water), Tunnel(Seawater intake and outfall tunnel) 배합을 사용하였다(Table 1). ESW와 Tunnel에 사용된 원전 콘크리트 배합은 결합재의 20%가 FA(fly ash)로 치환된 배합이므로 FA 사용에 따른 영향을 비교 검토하기 위해 결합재로 OPC(ordinary Portland cemen)를 100% 사용한 Control 배합을 설정하여 ESW, Tunnel 배합과 비교하였다.

2.2 사용재료

결합재는 보통포틀랜드시멘트(OPC, Ordinary Portland

Table 1 Mix proportion

Mix	W/B	Unit weight (kg/m ³)					
		Water	OPC	FA	Sand	Gravel	
						20 mm	25 mm
Control	0.4	158	400	0	718	-	1006
ESW-N	0.4	157	316	79	710	-	995
ESW-H	0.4	145	287	72	802	-	982
TUN-N	0.4	169	339	85	668	979	-

Note
 ESW: Essential Service Water
 TUN: Tunnel
 N: Normal concrete
 H: High volume fraction of aggregate

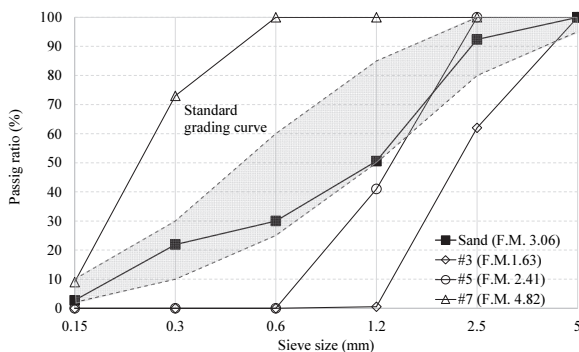


Fig. 1 Sieve test result of fine aggregate

Cement)와 플라이애시(FA, Fly ash)는 2종을 사용하였다 (Table 2). 굵은골재는 최대골재치수(G_{max}) 20, 25 mm 골재를 사용했으며, 잔골재는 규사 3, 5, 7호사를 ASTM C 136에 따라 체가름시험을 통해 입도를 조정하여 사용하였다(Fig. 1).

2.3 시멘트 페이스트 응결 측정

이 연구에서 적용하는 4개의 배합은 모두 물-결합재비 0.4의 비율을 적용하고 있으며 Control 배합은 OPC를 100% 사용하고 원전 콘크리트 배합은 OPC 80%에 FA를 20% 혼합하여 사용한다. 결합재의 응결특성을 평가하고자 KS L ISO 9597 및 ASTM C 191을 준용하여 OPC 100%, OPC 80%+FA 20%의 두 종류의 결합재 종류를 사용하고 w/b를 0.4로 설정하여 vicat test 방법을 통해 배합의 응결특성에 대한 기초 평가를 실시하였다. 비카침 시험을 위해 자동측정이 가능한 이탈리아 CONTROL Group의 Vicamatic 장비를 사용하였다.

2.4 압축강도 측정

압축강도 시험체는 ASTM C 39 기준에 따라 직경 100 mm, 높이 200 mm의 원주형 시험체를 제작하였으며 24시간 기중에서 양생 후 탈형하여 수중에서 양생하였다. 원전 콘크리트 구조물의 설계 기준강도는 재령 91일 압축강도를 기준으로 한다. 이에 이 연구에서는 시험체 제작 후 재령 1, 7, 14, 28, 56, 91일에 각 3개의 시험체를 이용하여 ASTM C 39-20에 따라 압축강도를 0.3 MPa/sec의 하중 재하 속도로 측정하고 그 평균값을 제시하였다.

2.5 RCPT를 통한 통과전하량 측정

RCPT 시험을 위해 직경 100 mm 높이 50 mm의 원주형 시험체를 제작하여 수중에서 양생시켰다. RCPT 시험은 콘크리

Table 2 Chemical composition of binder

Binder	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Ig.loss
OPC	62.41	21.46	5.17	3.24	2.70	3.0	0.79
FA	2.70	60.0	25.76	5.04	1.40	0.49	3.0

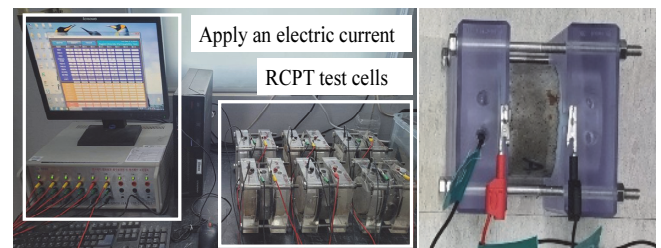


Fig. 2 RCPT preparation

트에 투과되는 전하량을 측정하여 염소이온 투과성을 유추하는 시험방법으로 ASTM C 1202와 KS F 2711에서 제시하고 있으며 이 연구에서도 두 기준에 준하여 실험을 진행하였다. 측정 20시간 전 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 를 포화시킨 수용액에 침지시킨 후 측정에 맞춰 시험체를 RCPT 셀에 체결하였다. 3% NaCl 수용액을 채운 셀에 음극을 연결하고, 0.3M NaOH 수용액을 채운 셀에 양극을 연결하여 Fig. 2와 같이 60 V의 전압으로 6시간 동안 전류를 가하였다.

재령 28일과 재령 91일에 배합 당 각 3개의 시험체를 이용하여 동일한 조건으로 통과전하량을 측정하였으며, 이 연구에서는 그 평균값을 이용하여 결과를 제시하였다.

2.6 염화물 침투 시험

염수 침지시험체는 각 변의 길이가 100 mm인 정육면체 시험체를 제작하였다. 콘크리트 염수 침지 실험은 재령 28일 양생된 시험체를 기중에서 표면의 물기를 닦아내고 Fig. 3과 같이 5개 면에 에폭시를 도포하여 방수처리를 함으로써 1개 면으로만 염수가 침투될 수 있도록 시험체를 준비하였다. 에폭시 도포 후 시험체의 표면상태가 건조되어 염수가 흡수되는 효과가 발생하지 않도록 시험체가 수중에서 충분히 포화될 수 있도록 조치한 뒤 염수에 침지시켰다. 염수는 NaCl을 이용하여 해수 조건과 동일한 염분농도 3.4% 갖도록 제조하였다.

염수에 침지되는 시험체 노출면은 염수 속에 잔존하는 침전물 등의 영향을 방지하기 위해서 측면을 바라보도록 설치하였으며 모든 시험체를 동일한 방식으로 노출시켰다. 28일간 염수에 침지한 시험체는 염수에서 꺼내어 1일간 건조시킨 후 표면으로부터 깊이별로 분말을 채취하여 염화물을 측정하였다. 바람이 없고 직사광선을 피할 수 있는 상온의 챔버에서 건조하였다. 염화물량은 표면으로부터 0.5mm 까지 그라인딩을 통해 표면염화물을 확보했으며, 그 이후로는 매 10 mm 깊이로 최대 50 mm 까지 직경 10 mm 천공드릴을 이용하여 깊이별로 분말을 채취했다. 채취한 분말은 전염화물량(산가용성 염화물량) 측정을 위해 질산을 이용하여 용해하였으며, 0.01 N 농도의 AgNO_3 수용액을 이용하여 염화물을 적정하였다.

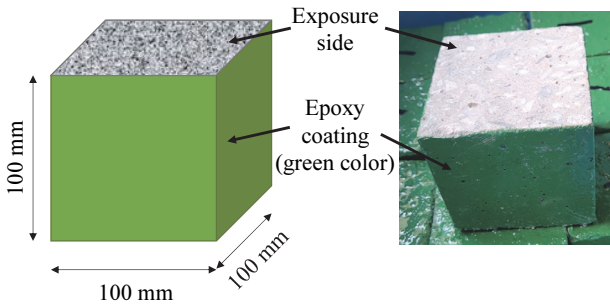


Fig. 3 Specimen preparation for exposure test

3. 실험결과 및 분석

3.1 시멘트 페이스트 응결 시험

Fig. 4에는 비카침 시험방법을 이용하여 측정한 시멘트 응결 시험결과를 나타냈다. x축은 배합 이후부터 경과시간, y축은 비카침이 관입한 깊이를 나타낸다. 초결은 관입깊이 25 mm에 도달하는 시간을 초결시간으로 설정하였다. OPC 100%를 사용한 배합의 경우 초결시간이 330 분 OPC 80% + FA 20% 사용한 배합은 349 분으로 나타나 응결시간은 유사하게 나타나는 것을 확인했다. 또한 종결시간도 약 OPC 100% 배합은 560분 OPC 80% + FA 20% 배합은 575분으로 나타나 종결시간도 거의 유사하게 나타났다.

3.2 압축강도

Fig. 5에는 재령에 따른 압축강도를 표현했다. Fig. 5(a)에서 볼 수 있듯이 Control 배합은 재령 7일차에 압축강도가 60.1 MPa로 나타나 설계기준강도를 이미 상회하는 강도가 발견됐다 그 뒤로 골재 혼입량이 상대적으로 높은 ESW-H 배합이 재령 7일에 55.9 MPa, 재령 14일에 압축강도 61.6 MPa로 나타나 FA를 20% 치환했지만 강도증진이 빠르게 이뤄진 것으로 나타났다. ESW-N 배합과 TUN-N 배합도 재령 28일차에 압축강도가 각각 66.5 MPa, 59.7 MPa로 나타나 재령 28일에는 거의 대부분의 배합이 압축강도 60 MPa 수준에 도달했거나 상회하는 강도가 발견됐다. 설계기준인 재령 91일에 Control 81.7 MPa, ESW-N 87.6 MPa, ESW-H 89.3 MPa, TUN-N 69.5 MPa로 발견되어 재령 91일 압축강도는 설계기준강도인 5000 psi (34.5 MPa)를 모든 배합에서 2배 이상 확보됨을 확인하였다. 기존연구에서 측정한 압축강도보다 30 MPa 이상 높게 발견됐는데 이는 재료상태와 제작방식에 기인한 것으로 판단된다.

TUN-N 배합은 재령에 따른 압축강도가 다른 세 배합에 비해 낮게 나타났는데 배합비가 유사한 ESW-N 배합과 비교했

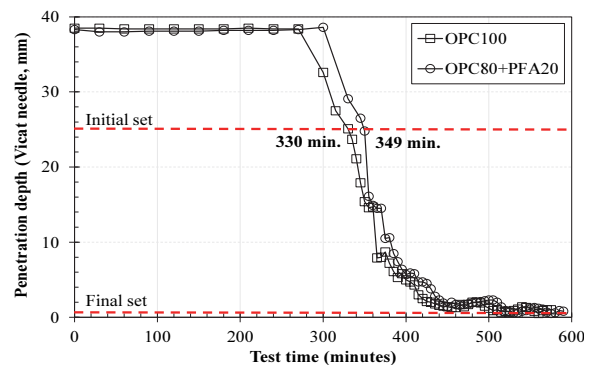


Fig. 4 Vicat test results

Table 3 Predicted models of compressive strength

Code	Model Equation
ACI	$f_c(t) = \frac{t}{a+bt} f_c(28)$
CEB-FIP	$f_c(t) = \exp(s(1 - \sqrt{28 - (t/t_1)})) f_c(28)$
KCI	$f_c(t) = \beta_{cc}(t) f_c(28)$ $\beta_{cc} = \exp\left[\beta_{sc}\left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)\right]$

을때 w/b와 결합재 치환율은 동일하지만 단위결합재량이 약 30 kg/m³ 많고, 굵은골재 최대치수가 20 mm이며, 잔골재율이 1% 낮다. 이에 다른 인자보다 굵은골재 최대치수가 다른 배합과 비교하여 압축강도 저하에 영향을 미친 것으로 판단된다. 굵은골재 최대치수가 압축강도에 미치는 영향과 관련하여 기존연구(김덕현 외, 2004)에 의하면 굵은골재의 크기가 커질수록 강도저하가 나타난다. 하지만 다른 연구(안지환 외, 2011)에 의하면 골재 크기가 달라질 경우 동일한 암반의 골재를 사용하더라도 골재 산지의 특성에 따라 강도특성이 달라질 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 향후 추가연구에서는 사용재

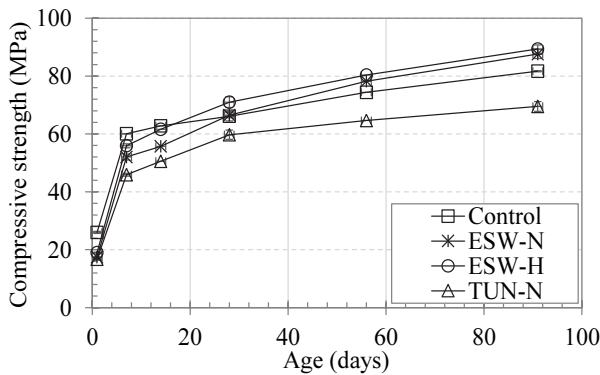
Table 4 Compressive strength ratio compare at 28 days result

Age	Control	ESW-N	ESW-H	TUN-N	ACI	CEB-FIP	KCI
1	0.39	0.26	0.27	0.28	0.21	0.34	0.22
7	0.91	0.78	0.79	0.77	0.70	0.78	0.70
14	0.95	0.84	0.87	0.85	0.88	0.90	0.87
28	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
56	1.12	1.18	1.13	1.08	1.09	1.08	1.11
91	1.23	1.32	1.26	1.16	1.12	1.12	1.17

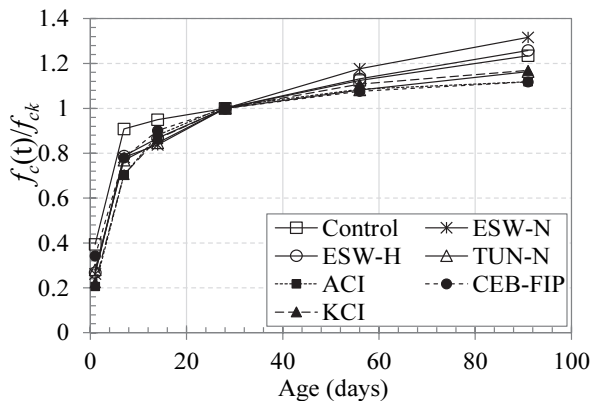
료 중 골재특성에 대한 기초실험 데이터가 검토되어야 될 것으로 사료된다.

Fig. 5(b)에는 28일 강도 대비 재령별 강도 비와 Table 3에 언급한 model code (ACI, CEB-FIP, KCI)에서 제시하는 재령에 따른 압축강도 예측값을 함께 나타냈다.

모델코드에서 제시하는 재령계수는 보통포틀랜드시멘트, 습윤양생 조건을 기준으로 설정하였다. Table 4에는 재령 28일 압축강도를 기준으로 각 배합별 강도증진율을 나타냈다. Control 배합은 재령 14일 약 95% 수준의 높은 강도증진율을 보였다. 재령 14일에 FA를 20% 치환한 원전콘크리트 배합의 강도증진율이 80% 수준까지 증진되어 Control 배합과 비교하여 상대적으로 낮은 강도증진율이 나타났다. Control 배합은 모든 재령에서 모델코드로 예측한 강도증진율보다 높은 강도가 발현된 것으로 나타났다. 반면, FA를 20% 치환한 콘크리트의 압축강도 증진율은 재령 28일까지 모델코드에서 제시하는 압축강도 발현율과 거의 유사하게 증진되었다. 또한 재령 28일 이후 91일까지는 모델과 비교하여 상대적으로 높은 압축강도가 발현되어 FA 20% 치환한 원전배합이 재령 28일 이후 장기강도 증진에 효과적인 것으로 나타났다.



(a) Compressive strength



(b) Compressive strength ratio compare at 28 days result

Fig. 5 Compressive strength results

3.3 RCPT 측정결과

ASTM C 1202와 KS F 2711에서 총 통과전하량에 따른 평가기준을 제시하고 있으며 이 연구에서는 해당 기준을 참고

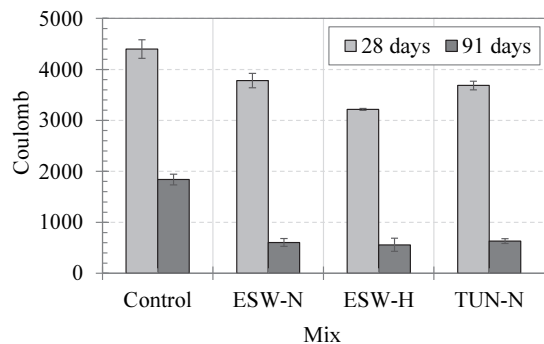


Fig. 6 RCPT result

하여 평가하였다. 기준에서는 전하량 4000 초과 시 높음, 2000 초과 4000 이하 구간에서 보통, 1000 초과 2000 이하 구간에서 낮음, 100 초과 1000 이하에서 매우 낮음, 100 이하는 무시할 수 있는 수준으로 구분하고 있다.

Fig. 6에서는 재령 28일과 91일 RCPT 측정 결과의 평균값을 막대그래프로 표현했다. 재령 28일 Control 배합은 약 4500 coulomb 수준으로 높음으로 나타났으나 다른 3개의 원전 콘크리트 배합에서는 3000 이상 4000 coulomb 미만으로 나타나 보통 수준으로 나타났다. 재령 91일 측정 결과 Control 배합은 약 1900 coulomb 수준으로 나타났으나, 다른 3 종류의 원전콘크리트 배합에서는 통과전하량이 1000 coulomb 미만으로 나타나 매우 낮음 수준으로 나타났으므로 RCPT 결과를 통해 원전 콘크리트 배합이 설계기준강도 재령인 91일에 충분한 염해 저항성을 갖는 것으로 나타났다.

3.4 침지실험을 통한 확산특성 평가

Fig. 7에는 배합별로 3개의 시험체를 이용해서 표면으로부터 깊이별로 측정된 염화물량과 그 평균값을 나타냈다. 표면으로부터 매 10 mm 깊이마다 채취한 분말을 이용해서 측정된 결과는 각 구간의 평균값으로 가정해 결과 그래프에는 각 구간의 중간 값인 5 mm 구간마다 측정결과를 표기하였다. 측정 결과는 콘크리트 중량대비 염화물량의 비율로 표기하였다. 측정된 염화물량을 이용하여 Fick's 2nd law (Eq. 1) 를 이용하여 산출한 확산계수를 이용한 깊이별 염화물량 예측 값은 Fig. 7에 시험체별로 점선 및 실선으로 표기하였다.

$$C_x - C_i = (C_s - C_i) \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right) \quad (1)$$

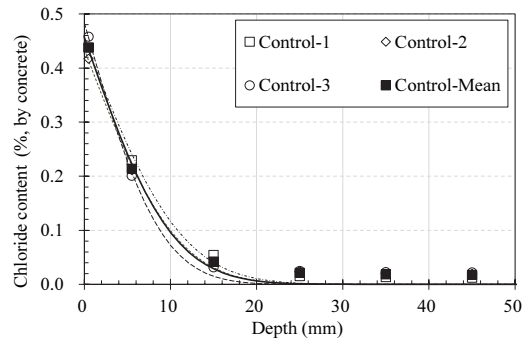
$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt \quad (2)$$

여기서, C_x 는 깊이 x 에서의 염화물 농도(kg/m^3), C_i 는 초기 염화물 농도(kg/m^3), C_s 는 표면염화물농도(kg/m^3), x 는 표면으로부터의 깊이(m), D 는 확산계수 (m^2/s), t 는 염화물이 침지된 경과시간 (s) 이며, erf 는 오차함수로 Eq. 2에 표기했다.

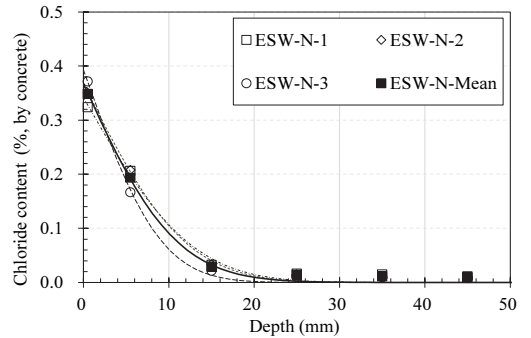
동일한 조건에서 제작한 모든 시험체는 동일한 염수환경에 침지시켰으므로 동일 배합에서 각 시험체간 편차는 크게 발생하지 않았다. Control 배합의 경우 표면에서 콘크리트 중량 대비 약 0.44%의 염분량이 측정되었으며, 5 mm 에서는 약 0.23%, 15 mm 에서는 0.05%로 측정됐다. 20 mm 이상의 깊이에서는 거의 염분량 침투가 없었다고 판단할 수 있을 정도로 염분량이 미미하게 측정됐다.

ESW-N 배합의 경우 표면에서의 염분량은 0.35%, 5 mm 깊이에서는 0.19%, 15 mm 에서는 0.03%로 측정됐다. ESW-H 배합

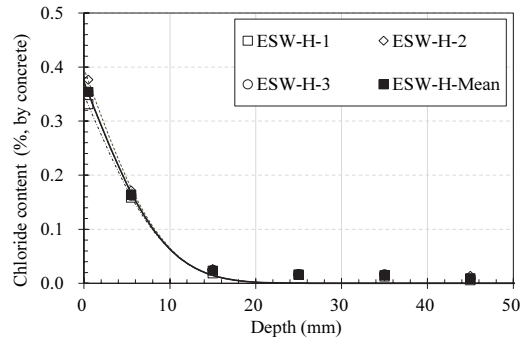
은 표면에서 0.35%, 5 mm 깊이에서 0.16%, 15 mm 깊이에서 0.02% 수준으로 측정됐다. 이에 ESW 배합의 깊이별 염분량은 ESW-N 배합과 ESW-H 배합이 유사한 경향을 보였으나



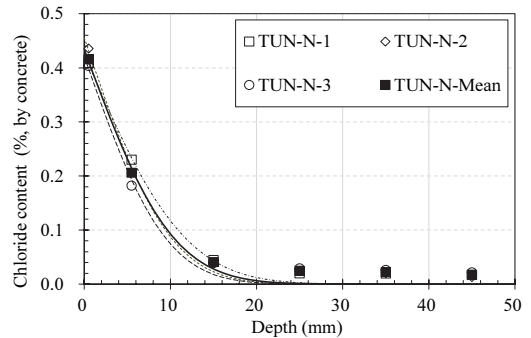
(a) Control



(b) ESW-N



(c) ESW-H



(d) TUN-N

Fig. 7 Chloride contents penetration depth

ESW-H 배합이 상대적으로 염분침투량이 적은 것으로 나타났다.

TUN-N 배합의 경우 표면 염분량이 0.42%, 5 mm 깊이에서 0.21%, 15 mm 깊이에서 0.04%로 나타나 각 구간에서 염분량은 Control 배합 다음으로 높게 측정됐다. TUN 배합 또한 ESW-N, ESW-H 배합과 비교해서는 콘크리트 내부로 침투된 염화물량은 높으나 Control 배합과 비교해 상대적으로 염분 침투량이 낮게 측정됐다. 앞서 ESW-N, ESW-H 배합과 TUN 배합은 모두 FA를 20% 치환하여 상대적으로 높은 염화물 침투 저항성이 확보된 것으로 판단된다.

앞서 Eq. 1로 산출한 확산계수는 Fig. 8에 표기하였다. Control 배합의 확산계수는 $1.62 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 네 배합 중 가장 높게 나타났다. 원전용 콘크리트 배합인 세 배합의 확산계수는 ESW-N 배합이 $1.35 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$, ESW-H 배합이 $1.10 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$, TUN-N 배합이 $1.36 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 나타나 OPC 100%를 사용한 Control 배합과 비교하여 상대적으로 낮게 나타난 것을 확인했다. 원전 콘크리트 배합의 확산계수가 더 낮게 측정된 원인은 기존연구(박정준 외 2002)에서 밝혀진 바와 같이 FA의 포졸란반응으로 인해 콘크리트 내부의 조직이 밀실해져 공극크기와 연결성을 감소시키기 때문으로 해석된다.

Fig. 8의 확산계수는 Fig. 6의 RCPT 결과와 유사한 경향을 보여 염화물 저항성능과 확산계수의 결과가 신뢰성이 있음을 간접적으로 확인할 수 있다. 기존연구(이승훈, 권성준 2012)에서 결합재 종류, 치환율 및 물-결합재비에 따른 재령에 따른 염소이온 확산계수를 평가했다. 기존연구결과 OPC를 100% 사용하고 w/b를 42%를 사용한 배합의 28일 확산계수가 $1.5 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 나타나 본 연구의 Control 배합과 거의 유사하게 나타났음을 확인할 수 있었다. 또한 FA20%를 치환하고 w/b를 37% 사용한 배합의 28일 확산계수가 $1.3 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 본 연구의 염소이온 확산계수 결과와 유사하게 나타났다.

Fig. 8에서 볼 수 있듯이 ESW-H 배합의 경우 28일 압축강도가 71 MPa로 다른 세 배합에 비해 Control, ESW-N 배합과 비교해 약 5 MPa가 높았으며 TUN-N 배합과 비교해 약 10 MPa 높게 나타났으며 확산계수도 $1.10 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ 수준으로

가장 낮게 나타났다. TUN-N 배합은 압축강도는 상대적으로 낮았지만 확산계수는 Control 배합과 비교해 낮게 나타났는데 이는 결합재로 FA를 20% 치환하여 공극구조가 밀실해졌으며 굵은골재 최대치수가 20 mm로 공극량 및 공극구조가 개선됐기 때문으로 판단된다.

4. 결론

이 연구는 해안가에 위치한 원전 콘크리트 구조물의 환경적 특수성으로 인해 해수의 염분이 직접 접촉하는 원전 콘크리트 구조물의 확산특성을 분석하였다. 결합재의 응결특성을 분석하기 위해 비카시험을 통한 응결시간을 측정했으며 재령에 따른 압축강도, 촉진염화물침투성능, 염수침지실험을 통한 확산계수 평가를 실험적으로 수행했다. 이 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) Control 배합의 결합재 응결특성 모사를 위해 결합재로 OPC 100%, 원전콘크리트 모사를 위해 OPC 80% + FA 20%를 사용한 배합을 비교했을 때 OPC 100%를 사용한 배합의 초결과 종결이 약 20분정도 빨랐으나 유사한 것으로 평가할 수 있을 정도의 시간으로 나타났다.
- 2) 압축강도는 모든 배합에서 91일 설계기준강도인 5000 psi(34.5 MPa)를 두 배 상회하는 수준으로 나타났으며, 원전 콘크리트 배합은 Control 배합과 비교하여 28일 이후 강도증진율이 높은 것으로 나타났는데 이는 포졸란 반응에 의한 장기강도 증진효과가 발현됐기 때문으로 예측된다. 전반적인 압축강도가 높게 나타난 것은 사용재료의 특성과 시험실 조건에서 제작했기 때문으로 예상된다.
- 3) RCPT 측정결과 원전콘크리트 배합 3종이 Control 배합과 비교해 통과전하량이 낮게 측정됐다. 특히 재령 91일의 경우 Control 배합은 1840 coulomb으로 측정된 반면 다른 세 배합은 558-632 coulomb 범위를 나타내어 통과전하량이 상대적으로 낮은 것으로 평가됐다.
- 4) 염수침지 실험을 통해 깊이별 염화물 침투량을 분석하여 염소이온 확산계수를 측정된 결과, 확산계수는 Control, TUN-N, ESW-N, ESW-H의 순서로 낮게 측정됐으며 RCPT 측정결과와 유사한 경향을 나타냈다. 측정결과 원전콘크리트 배합은 FA의 포졸란반응으로 인한 공극크기 감소 및 공극구조가 치밀해졌기 때문으로 판단된다.

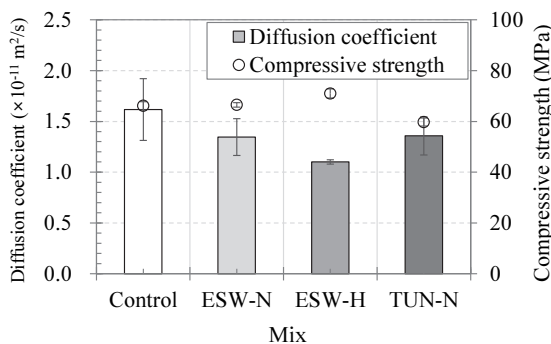


Fig. 8 Diffusion coefficient result

감사의 글

본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구사업의 연구결과입니다(No. 2203025).

References

1. ACI Committee 365 (2000), Service Life Prediction State of the Art Report
2. ACI Committee 209 (1997), Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures, American Concrete Institute.
3. An, J.-H., Jeon, S.-I., Nam, J.-H., and Kwon, S.-A. (2011), An Experimental Study on Relation between compressive strength and Shear Wave velocity for characteristics of coarse aggregate size and type of cement, *J. Korean Soc. Road Engineers*, 13(1) 169-175.
4. ASTM C 39/C 39M (2021), Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
5. ASTM C 136 (2006), Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates
6. ASTM C 1202 (2019), Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.
7. ASTM C 191 (2021), Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle.
8. Choinska, M., Khelidj, A., Chatzigeorgiou, G., and Pijaudier-Cabot, G. (2007), Effects and interactions of temperature and stress-level related damage on permeability of concrete, *Cem. Concr. Res.*, 37(1), 79-88.
9. CEB-FIP (1999), Structural Concrete : Textbook on Behaviour, Design and Performance, International Federation for Structural Concrete (Fib), 224.
10. CEB-FIP, (2006), Model Code for Service Life Design, The International Federation for Structural Concrete (fib), Task Group 5.6, 16-33.
11. Korea Institute of Nuclear Safety (1993), Development of Safety Assessment Technique on the Structural Aging Degradations in NPP Concrete Structures, KINS/GR-062.
12. Korea Institute of Construction Technology (1996), Deterioration of Safety Related Concrete Structures in Nuclear Power Plants.
13. Kim, D.-H., Lee, S.-S., Song, H.-Y., and Kim, E.-Y. (2004). An experimental study on the properties of concrete according to G/S ratio classified by maximum size of coarse aggregate, *J. Korea Inst. Bld. Const.*, 4(2), 97-103.
14. KS L ISO 9597 (2019), Determination of setting time and soundness of cements.
15. KS F 2711 (2017), Standard test method for resistance of concrete to chloride ion penetration by electrical conductance.
16. Lee, C.-M., Yoon, E.-S., and Kim, S.-S. (2019), A Study of Time Dependent Diffusion for Prediction Service Life in NPPs Safety Related Concrete Structures, *J. Korea Inst. Struct. Maint. Insp.*, 23(3), 136-142.
17. Lee, S.-H., and Kwon, S.-J. (2012), Experimental study on the relationship between time-dependent chloride diffusion coefficient and compressive strength, *J. Korea Conc. Inst.*, 24(6) 715-726.
18. Ministry of Land Infrastructure and Transport (MLIT) (2009), Concrete Standard Specification Appendix II Evaluation Concrete Durability, 637-672.
19. Shakouri, M., and Trejo, D. (2017), A time-variant model of surface chloride build-up for improved service life predictions, *Cem. Concr. Compos.*, 84, 99-110.
20. Wang, J., Basheer, P. A. M., and Nanukuttan, S. V. (2016), Influence of service loading and the resulting micro-cracks on chloride resistance of concrete, *Constr. Build. Mater.*, 108, 56-66.

Received : 09/12/2022

Revised : 09/19/2022

Accepted : 09/26/2022

요 지 : 이 연구는 원전 안전성 관련 구조물의 콘크리트 배합설계를 이용하여 확산특성을 평가하였다. 원전안전성관련 콘크리트 구조물 중 해수에 침지되거나 간만대에 위치하는 취배수구조물의 배합을 선정하여 압축강도, 전기전도도에 의한 염소이온 침투저항성 평가, 염수침지를 통한 확산특성을 분석하였다. 원전 콘크리트 구조물의 설계기준강도인 91일까지 재령에 따라 1, 7, 14, 28, 56, 91 일에 압축강도를 측정했으며, 재령 28, 91 일에 염소이온 침투저항성 평가를 실시했다. 재령 28일 콘크리트 시험체를 28일간 염수에 침지한 뒤 깊이별 시료를 채취하여 염화물량을 분석함으로써 확산계수를 도출하였다. 결과적으로 보통포틀랜드시멘트를 100% 사용한 콘크리트보다 플라이애시가 20% 치환된 원전 콘크리트 배합이 28일 이후 장기적인 강도증진 효과가 더 높게 나타났다. 또한 원전콘크리트 배합이 보통포틀랜드시멘트를 100% 사용한 배합보다 염소이온 침투저항성이 높고 확산계수도 더 낮게 나타나 염해에 대한 저항성이 더 높은 것으로 나타났다.

핵심용어 : 원자력발전소, 콘크리트, 내구성, 염해, 확산계수, 염소이온침투
