

UAE 콘크리트에 대한 염화물 확산의 온도의존성

황지원¹, 권성준^{2*}

Temperature-dependent Diffusion Coefficient of Chloride Ion in UAE Concrete

Ji-Won Hwang¹, Seung-Jun Kwon^{2*}

Abstract: NPP (Nuclear power plant) structures have been constructed near to the sea shore line for cooling water and exposed to steel corrosion due to chloride attack. Regarding NPP structures built in the UAE, chloride transport may be more rapid than those in the other regions since the temperature near to the coast is high. In this study, concrete samples with 5,000psi (35MPa) design strength grade were manufactured with the materials and mix proportions, which were the same as used in the UAE NPP structures, then chloride diffusion coefficients were evaluated considering temperature and curing age. The compressive strength and the diffusion coefficient were evaluated and analyzed for the samples with 28 and 91 curing days. In addition, chloride diffusion tests for 91-day-cured condition were carried out in the range of 20°C to 50°C. The activation energy was obtained through converting the temperature slope to a logarithmic function and it was compared with the previous studies. The proposed activation energy can be useful for a reasonable durability design by using actual temperature-dependent chloride diffusion coefficient.

Keywords: Diffusion coefficient, Temperature, Durability design, Activation energy, UAE concrete

1. 서 론

원전 구조물(Nuclear Power Plant)은 냉각수의 사용을 위해 해안가에 위치하게 되며, 다양한 부대시설을 위하여 각각의 설계강도 그룹을 가지고 있다. 또한 방사선 물질의 차폐를 위해 반응로 콘테이너의 벽체는 1,500mm 이상의 큰 단면을 가지고 있으므로, 수화열 및 건조수축 저감을 위한 혼화재료 사용을 기본으로 한다(ACI, 1996; Matsumura et al., 2008; Pomaro et al., 2016).

원전 구조물의 경우도 구조적인 안전성 뿐 아니라, 목표 내구수명 동안 성능을 유지하기 위해 내구성 설계를 수행하며 (Pomaro et al., 2016; Bruck et al., 2019; Field et al., 2015), 주요 5개의 열화기구(염해, 탄산화, 황산염 침해, 알칼리 골재반응, 동결융해)등에 대한 내구성 설계를 수행하고 있다. 본 연구에서 실험한 시편은 UAE 지역에 설치될 구조물의 콘크리트 배합을 가진 시편으로, 해안가의 높은 염화물 이온과 상대 습도, 그리고 일부 지반에서는 높은 황산염 농도로 인한 열화 현상을 고려할 수 있으므로, 염화물 이온과 황산염 이온을 열

화인자(major deteriorating agent)로 정의할 수 있다.

콘크리트 내부의 철근은 일반적으로 강알칼리로 보호되어 불활성상태, 즉 철근이 부식으로부터 보호되는 상태를 가지고 있다. 그러나 외부의 염화물 이온의 침투로 인해 활성상태(부식)가 발생할 수 있으며, 구조물 특성상 발생할 수 있는 재료적 균열(건조수축 및 수화열)에서는 염화물 침투가 크게 발생할 수 있다(Broomfield, 1997; Jung et al., 2018). 또한 염해에 노출된 RC (Reinforced Concrete) 구조물에서의 철근부식 위험성 증가는 온도에 따른 염화물 이온의 확산성 증가와 철근 활성상태의 가속화로 설명할 수 있다.

염화물 이온의 확산은 온도가 증가함에 따라 활성화에너지를 가진 로그함수로 구현되는데, 이는 Arrhenius Law에 기반하는 것으로 알려져 있다. 이러한 온도의존형 염화물 확산성은 배합조건, 온도상승범위, 사용 바인더 조건 등에 따라 변하는 것으로 알려져 있다. 또한 시험방법(축진, 장기노출)에 대해서도 활성화 에너지의 차이가 발생한다(Thomas and Bentz, 2002; So et al., 2014; Yang and Kwon, 2023). 철근의 부식 활성 상태 역시 온도가 증가함에 따라 활성 상태가 증가하며, 이러한 경향은 PSC와 같이 인장응력을 받는 경우 더욱 크게 나타나고 있다(Lee et al., 2022; Li et al., 2011; Popova, 2007).

최근 들어 해외 원전구조물 수출이 증가하고 있는데, 특히 중동 지역의 경우 매스콘크리트 시공 시 발생할 수 있는 재료적 균열 가능성이 크게 된다(KDI, 2010). 이는 높은 일교차, 일 최고 온도의 증가 등으로 인해 시공시 수화열 및 건조수축에

¹정희원, 경기대학교 건축공학과 박사과정

²정희원, 한남대학교 토목환경공학과 교수, 교신저자

*Corresponding author: jjuni98@hnu.kr

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

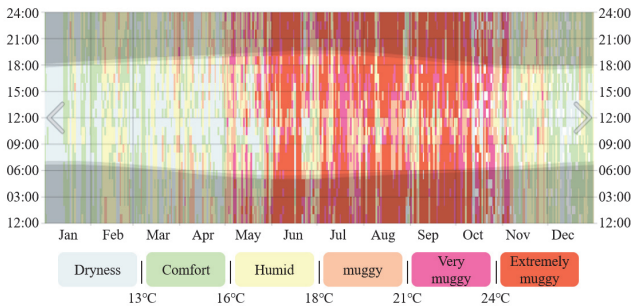
•본 논문에 대한 토의를 2024년 9월 30일까지 학회로 보내주시면 2024년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

대한 균열 발생 위험이 크고, 이를 통해 해안가로부터 염화물 유입이 증가할 수 있기 때문이다.

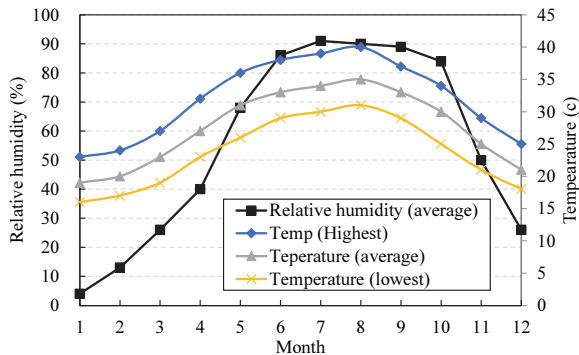
본 연구에서는 UAE에 시공되는 원전구조물의 사용재료를 입수하여 배합조건에 따른 강도특성을 평가하였다. 또한 온도에 따라 변화하는 염화물 확산계수를 도출하여, 염화물 이온의 활성화 에너지를 평가하였으며, 기존에 평가된 실험값들과 비교하였다. 온도범위는 20°C ~ 50°C 범위에서 실험을 수행하였으며, 5,000psi(35MPa) 배합을 기준으로 역학적, 내구적 시험을 수행하였다. 도출된 염화물 이온의 활성화 에너지는 온도의존성 확산계수를 고려하여 염화물 거동 평가 및 내구수명 평가에 직접적으로 사용될 수 있다.

2. 대상 노출환경 분석

대상 지역인 UAE는 높은 연평균 온도와 황이온이 상대적으로 많은 대기 조건을 가지고 있다. 예전에 바닷가 지역이 매립되면서 염화물 및 황산염 이온 농도가 높은 지역이 해안가에 있다고 보고된다(Yang and Kwon, 2023; Weatherspark, 2022). 토양의 경우, 기본적으로 사질토양이지만, 다양한 칼슘계 염류가 포함되어 있으며, 점토와 유기물 함량이 낮다. 또한 모래(2000-50 μm), 미사(50-2 μm) 및 점토(2 μm 미만)의 세 가지 토양 입자 그룹의 크기 분포에 따라 분류되며, 철분계 및 탄산칼슘이 풍부한 토양성분이 존재한다.



(a) Relative humidity conditions (average in 2021)



(b) Exterior conditions (covering 5 years)

Fig. 1 Average temperature in UAE

염화물 이온의 확산에 대해서는 온도와 습도 조건의 가장 지배적이며, 이는 양생과정에도 큰 영향을 미친다. 여름의 경우 (약 5월 중순 ~ 9월 말)의 평균 온도는 38°C 이상이며 30°C ~ 41°C의 범위를 가지고 있다. 또한 겨울의 경우, 온도는 27°C, 14°C ~ 24°C의 범위를 가지고 있다. Fig. 1에서는 대상지역의 온도 및 습도 범위를 나타내고 있다.

3. 온도의존성 염화물 확산 평가를 위한 실험 프로그램

3.1 배합 및 재료

사용재료는 모두 UAE 원전에 사용되는 재료를 입수하여 배합을 수행하였다. 설계 압축강도 5,000psi(35MPa)이며, 일반 원전배합과는 다르게, 실리카 폼과 Grade 100의 슬래그를 사용하였다. 또한 ASTM C 494를 만족하는 Type F 고성능 감수제를 사용하였다. 물-결합재비는 40%이며 슬럼프는 110 ~ 150mm로 평가되었다. Table 1에서는 사용재료의 배합표를, Table 2에서는 사용된 재료의 정보를 수록하였다.

Table 1 Mixing proportions for the test

W/B	Strength (psi/ MPa)	Material (lb/cy)*							
		W	C	GGBS	SF	Crushed Sand	Dune Sand	Coarse Sand	HWRA Agg (Type F)
0.4	5,000 (35MPa)	247	190	411	32	1,191	388	1,581	6.963

*: (lb/cy)×0.5932=(kg/m³)

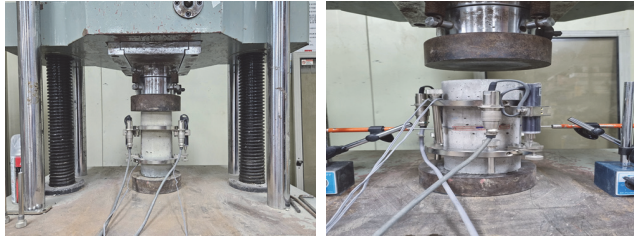
Table 2 Materials properties of the components

Items	Supplier (Source)	Fineness Modulus	Density (g/cm ³)	Absorption (%)	
CS:DS=75:25	(Blended sand)	2.67	-	-	
Fine Agg.	CS(crushed sand)	WBG	-	2.69	1.2
	DS(dune sand)	Trans Middle East (Al Ain)	-	2.63	0.7
Coarse Agg.	1 in.	-	-	2.69	0.5
	3/4 in.	WBG	-	2.69	0.6
	3/8 in.	-	-	2.68	0.6
Binder	OPC	NCF	-	3.12	-
	GGBS	DAZE	-	2.86	-
	SF	-	-	2.16	-
	HWRA(Type-F)	Silk Road	-	1.055	-

3.2 역학적 특성 및 확산계수 실험 방법

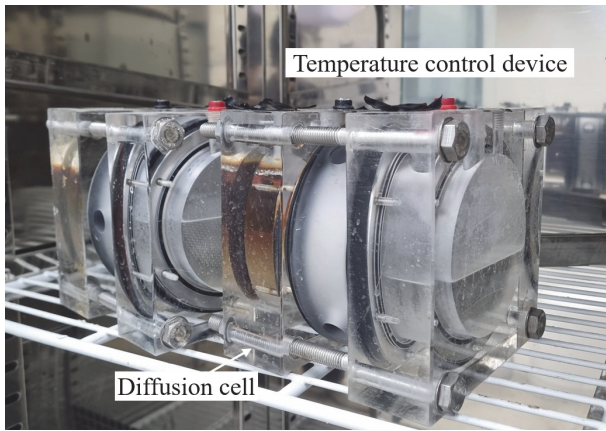
3.2.1 역학적 성능 평가

본 연구에서는 KS F 2405에 따라 재령 28일 및 91일 강도를 평가하였으며, 동일재령에서의 탄성계수를 평가하였다. 배합 후 재령 1일에 탈형하였으며, 실험실 내에서 기건양생을 수행

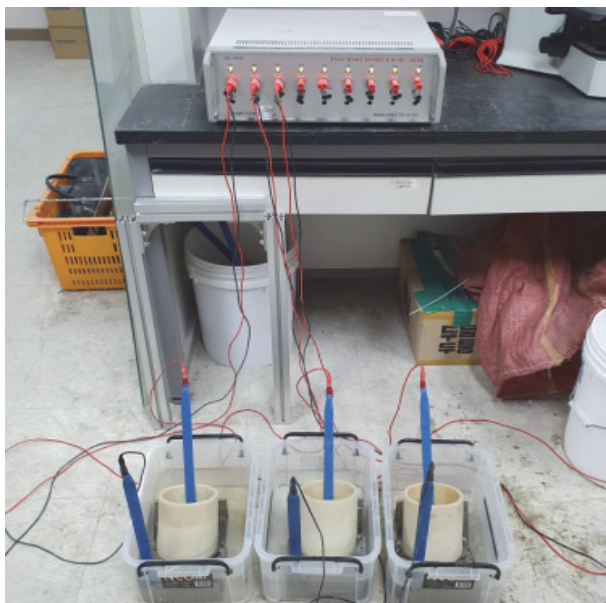


(a) Compressive strength (b) Elasticity measurement

Fig. 2 Photos for physical performance tests



(a) Pre-test for temperature rising



(b) Diffusion cell for the test

Fig. 3 Photos for temperature-dependent diffusion test

하였다. Fig. 2에서는 강도 실험 및 탄성계수 실험사진을 나타내었다.

3.2.2 온도의존형 염화물 확산계수 평가

염화물확산 시험은 NT BUILD 492를 준용하여 시험하였으며, 온도 조절형 챔버에 실험장치를 존치하여 실험하였다. 기존의 연구에서는 물로 미리 pre-heating 하여 실험시간을 줄일 수 있었으므로, 이 방법을 고려하여 동일하게 실험을 수행하였다(Yang et al., 2023). 각 셀에 온도가 증가된 매질을 넣어서 실험할 경우, 시편과의 온도차가 발생할 수 있으며 온도를 높여서 식힌 뒤에 실험할 경우, 이미 매질이 콘크리트 흡수되게 된다. 예비실험에서는 40°C 항온항습조에서 20°C 매질이 40°C까지 증가하는 시간은 800 분이 소요되었으며, 35°C 매질이 40°C까지 증가하는 데는 500 분이 소요되었다. 이러한 정보를 이용하여, 목표온도 대비 -5°C로 매질온도를 맞추고 목표온도에 이르는 시간을 기다린 뒤, 온도에 따른 확산실험을 수행하였다.

온도 의존형 확산성 실험에서는 재령의 영향을 많이 받는데, 온도의 증가에 따라 혼화재료(고로슬래그미분말, 실리카폼)를 혼입한 콘크리트에서는 수화반응이 초기재령에서 크게 증가하여 온도에 따른 확산 거동을 명확하게 알 수 없기 때문이다. 이를 위해 91일 재령 시편에 대하여 온도의존형 확산실험을 수행하였다. 온도의존형 염화물 확산계수 실험장비 및 관련 사진을 Fig. 3에 나타내었다.

4. 강도 및 확산성 실험결과 분석

4.1 강도특성 변화

재령의 증가에 따라 강도와 탄성계수는 증가하였으며, 평가결과를 Fig. 4에 정리하였다. 또한 Fig.5에서는 재령에 따른 응력-변형률 곡선을 나타내었다. 재령 1일후 기건 양생을 수행하여 28일 강도는 37.3MPa, 91일 강도는 44.5MPa를 나타

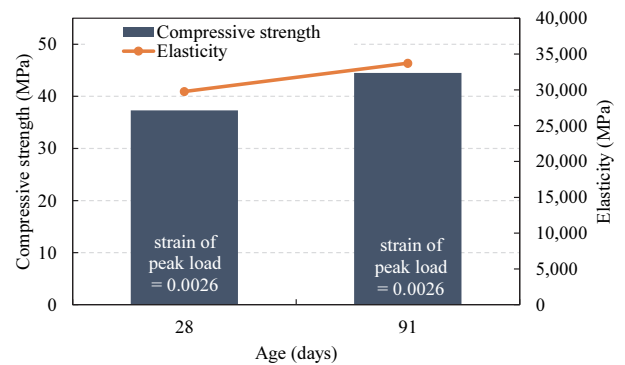
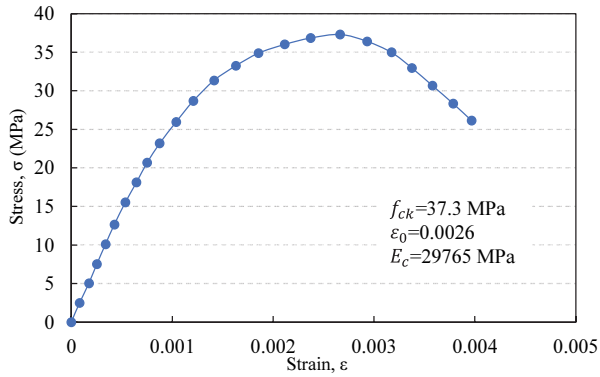
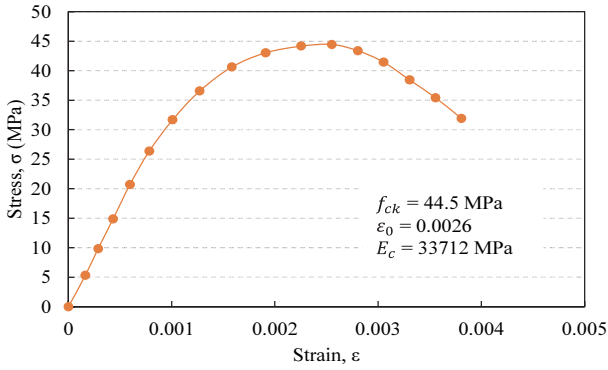


Fig. 4 Measured physical properties at each ages



(a) Stress- strain curve at 28 days



(b) Stress- strain curve at 91 days

Fig. 5 Stress-strain curve at different ages

내었다. 최대 강도에서의 변형률은 0.0026으로 재령에 따른 파괴 거동은 큰 차이가 없었다. 또한 재령의 증가에 따라 강도는 11.9%가 탄성계수는 13.3%가 증가하였다.

4.2 온도에 따른 확산특성 변화

28일 재령에 대해서는 20°C에 대한 확산시험을 수행하였으며, 91일 재령에 대해서는 20°C에서 10°C씩 증가시면서 최대 50°C까지 실험을 수행하였다.

91일 장기 장기재령을 선정한 이유는 전술한대로 혼화재료를 사용한 콘크리트에서 온도가 증가할 경우, 염화물 이온 확산성의 증가뿐 아니라, 실리카 폼의 포졸란 반응, 시멘트의 수화반응, 고로슬래그 미분말의 잠재수경성 반응이 동시에 진행되어 온도증감에 따른 경향을 명확히 알 수 없기 때문이다. Table 3에서는 실험결과를 나타내었으며, 이를 Fig. 6에 도시하였다.

온도에 따라 확산계수는 증가하였으며, 재령이 28일에서 91일로 증가함에 따라 확산계수는 85.6% 수준으로 감소하였다. 보통 6개월 정도 경과시 큰 확산계수의 감소가 평가되며, 실리카폼 혼입과 낮은 물-결합재비로 인해 28일 재령 확산계수(초기값)가 낮으므로 큰 확산성의 감소는 보이지 않았다 (Jang et al., 2017; Yoon et al., 2019).

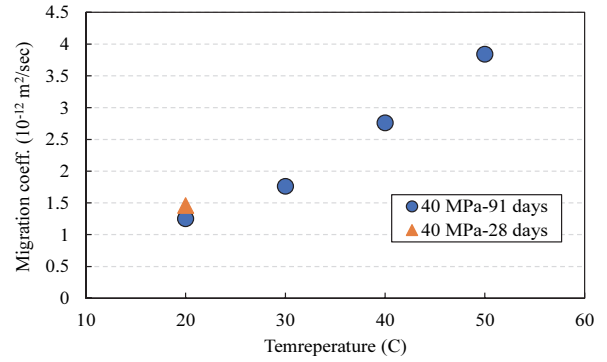


Fig. 6 Changes in diffusion coefficient with temperature

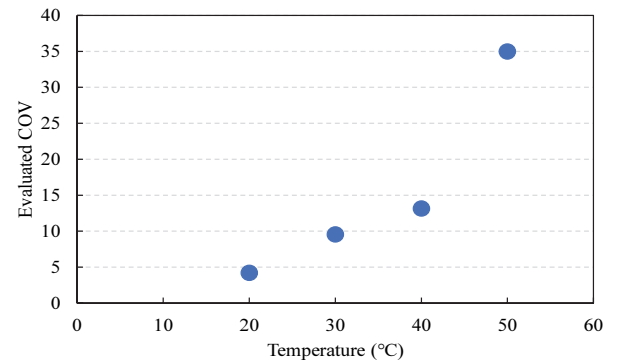


Fig. 7 Increasing COV with raising temperature

Table 3 Testing temperature and curing days

Curing ages	Diffusion coefficient ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$)				
	28 day	20°C	30°C	40°C	50°C
Testing temperature	20°C	20°C	30°C	40°C	50°C
Mean	1.46/	1.25/	1.76/	2.76/	3.84/
/COV	3.63%	4.19%	9.53%	12.13%	34.95%

흥미로운 점은 온도가 증가할수록 확산계수의 변동성이 크게 증가하였는데, 이는 일부 온도증가에 따른 고정화염의 해리가 불안정한 것으로 추측되며, 이에 대한 연구는 추가 시험을 수행하여 평가할 필요가 있다. 온도 증가에 따른 변동계수의 증가는 Fig. 7에 나타내었다.

4.3 활성화 에너지의 도출

염화물 확산에 따라 활성화에너지(Activation energy) 도출은 염화물 확산거동에 매우 중요하다. 몇가지 염화물 확산에 따른 지배방정식이 있으나, 염화물 확산의 온도 의존성은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다(So et al, 2014; Yang et al., 2023).

$$D = A \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (1)$$

여기서 D 는 염화물 확산 계수를, A 는 실험상수, E_a 는 활성화 에너지, R 은 기체 상수, T 는 절대온도를 나타낸다.

임의 온도 T_1 과 T_2 에서 확산계수가 각각 D_1 과 D_2 라고 할 때, 로그함수를 이용하여 식 (1)은 식 (2)와 같이 변환할 수 있다. 또한 E_a 를 도출하기 위해 식을 정리하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln \frac{D_1}{D_2} = -E_a \frac{(1/T_1 - 1/T_2)}{R} \quad (2)$$

$$E_a = -R \frac{(\ln D_1 - \ln D_2)}{(1/T_1 - 1/T_2)} = -2.303R \frac{(\log D_1 - \log D_2)}{(1/T_1 - 1/T_2)} \quad (3)$$

여기서, E_a 는 KJ/mol의 단위를, R 은 8.314J/mol·K의 단위를 단위로 통일한다. 또한 도출된 E_a 는 식 (4)와 같이 겔보기 염화물 확산계수의 온도의존성 식으로 표현되고 식 (5)와 같이 염화물 거동을 평가하게 된다.

$$D(T) = D_{ref} \cdot \exp\left[\frac{E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (4)$$

$$C(x,t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D(T)}(t_{ref}/t)^m}\right) \quad (5)$$

여기서, $C(x,t)$ 는 시간 t 와 거리 x 에서의 염화물량, C_0 는 겔보기 확산계수, t_{ref} 는 기준시간, m 은 시간에 따른 확산저감계수를 나타낸다.

기존의 연구에서는 활성화 에너지가 30.0 ~ 50.0kJ/mol 수준으로 보고되고 있으며, 콘크리트보다 페이스트 및 모르타르에서 증가한다고 보고되고 있다(CEB-FIP, 2006; Yuan et al., 2008; Dhir et al., 1993; Juli-Betancourt and Hooton, 2004; Page et al., 1981). 또한 현재 많이 사용하고 있는 LIFE365 프로그램 및 fib 모델에서는 혼화재의 영향을 고려하지 않고 각각 35KJ/mol 및 40KJ/mol 채택하고 있다(Thomas and Bentz, 2002; CEB-FIP, 2006). 전술한대로 사용 콘크리트를 대상으로 온도의존형 염화물 확산계수를 도출하는 것은 중요하며, 노출 환경을 고려하여 합리적인 내구수명 평가에 사용될 수 있다.

식 (3)과 같이 온도에 따른 로그함수를 도시하면 Fig. 8과 같이 나타낼 수 있으며, 10°C 간격의 기온기 평균값은 17.6kJ/mol 수준으로 평가되었다. 기존의 연구에서는 80°C 이상의 온도에서도 수행한 결과가 있으나(So et al, 2014), 이 경우는 시멘트 조직의 파괴와 흡착된 염화물의 해리가 크게 발생할 수 있

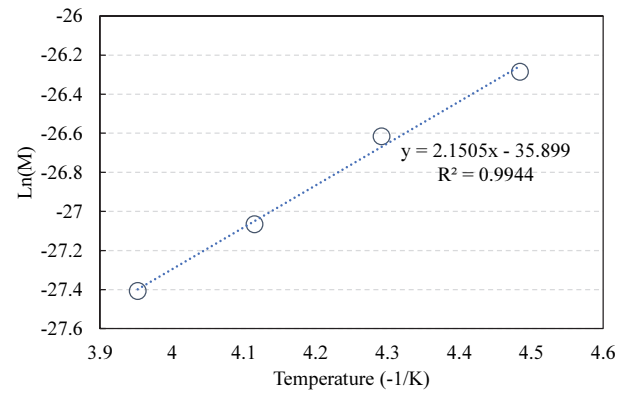


Fig. 8 Process of activation energy evaluation

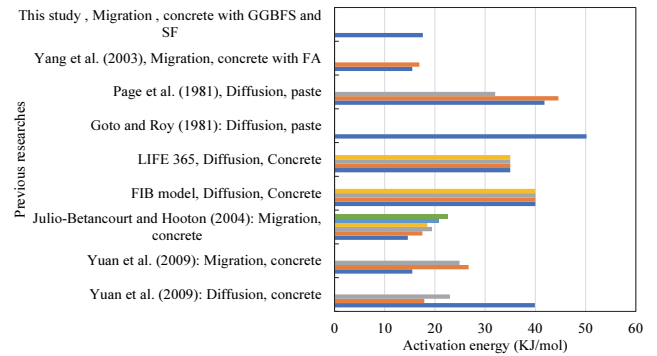


Fig. 9 Comparison of activation energy with previous studies

으므로, 본 연구에서는 50°C 수준을 최대 실험농도로 설정하였다.

또한 Fig. 9에서는 실험방식에 따른 활성화 에너지 분포를 기존의 연구와 비교하였다(Thomas and Bentz, 2002; Yang et al., 2023; CEB-FIP, 2006; Yuan et al., 2008; Dhir et al., 1993; Juli-Betancourt and Hooton, 2004).

기존의 연구에서는 물-결합재비가 낮은 경우 약간 활성화 에너지가 크게 평가되는 경향이 있었으며 촉진(migration) 실험을 하는 경우, 확산실험을 하는 경우보다 낮게 평가되었다. 촉진(migration) 실험의 경우, 온도의 영향보다 전기장에서의 염화물 이동이 주된 거동이 되므로 온도의존성이 낮게 평가된 것으로 판단된다. 또한 일부 바인더(플라이애쉬)를 혼입하는 경우 낮은 실험결과가 도출되는 경향이 있다. 시멘트 페이스트 또는 모르타르와 콘크리트를 대상으로 한 실험결과에서 큰 차이가 나는 것은 굵은 골재 영향으로 활성화에너지가 낮게 평가되기 때문이다(Yang et al., 2023). 실험방법(diffusion, migration)과 시멘트 종류, 골재사용량에 대한 특성을 고려하여 배합에 따른 활성화에너지의 도출도 장기적인 염화물 거동 평가를 위해서는 중요한 일이다.

5. 결 론

본 연구에서는 UAE 원전에서 사용되는 재료를 입수하여 콘크리트를 제조하였다. 또한 강도 및 염화물 확산계수를 평가하고 이 결과를 회귀분석하여 활성화에너지를 도출하였다. 본 연구에서 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 문헌분석 결과 대상 지역의 주된 열화환경은 염해와 황산염 침해라고 판단되며, 매스콘크리트 구조물이므로 균열 발생을 줄이기 위한 시공이 매우 중요함을 알 수 있다.
- 2) 재령 28일에 비하여 91일에 측정된 염화물 확산계수는 85.6% 수준으로 감소하였는데, 이는 슬래그와 실리카 폼을 혼입하여 초기재령에서 확산계수가 $1.46 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$ 로 매우 낮게 평가되었기 때문이다. 보통 6개월 이후 확산계수는 크게 감소되므로 장기 재령에서 확산성을 평가할 필요가 있다.
- 3) Arrhenius Law를 이용하여, 염화물 이온의 활성화에너지를 도출하여 기존의 문헌과 비교하였다. 낮은 물-결합 재비 및 촉진(migration) 실험을 수행하여 비교적 낮은 수준인 17.6KJ/mol의 활성화에너지가 평가되었다. 또한 온도가 증가하면서 실험값의 편차가 크게 발생하였는데, 이는 고정화 및 흡착된 염화물이 온도에 따라 불안정하게 해리되기 때문으로 판단된다. 도출된 활성화에너지는 온도의존성 확산계수 형태로 대상 지역의 염화물 거동 평가 및 내구수명 평가에 사용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 정부의 지원으로 한국연구재단 원자력 연구개발 사업(원자력 연구개발사업 NRF-2022M2E9A3091898)에 의해 수행되었으며, 저자들은 이에 감사드립니다.

References

1. ACI Committee 304 (1996), Heavyweight concrete: Measuring, mixing, transporting, and placing (ACI 304.3R-96), American Concrete Institute (ACI), USA, 1-8.
2. Broomfield, J. P. (1997), Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair, E&FN, London 1-15.
3. Bruck, P. M., Esselman, T. C., Elaidi, B. M., Wall, J. J., and Wong, E. L. (2019), Structural assessment of radiation damage in light water power reactor concrete biological shield walls, *Nuclear Engineering and Design*, 350, 9-20.
4. CEB-FIP (2006), Model code for service life design, The International Federation for Structural Concrete, Switzerland, 1-116.
5. Dhir, R. K., Jones, M. R., and Elghaly, A. E. (1993), PFA Concrete: exposure temperature effects on chloride diffusion, *Cement and Concrete Research*, 23(5), 1105-1114.

6. Field, K. G., Remeck, I., and Le Pape, Y. (2015), Radiation effects in concrete for nuclear power plants-Part I: Quantification of radiation exposure and radiation effects, *Nuclear Engineering and Design*, 282, 126-143.
7. Goto, S., and Roy, D. M. (1981), Diffusion of ions through hardened cement pastes, *Cement and Concrete Research*, 11(5-6), 751-757.
8. Jang, S. Y., Karthick, S., and Kwon, S. J. (2017), Investigation on Durability Performance in Early Aged High-Performance Concrete Containing GGBFS and FA, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017, 3214696.
9. Julio-Betancourt, G. A., and Hooton, R. D. (2004), Study of the Joule effect on rapid chloride permeability values and evaluation of related electrical properties of concretes, *Cement and Concrete Research*, 34(6), 1007-1015.
10. Jung, S. H., Rye, H. S., Karthick, S., and Kwon, S. J. (2018), Time and crack effect on chloride diffusion for concrete with fly ash, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 12(1), 1-10.
11. KDI. (2010), Become one of the top 3 nuclear export powerhouses by 2030, <https://eiec.kdi.re.kr/publish/naraView.do?cidx=6998>. (in Korean).
12. Lee, K. M., Yoon, Y. S., Yang, K. H., Yoo, B. Y., and Kwon, S. J. (2022), Corrosion Behavior in RC Member with Different Cover Depth under Cyclic Chloride Ingress Conditions for 2 Years, *Applied Sciences*, 12(24), 13002.
13. Matsumura, T., Shirai, K., and Saegusa, T. (2008). Verification method for durability of reinforced concrete structures subjected to salt attack under high temperature conditions, *Nuclear Engineering and Design*, 238(5), 1181-1188.
14. Page, C. L., Short, N. R., and Tarras, A. E. (1981), Diffusion of chloride ions in hardened cement pastes, *Cement and Concrete Research*, 11(3), 395-406.
15. Pomaro, B. (2016), A review on radiation damage in concrete for nuclear facilities: from experiments to modeling, *Modelling and Simulation in Engineering*, 2016, 4165746.
16. Popova, A. (2007), Temperature effect on mild steel corrosion in acid media in presence of azoles, *Corrosion Science*, 49(5), 2144-2158.
17. So, H. S., Choi, S. H., Seo, J. S., So, S. Y., and Seo, K. S. (2014), Influence of temperature on chloride ion diffusion of concrete, *Journal of Korea Concrete Institute*, 26(1), 71-78 (in Korean).
18. 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, Silica Fume Association, Lovettsville, USA.
19. Weatherspark. (2022), <https://ko.weatherspark.com>.
20. Yang, K. H., and Kwon, S. J. (2023), Evaluation of Strength and Chloride Diffusion in Concrete with FA Considering Temperature Effect, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 11(1), 62-69 (in Korean).
21. Yang, K. H., Kwon, S. J., Hwang, J. W., and Yoon, Y. S. (2023), Temperature effect on strength and chloride migration in nuclear power plant concrete, *Construction and Building Materials*, 405, 133345.

22. Yoon, Y. S., Lim, H. S., and Kwon, S. J. (2019), Evaluation of Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Fly Ash Concrete by Marine Environment Exposure Tests, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 23(3), 1-8 (in Korean).
23. Yuan, F. L., and Li, C. Q. (2011), Corrosion propagation of prestressing steel strands in concrete subject to chloride attack, *Construction and Building Materials*, 25(10), 3878-3885.
24. Yuan, Q., Shi, C., Schutter, G. D., and Audenaert, K. (2008), Effect of temperature on transport of chloride ions in concrete, *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II*, 345-351.

Received : 07/15/2024
 Revised : 07/31/2024
 Accepted : 07/31/2024

요 지 : 원전 구조물은 냉각수를 사용하기 위해 해안가에 위치하고 있으며, 염해에 의한 철근부식에 노출되어 있다. UAE에 지어지는 원전 구조물의 경우, 해안가의 온도가 높으므로 염화물 이동이 다른 지역에 비하여 빠르게 평가된다. 본 연구에서는 원전 구조물에 사용되어지는 재료와 배합을 이용하여 5,000 psi (35 MPa) 설계강도 등급의 시편을 제작하였으며, 온도와 재령을 고려하여 염화물 확산계수를 평가하였다. 재령 28일 및 91일에 강도 평가 및 온도에 따른 확산계수를 평가하여 특성을 분석하였다. 또한 91일 재령 콘크리트에 대하여 20°C ~ 50°C의 범위에서 염화물 확산실험을 수행하였다. 또한 온도에 따른 기울기를 로그함수로 변환하여 활성화에너지를 도출하였으며, 기존의 제안값들과 비교하였다. 제안된 활성화에너지는 온도의존형 염화물 확산계수에 사용하여 합리적인 내구성 설계를 수행할 것으로 평가된다.

핵심용어 : 확산계수, 온도, 내구성 설계, 활성화 에너지, UAE 콘크리트
