

해양콘크리트 구조물의 내염성에 관한 연구

김은겸(서울산업대학교 토목공학과 교수)

1. 서론

해양콘크리트 구조물은 환경적 요인에 따른 철근 부식이 구조물의 내구성에 영향을 주는 주된 요인으로 인식되고 있다. 현재 철근 부식으로 인한 피해를 줄이기 위해 많은 대책이 다각적인 방면에서 제시되고 있으며, 내구성 증진을 위한 보수·보강 및 유지관리 방안 또한 다각적으로 연구되고 있다. 이들 연구를 종합하면, 해양 구조물의 내구성을 증진하기 위해서는 염해 환경에서 유입되는 유해물질에 대한 저항성이 강한 재료의 개발과 사용이 절실하다는 점에 의견을 같이하고 있다. 최근에는 해양을 통한 국제교역의 증가로 인하여 항만시설물을 중심으로 더 많은 콘크리트 구조물의 건설이 요구되고 있기 때문에, 해양환경에 대한 저항성이 우수한 콘크리트 구조물의 건설은 구조물의 안전성뿐만 아니라 경제적인 측면에서도 중요한 사안이 되고 있다.

해양콘크리트의 내구성을 향상시키기 위한 방안으로 시멘트 경화체 조직을 치밀하게 하여 염화물이온 등과 같은 환경인자의 침입을 차단하는데 유효하다고 알려져 있는 고로슬래그 미분말이나 플라이애쉬 등과 같은 혼화제를 활용하는 방법이 제시되고 있다. 특히, 시멘트의 일부를 고로슬래그 미분말로 치환하여 사용할 경우, 잠재수경성 반응에 의한 콘크리트의 세공조직의 치밀화로 인해 염화물이온의 침투를 억제할 수 있는 것으로 알려져 있다.

한편, 해양콘크리트의 황산염에 대한 내구성을 증진시키기 위한 대책으로서 내황산염시멘트가 사용되고 있다. 그러나, 내황산염시멘트는 해수 중의 황산염과 C_3A 의 반응성에 의해 형성되는 에트링가이트의 양을 규제하기 때문에 이상팽창에 대한 저항성은 우수하지만, 시멘트의 C_3A 양의 감소로 콘크리트에 대한 염화물침투 속도가 빨라져 철근부식을 촉진시킬 수가 있다는 연구결과가 제시되고 있다.

본 연구에서는 1종 보통포틀랜드시멘트와 5종 내황산염시멘트에 고로슬래그 미분말을 치환하여 치환율에 따른 염화물이온 투과성과 확산계수의 영향을 평가하기 위해 실험을 실시하였다. 또한 콘크리트 내부로 유입된 염화물의 거동을 정량적으로 평가할 수 있는 수학적 모델을 설정하여, 실험에서 구한 확산계수를 이 모델에 도입한 후 시간의 변화에 따른 염화물 이온의 이동량을 유한요소법을 통해 정량적으로 평가하고 철근의 부식 개시 시점을 해석하였다. 이들 실험과 해석을 통해 얻은 결과들을 종합하여 각 시멘트 종류별 염화물의 침투 현상을 분석하고 재료적인 측면에서 고로슬래그 미분말이 콘크리트의 내구성에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

2. 사용재료 및 배합선정

가. 사용재료

실험에 사용된 시멘트의 화학조성 및 물리성질은 <표-1>에 나타난 바와 같다. 잔골재는 완전히 제염한 바다모래와 부순모래를 7 : 3으로 혼합하여 사용하였으며, 비중은 2.6이고 표준입도를 유지하였다. 굵은골재는 비중 2.63의 부순돌이며, 최대치수는 10mm 이다.

혼화제는 슬럼프를 조절하기 위해 폴리카르본산계를 주성분으로 하는 코리아 마스터 빌더스사의 RHEOBUILD SD-8N 유동화제를 사용하였다. <표-2>는 실험에 사용된 고로슬래그 미분말의 물리·화학적 시험결과를 나타낸 것으로서 분말도는 4000g/cm²이다.

<표-1> Chemical compositions and physical properties of cements

Cements	Chemical compositions(%)									Physical properties	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Ig.loss	Specific gravity	Blaine (cm ² /g)
Type I	21.0	5.9	3.2	62.5	3.02	0.12	0.78	2.1	1.61	3.15	3,200
Type V	22.7	4.1	4.4	62.7	2.54	0.09	0.59	1.8	1.40	3.15	3,250

<표-2> Chemical compositions and physical properties of ground granulated blast-furnace slag

Chemical compositions(%)											Physical properties	
SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₂	TiO ₂	S	Cl	Specific gravity	Blaine (cm ² /g)
33.31	14.60	0.40	41.63	7.21	0.164	0.316	0.034	1.40	0.82	0.006	2.92	4000

나. 배합의 선정

콘크리트의 염화물이온 침투저항성 실험을 실시하기 위해 각각의 콘크리트 시험체를 제작하였으며, 이 때 사용한 배합을 <표-3>에 제시하였다.

시멘트는 1종 보통포틀랜드시멘트 및 5종 내황산염시멘트 2종류에 대하여 동일한 양을 사용하였으며, 염해 저항성 효과의 분석을 위해 시멘트 대신에 각각 25%, 40% 및 55%의 고로슬래그 미분말을 치환하여 사용하였다.

<표-3> Concrete mix design

Blast furnace slag rate(%)	W/C (%)	S/a (%)	W (kg)	C (kg)	Slag (kg)	Crushed aggregate (kg)	Sea sand (kg)	Crushed sand (kg)	Plasticizer (kg)
0%	41.8	46	161	385	0	977	573	247	1.60 (1.70)
25%				289	96				1.60 (1.20)
40%				231	154				1.55 (1.70)
55%				173	212				1.55 (1.20)

Note) () : cement type V

3. 염화물의 침투저항 실험 및 수치해석방법

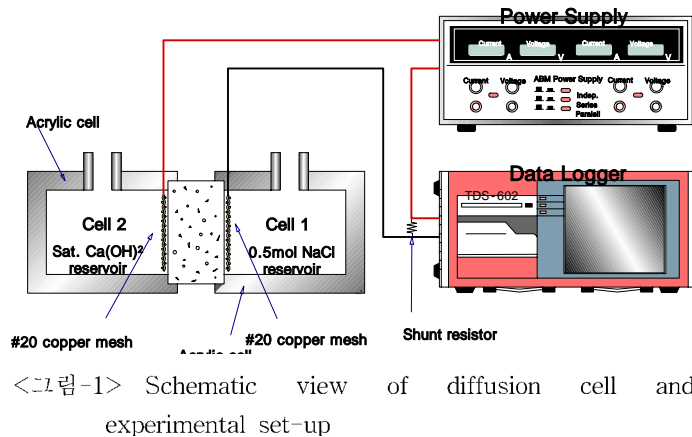
가. 염화물이온 투과성 및 시험 방법

(1) 염화물이온 통과전하량

<그림-1>은 ASTM C1202-97의 규정에 의한 염화물이온 투과성 시험용 확산의 개요도를 나타낸 것이다.^{1),2)} 확산 cell 1에는 0.5mol의 NaCl 용액을 넣고 확산 cell 2에는 포화 Ca(OH)₂ 용액을 채웠으며, 60V의 인가 전압을 가하여 염화물이온 촉진 투과시험을 수행하였다. 수집된 데이터는 적산에 의해 전하량(coulomb)을 산정하고, Table 4에 나타낸 바와 같이 ASTM C 1202-97 규정에 의하여 염화물 이온 투과성을 평가하는 것으로 하였다.

(2) 염화물이온 확산계수 산정방법

염화물이온의 확산계수는 ASTM C 1202-97에서 규정하고 있는 Fig. 2의 확산 cell로부터 시간변화에 따른 염화물이온의 투과량을 측정하여 구하는 것으로 하였다. 즉, 염화물이온의 농도변화는 확산 cell에 30V의 직류전압을 인가하여 (-)극으로부터 (+)극으로 이동한 염화물량을 선택성 이온전극으로 측정하였다.^{4),5)}



<그림-1> Schematic view of diffusion cell and experimental set-up

<표- 4> Chloride ion penetrability based on charge passed (ASTM C1202)

Charge passed (Coulombs)	Chloride ion penetrability
>4000	High
2000-4000	Moderate
1000-2000	Low
100-1000	Very low
<100	Negligible

확산 cell 1에 있던 염화물 이온은 전기적 이동을 따라 일정 기간이 경과한 후 콘크리트 내부를 투과하여 확산 cell 2 측에 도달하게 되며, 그 이후부터 확산 cell 2의 염화물이온 농도는 거의 직선적으로 변화하게 된다. 본 연구에서는 염화물이온의 농도가 직선적으로 변화하기 시작하는 직선 부분 즉, 통용 가능한 초기 직선부분의 기울기를 식 (1) 즉, 전기적 이동량을 고려한 $D_{migration}$ 의 확산계수식에 적용하여 염화물 이온의 확산계수를 산정하는 것으로 하였다.

$$D_{Cl} = \frac{RT}{Z_{Cl}FC_{Cl}} \frac{l}{\Delta E} \frac{V}{A} \frac{dC}{dt} \quad (cm^2/sec) \quad (1)$$

여기서, R : 기체상수(8.31 J/K·mol)

T : 절대온도(K)

Z_{Cl} : 염화물 이온의 원자가

F : 페러데이 상수($9.65 \times 10^4 C/mol$)

C_{Cl} : 셀의 염화물 이온농도(mol/cm^3)

ΔE : 전위차(Volt)

l : 시험체 길이 (cm)

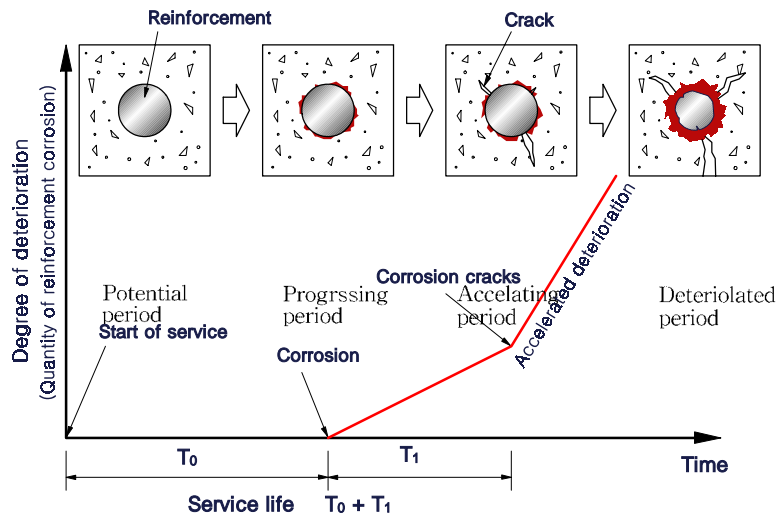
V : 확산셀 용적 (cm^3)

A : 시험체 면적 (cm^2)

$\frac{dC}{dt}$: 염화물이온 농도변화 ($mol/l \cdot sec$)

나. 수치해석 방법

외부로부터 콘크리트 내부로 염화물 이온이 침입함으로써 발생하는 해양구조물의 열화 과정은 <그림-2>에 나타낸 바와 같다. 염화물 침투에 의한 해양구조물의 열화 과정은 염화물 이온이 철근 표면에 도달하여 철근부식이 발생하기 직전까지의 기간인 잠복기, 철근부식이 시작되어 내부균열이 발생하기 전까지의 기간인 진전기, 균열이 발생하고 철근의 부식이 가속화되는 기간인 가속기, 구조물에 외향적으로 내구성에 문제가 발생하는 열화기 등 크게 4가지로 구분된다. 여기서 철근부식이 발생하는 진전기로부터 구조물의 내구성에 문제가 되는 열화기까지의 내구성 저하 문제에 대한 대처 방안은 피복의 도장 및 보강, 덧개의 보수, 전기적인 방식 방법 등 추가의 소요 비용을 요구하는 반면에 철근이 부식하기 전까지의 기간인 잠복기는 구조물 건설 당시에 재료적인 측면으로 고로슬래그 미분말이나 플라이애쉬 등과 같은 혼화제를 사용함으로써 그 기간의 연장이 가능하다.



<그림- 2> Progress of chloride-induced deterioration

본 연구에서는 구조물의 사용시기로부터 철근부식 개시시점까지의 기간 T_0 에 대한 해석을 실시하였다. 이것은 외부로부터 유입된 염화물이온이 콘크리트 구조물의 내부로 확산되어 철근의 위치에 도달하게 된 후 철근의 부식을 유발시키는 시간까지를 말한다. 일반적으로 콘크리트 내부로 유입된 염분은 시멘트 페이스트와 결합하여 콘크리트 내부에 흡착되는 고정염과 콘크리트의 공극수를 통해 이동되는 가용성 염으로 구분된다. 이들 염중 가용성염만이 철근부식에 직접적으로 관여를 하고, 고정염은 철근의 부식에 직접적으로 관여하지 않는다. 가용성 염의 침투는 일반적으로 Fick의 확산법칙을 통해 추정할 수 있지만, 고정염의 경우는 시멘트 성분과

염화물 이온의 화학반응을 고려한 특별한 식을 통해 구해야 한다. 따라서, 본 연구에서는 염분 침투 확산에 대한 정확성을 기하기 위해서 Fick의 확산식 뿐만 아니라 식(2)~(4)에 나타난 고정염에 관한 화학반응식을 고려한 물질수지식을 사용하였다. 또한 해석에 사용한 경계조건으로 식(5)~식(7)과 같이 설정하였으며, 파라미터는 <표-5>와 같다.

$$r = k_a \varepsilon f [Cl^-(aq)] ([Cl^-(s)]_{sat} - [Cl^-(s)]) - \frac{k_a}{K_{eq}} [Cl^-(s)] \quad (2)$$

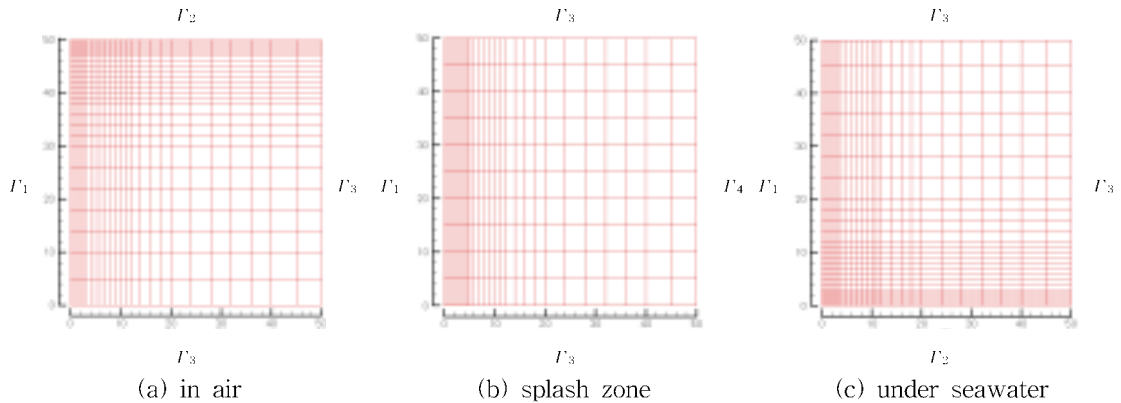
$$\frac{\partial (\varepsilon f [Cl^-(aq)])}{\partial t} = \nabla^2 (D_{e, Cl^-} [Cl^-(aq)]) - r \quad \text{in } \Omega \quad (3)$$

$$\frac{\partial [Cl^-(s)]}{\partial t} = r \quad \text{in } \Omega \quad (4)$$

$$[Cl^-(aq)] = [Cl^-(aq)]_1 \quad \text{at } \Gamma_1 \quad (5)$$

$$[Cl^-(aq)] = [Cl^-(aq)]_2 \quad \text{at } \Gamma_2 \quad (6)$$

$$\frac{d[Cl^-(aq)]}{dn} = 0 \quad \text{at } \Gamma_3, \Gamma_4 \quad (7)$$



<그림-3> Finite element mesh used

<표-5> Parameters used in calculations

Parameter	Value
pore ratio of concrete ε	0.106
friction of pore water f	1
effective absorption constant K_a	$1 \times 10^5 (\text{m}^3/\text{mol s})$
maximum fixed Cl volume $[Cl(s)]_{sat}$	$214 (\text{mol}/\text{m}^3)$
equilibrium constant K_{eq}	$1.64 \times 10^2 (\text{m}^3/\text{mol})$