염해환경하의 철도 콘크리트 구조물에 대한 내구성 설계 Durability Design for Railroad Concrete Structures subjected to Chloride Attack

송하원* 백승우** 이현정*** 이선호**** Ha-Won Song Seung-Woo Pack Hyun-Jung Lee Son-Ho Lee

ABSTRACT

Durability design as well as service life prediction of RC structures is critical for sustainable development of railroad concrete structures in marine environment. In order to predict the service life of reinforced concrete structures subjected to chloride attack, it is necessary to develop an analytical approach to predict the time and space dependent analysis on chloride penetration of concrete structures up to the durability limit state, which is defined conservatively as a time for the corrosion initiation, i.e., the time to reach the critical chloride threshold value at the surface of the rebar in reinforced concrete structures.

In this paper, a performance-based durability design method is introduced for marine concrete structures subjected to chloride attack. By using the design method, a service life design is carried out for reinforced concrete bridges exposed to marine environment. Then, a deterioration analysis due to chloride attack for service life prediction of reinforced concrete structures is also carried out. Finally, current durability design method for marine concrete structures specified in current railroad design code is analyzed. The analysis shows that correct parameters like surface chloride concentration for the seashore in Korea and chloride threshold level are necessary for accurate durability design.

1. 서론

삼면이 바다로 둘러싸인 한반도의 해안가에 콘크리트 구조물로 건설되어 공용될 철도 시설물은 주된 열화요인인 염해로 인해 조기열화가 발생하여 구조물의 내구성이 심각하게 훼손될 수 있다. 따라서 이러 한 콘크리트 철도 시설물에 대해서는 염해에 대해 구조물이 목표수명을 만족하도록 설계하고 시공전 내 구성 평가로서 열화해석을 수행하여 확보된 수명을 확인하여야 한다. 또한 최근 콘크리트 구조물의 목표 내구수명 확보를 위해 표준시방서(콘크리트표준시방서-내구성편-(2004))와 설계기준(철도설계기준 (2004))이 제정되었으며, 콘크리트 구조물의 내구성 설계에 이를 반영하고 있다.

본 논문에서는 해양환경에 노출되어 염해를 받는 콘크리트 구조물의 내구성 설계를 위해 내구성 한계 상태를 적용한 성능기반형 내구성 설계법을 제시하고 해양환경하에 건설될 콘크리트 연육교를 대상으로 이를 적용하여 그 적용방법을 설명한다. 그리고 염해를 받는 콘크리트 구조물의 내구성 평가는 시간과 공간상의 예측을 필요로 하므로 콘크리트의 초기재령 정보로부터 출발한 열화해석모델을 제시하며 대상 구조물의 염해 열화해석을 수행하여 그 타당성을 검증한다. 또한 2004년 제정되어 철도 구조물의 내구 성 설계에 활용되고 있는 철도설계기준에 따라 국내의 염해 환경하의 철도 콘크리트 구조물의 설계를 수행하여 그 적용의 한계를 밝히며 개선방법을 제시한다.

* 연세대학교 교수, 정회원
 ** 연세대학교 박사과정, 정회원
 *** 한국철도시설공단 기술개발팀 부장, 정회원

^{**** (}주)석탑엔지니어링 기술연구소 소장, 정회원

2. 철도 해양 콘크리트 구조물의 내구성 설계

2.1 내구성한계상태를 사용한 성능기반 내구성 설계

콘크리트 구조물의 한계상태는 내구성 설계 및 평가를 위해 고려되어야 한다. 그림 1에 콘크리트 구조 물의 한계상태개념에 관해 나타내었다. 콘크리트 구조물의 내구성 한계상태 (durability limit state)란 그림 1에서와 같이 열화의 개시에 초점을 두며, 이는 주요 부재에서의 열화가 개시되는 시점을 나타낸 다. 구조물의 사용수명 *t*,는 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$t_{s} = t_{start} + t_{exposure} \tag{1}$$

여기서, t_{start} 는 열화 개시시기이며, $t_{exposure}$ 는 열화 개시 후 손상이 발생하여 저항성능이 감소하는 시 기를 나타낸다.

내구성 한계상태에서는 그림 1에서와 같이 열화개시기(t_{start})에 초점을 두며, 이는 일반적으로 콘크리트 구조물내의 철근이 부식환경에 놓이게 되는 시기를 나타낸다. 그림 1에서의 예측된 구조물의 내구수명 t_s 는 설계내구수명 t_D 보다 크도록 설계해야하며, 내구성 설계개념에서 기본적인 내구성능의 검토는 다음 의 두가지 형태로 구분된다.

a) 사용수명법에 의하면, 구조물의 설계내구수명 t_D 를 결정하기 위해서 구조물의 내구수명 t_s 를 예측하고, 식(2)와 같이 목표 신뢰도에 따라 구조물의 내구성을 검토한다.

(2)

여기서, t_D 는 구조물의 설계내구수명, P_{target} 은 구조물의 목표 파괴확률을 나타낸다.

b) 한계상태법에 의하면, 설계내구수명에서 구조물의 저항성능이 환경하중을 초과하는지에 대한 검토가 필요하며 내구성 한계상태에 대한 기본적인 설계 요구치는 식 (3)과 같다.

$$R(t) \ge S(t) \tag{3}$$

여기서, *R*(*t*)는 시간 *t*에서의 구조물의 저항성능이고 *S*(*t*)는 외부 환경하중을 나타낸다. 식(3)에서의 설계 요구치를 만족시키기 위하여 식 (4)를 통해 목표 신뢰도를 검토한다.

(4)

여기서, R(t)와 S(t)를 그림 2에 나타내었다. 한계상태에 대한 구조물의 내구적 파괴확률(P_A(t))는 R(t) 와 S(t)에 대한 확률밀도함수의 겹치는 영역을 의미하며, P_A(t)는 P_{target}을 초과해서는 안된다.



그림 1. 콘크리트 구조물의 내구성에 대한 한계상태 개념(ISO/TC98, 2005)



그림 2. 사용수명 예측을 위한 수학적 모델(ISO/TC98, 2005)

2.2 성능기반형 내구성 설계 예

염해환경하에서 목표내구수명 100년으로 설정된 연육교에 대해 내구성 설계를 수행하였다. 대상 구조 물은 그림 3과 같이 염해가 주된 열화원인인 해양환경하의 교량구조물이며, 표 1과 같이 내구성 설계를 위한 환경조건은 노출 환경의 특성에 따라 수중구간, 비말대구간, 대기구간으로 분류하였고, 각 노출구간 별로 주탑, 교각, 교대 등으로 세분하여 설계를 수행하였다. 구조물의 사용기간동안의 한계상태함수 g(t)는 식 (5)와 같고, 대상구조물의 파괴확률은 신뢰성 해석에 의해 식 (6)과 같이 결정될 수 있다.

$$g(t) = R(t) - S(t)$$
 (5)

$$P_{f,t} = P\{g(t) < 0\} < P_{target} = \Phi(-\beta_{target})$$
(6)

여기서, *P_{f,l}*는 시간 t에서 내구성 한계상태에 도달할 확률, φ는 표준정규분포 함수, β_{target}은 목표신뢰 성지수를 의미한다.

성능기반형 내구성 설계의 기본조건은 '대상구조물은 목표내구수명내에 적절한 신뢰성 범위내에서 설계 시 설정된 내구적 한계상태에 도달하지 않아야 한다'는 것이다. 구체적 내구성 설계 과정(Duracrete, 2000)은 다시 여러 단계로 표 2와 같이 세분화된다. 그림 4는 성능기반형 내구성 설계 방법을 근거로 염해가 주된 열화요인인 콘크리트 연육교에 대한 내구성 설계의 각 과정에 따른 설계 결과를 보여주며, 이를 통해 도출된 구조물 중요 부위별 설계 결과 배합은 표 3에 나타내었다. 그림 4의 내구성 설계를 통해 도출된 초기확산계수 및 재령계수(age factor)를 통하여 구조물의 구체적인 설계조건(물-결합재비, 혼화재 혼입율 등)을 결정할 수 있다. 특히 초기확산계수는 물-결합재비(W/B)에, 재령계수는 혼화재(고 로슬래그, 플라이애쉬)의 혼입율의 결정에 영향을 미치게 된다.



그림 3. 내구성 설계 대상 해양 콘크리트 구조물

표 1. 대상 구조물의 염해 환경 분류

노출 구간	대상 부위	노출 환경
Submerged zone	pylon, pier	해수에 잠겨있음
Splash zone	pylon, pier	해수의 수위변화에 따 라 건습을 반복함
Atmospheric zone	pylon, pier abutment, super-structures	해수와 직접 접하지 않으며, 해양 대기 환 경에 노출된 상태

단계	항목	설계 내용
1	한계상태의 설정	$C(x,t) \ge C_{cr}$ $C(x,t)$: 예측염소이온농도, C_{a} : 임계염소이온농도
2	열화모델의 선택	$C(x,t) = C_i + (C_s - C_i) \cdot \left(1 - ert\left(\frac{x}{2\sqrt{K_e D_d t}}\right)\right)$
3	확률변수의 정량화	확률변수의 변동특성을 고려하여 정량화
4	목표신뢰도 결정에 따른 확률론적 해석 및 설계결과 도출	설정된 목표신뢰도(내구적 파괴확률 <i>P_f</i> 또는 신뢰성 지수 β) 범위내에서 구조물의 구체적인 설계조건(물-결합재비, 혼화재 혼입율 등)을 도출 <i>P</i> { <i>C_{cr}-C</i> (<i>x</i> , <i>t</i>)<0} _t ≤ <i>P</i> _{target}

표 2. 성능기반형 내구성 설계 절차(Duracrete, 2000)





Step 2: Modelling of chloride ingress

	Parameter	Unit	Exposed conditions	Structures	μ	σ
$C(x,t) = C\left[1 - arf\left[\frac{x}{x}\right]\right] \qquad (t_0)^n$			Submerged	Pylon, pier	130	13
$C(x,t) = C_s \left[\frac{1 - e_{ij}}{2\sqrt{D_s t}} \right] \qquad D_a = D_0 \left[\frac{1}{4} \right]$	x		Splash	Pylon, pier	130	13
Based on Fick's 2 nd law	Concrete cover	cm	Atmospheric	Pylon, pier (abutment /super-structures)	130 (80/50)	13 (8/5)
t : exposure period			Submerged	Pylon, pier	17 -	~ 22
r : distance from surface	D_o	$(\times 10^{-12})$	Splash	Pylon, pier	5~10	
C_s : chloride surface concentration D_0 : chloride diffusion coefficient at $t = t_0$	Chloride diffusion coefficient	m²/s	Atmospheric	Pylon, pier (abutment /super-structures)	16 ~ 21 (6 ~ 11 / 2 ~ 7)	
t_0 : reference period		-	Submerged	Pylon, pier	0.3 ~	~ 0.5
n : age factor	n		Splash	Pylon, pier	0.3 ~	~ 0.5
	Age factor		Atmospheric	Pylon, pier (abutment /super-structures)	0.3~ (0.3~0.5	~ 0.5 /0.3~0.5)
			Submerged	Pylon, pier	0.0767	-
	t		Splash	Pylon, pier	0.0767	-
	Reference time	year	Atmospheric	Pylon, pier (abutment /super-structures)	0.0767	-

Step 3: Quantification of stochastic variables

	Parameter	Exposed conditions	Structures	μ	σ
$C(x,t) = C\left[1 \text{ and } \frac{x}{x}\right]$ $D = D\left(\frac{t_0}{t_0}\right)^n t_0 t_0$		Submerged	Pylon, pier	1.32	0.22
$\begin{bmatrix} C(x,t) - C_s \\ 1 - et f \\ 2\sqrt{D_s t} \end{bmatrix} = D_a = D_0 \begin{bmatrix} \frac{1}{s} \\ t \end{bmatrix} = K_e K_c$	k _e	Splash	Pylon, pier	0.92	0.15
	Environmental factor	Atmospheric	Pylon, pier	0.92	0.15
			(abutment/super-structures)	(0.92/0.92)	(0.15/0.15)
k_e : environmental factor		Submerged	Pylon, pier		1.0
k_c : executive factor	k _c	Splash	Pylon, pier	1.0	
	Executive factor	Atmospheric	Pylon, pier	(10	1.0

Step 4:	Probabilistic	analysis	until acce	eptable p	orobability	of corrosion
		~			~	~



그림 4. 내구성 설계 절차에 따른 설계 데이터

Conditions	Structures	Cover (mm)	<i>f_{ck}</i> (MPa)	Mix type	D_{ch} (10 ⁻¹² m ² /s)	W/B (%)	Binder contents (kg/m³)			S (kg/m³)	G (kg/m³)	Admix (kg/m³)
				S-T-1	5.2	32	400	100	-	684	970	
	Pylon	130	45	S-T-2	5.4	32	400	-	100	684	970	1
Submerged				S-T-3	5.0	32	300	200	-	684	970	1
zone				S-P-1	8.5	40	327.6	93.6	46.8	627	1004	1
	Pier	130	35	S-P-2	9.1	40	327.6	46.8	93.6	627	1004	1
				SP-3	5.0	40	281	187	-	627	1004	1
				T-T-1	5.2	32	400	100	-	684	970	1
	Pylon	130	45	T-T-2	5.4	32	400	-	100	684	970	SP:
Tidal and				T-T-3	5.0	32	300	200	-	684	970	6.5~7.5
splash zone	Pier	130	35	T-P-1	8.5	40	327.6	93.6	46.8	627	1004	A.E.
				T-P-2	9.1	40	327.6	46.8	93.6	627	1004	
				T-P-3	5.0	40	281	187	-	627	1004	AE:
			0 45	A-T-1	5.2	32	400	100	-	684	970	1.0
	Pylon	130		A-T-2	5.4	32	400	-	100	684	970	1 1.0
				A-T-3	5.0	32	300	200	-	684	970	
		130		A-P-1	8.5	40	327.6	93.6	46.8	627	1004]
	Pier		35	A-P-2	9.1	40	327.6	46.8	93.6	627	1004]
Atmospheric				A-P-3	5.0	40	281	187	-	627	1004]
zone				A-A-1	12.5	42	240	120	40	787	976]
	Abutment	80	30	A-A-2	13.0	42	240	80	80	787	976]
				A-A-3	5.0	42	240	160	-	787	976]
	Suman			A-B-1	3.8	32	250	150	100	684	970]
	super	50	45	A-B-2	3.0	32	225	225	50	684	970]
	suucture			A-B-3	5.0	32	300	200	-	684	970	1

표 3. 내구수명 100년을 위해 설계된 연육교의 배합

3. 해양 콘크리트 구조물의 내구성 평가

설계된 해양 콘크리트 구조물의 보유 내구수명의 확보를 확인하기 위해서는 초기재령 콘크리트의 거동 인 공극률 및 포화도를 기본으로 하는 연성해석을 통해 염해에 대한 열화거동 해석이 필요하다. 콘크리 트의 염해에 관한 열화거동 해석에서는 수화반응, 미세공극구조형성, 열과 수분이동 그리고 이온의 확산 침투와 같은 다양한 거동 특성에 대해 모두 고려하여야 한다.

열화해석에 사용되는 지배방정식은 초기재령 콘크리트의 다상수화발열모델 및 공극구조 형성모델을 도 입하여 전체물리량(온도, 수압, 염소이온)에 대해 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다. 표 4에는 질량보존법칙 에 근거한 각 항의 구성성분을 정의하였다. 표 4에 제시된 질량에너지 보존식에 있어서 각 항에 대한 구 체적인 설명은 기존 문헌(Song et al., 2006)을 참고하도록 한다.

$$\frac{\partial \mathfrak{a}_i(X_i)}{\partial t} + div J_i(X_i, \nabla X_i) - Q_i(X_i) = 0$$
(7)

X_i	비용량 @ _i	플럭스 J_i	생성·발산항 Q_i
	ρ <i>C [Kcal/K.m^³]</i>	$-K_H \bigtriangledown T_{[Kcal/m.s]}$	Q _H [Kcal/m'.s]
	- Constant	- Constant	 Multi component heat of hydration model of cement
	φρ∂S/∂P [kg/Pa.m']	$-(K_{l}+K_{v}) \bigtriangledown P_{[kg/m^{\prime}.s]}$	$-Q_{hyd} - \partial(\rho S \phi) / \partial t [kg/m^{2}.s]$
P	- Path dependent moisture isotherms	- Random geometry of pores and Knudsen vapor diffusion	 Water combined due to hydration; bulk porosity change effect
	$\Phi S \ [mol.l/mol.m^{i}]$	$\Phi S(-D_{Cl} \nabla C_{conc} + q_s C_{Cl}) [mol/m^*.s]$	Q _{CI} [mol/m [*] .s]
C _{CI}	- Path dependent	- Chloride diffusivity with function of porosity	- Bounded chloride ion along with
		- Diffusion and convection	Freundlich isotherm

표 4. 질량에너지 보존식에 있어서 각 항(Song et al., 2006)

3.1 균열을 고려한 염소이온 확산-침투 모델

균열을 갖는 콘크리트의 염소이온 확산거동은 건전한 콘크리트와는 많은 차이가 있으며, 일반적으로 균 열의 존재는 콘크리트의 침투와 확산계수를 크게 증가시키게 된다. 또한 손상을 통해 콘크리트에 균열이 발생할 경우 균열면을 따라 국부적으로 확산계수 증가현상이 나타나며 이로 인해 부분적으로 침투깊이 가 급속히 증가하게 된다. 본 모델에서는 이를 반영하기 위하여 균열을 가진 콘크리트의 대표체적요소 (REV)를 사용한 평균화기법에 의해 균열이 있는 콘크리트에서의 등가 염소이온 확산계수 D_d^{eq} 를 식(8)과 같이 구하였다.

$$D_{cl}^{eq} = \left(\frac{\Omega D_{crack}}{R_a \Theta} + D_{cl}\right)$$
(8)

여기서, *R*a는 REV내 균열부의 전체 면적비, *D*_{crack}은 균열면에서의 확산계수, Ω는 공극구조의 굴곡도, $\Theta(\Theta=\phi S)$ 는 액상의 체적비이다.

그림 5는 REV 균열모델과 염소이온 확산-침투모델로부터 구해진 각기 다른 균열폭에 따른 결과들을 도시한 것이다. 식(8)의 염소 이온 확산계수는 Nernst-Planck's 식과 Debye-huckel 이론에 근거한 온 도, 골재함수상태, 습도를 고려한 식(9)로 표현되어질 수 있다.

$$D_{cl} = D_{cl_{ref}} \cdot f_1(g_i) \cdot f_2(T) \cdot f_3(h)$$
(9)

여기서, $D_{d_{rg}}$ 는 염소이온 확산계수, $f_1(g_i)$ 는 골재함수상태, $f_2(T)$ 는 온도함수, $f_3(h)$ 는 습도함수이다.



그림 5. 균열 콘크리트에서의 대표체적요소 균열모델과 등가 확산성(Song et al., 2006)

3.2 염해 내구성 평가 예

본 절에서는 염해 내구성 설계가 적용된 연육교를 대상으로 내구성 평가를 수행하였다. 즉 염해에 관한 다양한 미세환경조건에 따라 콘크리트 표면으로부터 깊이에 따른 염소이온 침투 해석을 수행하여 염해 에 대한 내구수명 100년을 만족하는지 검토한다. 구조물 외부의 환경조건은 수중구간, 비말대구간, 대기 구간 등의 3구간으로 분류하여 표 5과 같이 정하였다.

그림 6은 표 1의 해양환경 조건에 노출되어 100년이 경과하였을 때의 콘크리트 표면으로부터 거리에 따른 총 염화물량의 분포를 나타낸다. 임계염소이온농도는 1.2kg/m³로 설정하였으며, 이 경우 연육교는 모든 구간에 대해내구수명 100년을 만족하게 된다.

Environmental conditions	Surface chloride concentration (mol/l)	Temp (°C)	External R.H. (%)
Submerged zone	0.51	13	100.0
Tidal and splash zone	0.51	13	83.9
atmospheric	0.51	13	67.8

표 5. 대상구조물의 염소이온침투해석을 위한 환경조건





(c) Chloride distributions at atmospheric zone그림 6. 연육교의 염소이온 분포 해석결과(100년)

4. 철도 염해 내구성 설계 기준 분석

4.1 철도 내구성 설계기준의 개요

2004년 개정된 철도설계기준(철도교편, 건설교통부)에는 '염해에 대한 내구성설계' 항목이 일본토목학회 에서 개정된 콘크리트표준시방서:시공편(내구성조사형, 2003)에 근거하여 추가되었으며, 이에 대해 개략 적으로 살펴보면 표 6과 같다.

표 6에서 알 수 있듯이 염해 내구성 평가식을 비롯하여 임계 염소이온농도(*C*_{lim}), 표면 염소이온농도 (*C*₀), 염소이온 확산계수(*D*_p)와 같은 주요 염해 설계변수 등이 일본토목학회 내구성조사형 시방서와 동 일함을 알 수 있다. 또한 2004년 한국콘크리트학회에 의해 제정된 콘크리트 표준시방서(내구성편)은 일 본토목학회의 내구성 시방서의 개념을 도입하였으나 콘크리트 구조설계기준(2003)의 설계개념인 강도설 계법에 기반을 둔 내구성 평가식을 제시하였다는 점에서 차이가 있다.

		$\operatorname{g} \frac{C_d}{C_{\lim}} \leq 1.0$								
허보드페			γ; 구조계수, 일	반적으로 1.0, 중	요 구조물에 1.1					
피폭구께 산정식			C _{lim} : 임계 염소	이온농도, 일반적으	으로 1.2 kg/m ³					
		C_d : 염소이온농도의 설계값, $C_d = \chi_{cl} \cdot C_0 \left(1 - ert\left(\frac{c}{2\sqrt{D_d} \cdot t}\right)\right)$								
		C ₀ : 표면 염소이온농도, D _d : 염소이온 확산계수의 설계값								
			해안선으로부터의 거리(km)							
표면염소이온농도		E	미 달 대	해안선 근처	0.1	0.25	0.5	1.0		
		13.0	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5			
① 보통포틀랜드시멘트를 사용하는 경우										
염소이온			$\log D_p = [4.5]$	$(\mathcal{WC})^2 + 0.14(\mathcal{WC})^2$	Ċ)−8.47]+ log(3.1	4×10 ⁷)				
확산계수			② 고로슬래그시	멘트를 사용하는	경우					
			$\log D_p = [19.5]$	5(<i>W/C</i>) ² -13.8(<i>W</i> /	C) - 5.74] + log(3.	.14×10 ⁷)				

표 6. 철도설계기준의 염해 내구성 설계 항목(건설교통부, 2004)

4.2 철도 내구성 설계 기준의 적용

철도설계기준에서 제시하는 규정에 의거하여 해안으로부터 250m, 500m, 1000m거리에 건설될 콘크리 트 구조물에 대해 목표내구수명 100년을 만족시키는 설계 피복두께를 산정한 결과를 다음의 표 7에 나 타내었다. 표 7로부터 통상적으로 설계에 적용되는 피복두께로는 해안으로부터 1km에서도 내구성을 거 의 만족시킬 수 없고, 100년을 만족하는 피복두께는 구조물의 부위에 따라 현실적으로 설계 및 시공이 불가능한 값임을 알 수 있다.

	_	일반	해안으로부터의 거리에 따른 소요피복두께(cm)						
구 분	f _{ck} (MPa)	피복두께	일반	일반 포틀랜드 시멘트			고로슬래그 시멘트		
		(cm)	250m	500m	1,000m	250m	500m	1,000m	
상부 바닥판	27	5.0	21.0	15.0	9.5	13.0	9.5	6.5	
PSC Beam	35	4.0	14.0	10.0	7.0	9.5	7.0	5.5	
PF Beam	40	5.0	12.0	9.0	6.5	9.0	7.0	5.0	
하부구조	27	10.0	21.5	15.5	10.0	13.5	10.0	7.0	
옹벽 및 하수	24	8.0	27.5	19.5	12.5	18.5	13.5	9.0	

표 7. 해안가 철도구조물별 설계피복두께(목표내구수명: 100년)

즉, 염해 내구성 설계를 통해 동해안에 근접한 해안 철도 구조물에 대해 피복두께를 산정해 본 결과, 상당수의 구조물이 현재의 구조설계기준에 따르면 100년의 목표내구수명을 만족시킬 수가 없으며, 100 년을 만족시키기 위해 도출된 설계피복두께는 비현실적인 피복두께를 제시한다.

4.3 현행 내구성 설계 기준의 문제점

이상과 같은 현행 철도 내구성 설계 기준의 문제점은 다음과 같다.

(1) 부적절한 표면염소이온농도

그림 7은 각각 동, 서해안의 한 지역에 대하여 거리별 비래염분량(이종석 등, 2005)을 나타낸 것으로, 동, 서해안의 해안으로부터의 비래염분량은 실제적으로 각기 다른 분포를 보이고 있음을 알 수 있다. 현 재 건설교통부 및 관련 공사 등에서 사용되고 있는 콘크리트 구조물의 내구성 설계 및 평가 기준 혹은 시방서는 각기 다른 해안 환경(동,서,남해안)의 차이점을 고려하지 않은 표면염소이온농도를 사용하여 실 제 환경과 차이가 나는 염해환경을 적용하게 되므로 실제 설계시 목표 내구성능의 정확한 산정이 어려 운 실정이다.



그림 7. 해안으로부터의 거리별 비래 염분(이종석 등, 2005)

(2) 불확실한 임계염소이온농도

그림 8은 환경조건에 따른 임계염소이온농도 변화를 보여주고 있다. 그림 8과 같이 철근 부식을 발생 시키는 임계염소이온농도가 구조물이 처한 다양한 환경조건에 의해 변화하고 있으나, 국내 구조물의 설 계 및 평가시에 이러한 사항이 전혀 고려되지 않고, 외국의 기준인 1.2 kg/m³의 값을 그대로 인용하고 있는 실정이다.



그림 8. 환경조건에 따른 임계염소이온농도의 변화(Gehlen et al., 1999)

(3) 기타 문제점

현재 설계기준에서는 염해 내구성 평가식에 적용되는 안전율의 개념으로서 구조계수(x)를 제안하였다. 그러나 이는 일본의 기준으로부터 차용한 값으로서 콘크리트 구조물의 신뢰성 측면에서 재검토되어 새 로이 정립되어야 할 필요가 있으며, 표 6에서 알 수 있듯이, 현재의 기준에서는 콘크리트의 중요한 내구 성능 지표인 염소이온 확산계수에 대한 예측식이 일본의 데이터에 근거하여 물-시멘트비(W/C)에 대해 보통 포틀랜드 시멘트와 고로슬래그 시멘트의 두가지 경우만 제시되어있다. 이는 국내에서 제조된 콘크 리트의 다양한 배합을 고려하지 못하여 실질적인 국내산 콘크리트의 내구성능을 제대로 반영하지 못하 므로 이에 대한 개선이 필요하다. 또한 현재 설계기준에서 콘크리트의 확산계수는 재령 28일의 값을 설 계값으로서 사용하지만, 콘크리트의 장기적인 수화반응으로 인해 초기 염소이온 확산계수는 일반적으로 재령에 따라 감소하게 된다. 따라서 재령에 따른 콘크리트 내부 구조변화에 의한 염소이온 확산계수의 변화를 반영하는 재령계수(age factor)의 적용을 고려하여야 한다.

5. 결론

염해 환경하의 철도 콘크리트 구조물에 대한 내구성 설계에 관한 연구를 통한 결과는 다음과 같다.

 본 논문에서는 철도 콘크리트 구조물의 목표내구수명을 보유하도록 설계하기 위하여, 내구성 한계상 태를 이용한 성능기반 내구성 설계라는 진보된 설계개념을 제시하였다. 이 설계기법은 현재까지 개발된 내구성 설계법 중에서 구조물의 성능을 기반으로 개발된 최신의 설계법이며, 대상구조물이 처해있는 환 경에 대해 미세환경조건으로 세분하여 각 부위별 정확한 내구설계가 가능한 우수한 설계법이다. 본 논문 에서 이를 이용하여 염해 환경하의 콘크리트 구조물의 내구성 설계를 수행하였다.

2) 내구성 평가는 시공전 수행하여 내구성 확보를 확인하는 작업으로서 해양환경하의 철도 콘크리트 구 조물의 내구성 평가를 위해 초기재령 콘크리트의 다상수화발열모델 및 공극구조 형성모델을 도입하여 시공간상의 염소이온 침투 모델에 따른 열화 해석이 필요하다. 본 논문에서는 개발된 열화 해석을 내구 성 설계된 콘크리트 구조물에 적용하여 시공전 내구성 평가가 가능함을 보였다. 3) 대한민국의 철도설계기준(2004,건설교통부)에 제시된 염해 내구성 설계 항목을 분석하였다. 그 결과 해안가 철도 구조물의 설계단계에서부터 합리적인 내구적 안전율, 콘크리트 표면염소이온농도 및 임계염 소이온농도와 같은 염해 관련 설계 변수에 대해 우리나라 해안가의 염해 환경을 정확히 반영하여 결정 하는 것은 해안환경의 철도구조물의 내구성 설계에 있어서 필수적임을 제안하였다.

감사의 말씀

본 연구는 2006년 한국철도시설공단 기술본부의 연구비 지원사업에 의해 수행되고 있는 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

건설교통부 (2004), 철도설계기준(철도교편)

건설교통부 (2003), 콘크리트구조설계기준

- 건설교통부 (2004), 콘크리트표준시방서(내구성편)
- 이종석, 최원성, 김성욱, 문한영 (2005), 해안 지역별 비래염분의 분포 특성, 대한토목학회 정기학술대회, pp. 2308-2311
- 日本土木學會(2003), コンクリト標準示方書[施工編]
- ISO/TC98 (2005), General Principles on the Design of Structures for Durability, ISO/WD 13823
- C. Gehlen and P. Schiessl (1999), Probability Based Durability Design for the Western Scheldt Tunnel, Proceeding of the Workshop on Durability of Concrete, Berlin, German, June, pp. 1-20
- DuraCrete Final Technical Report (2000), Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures, Document BE95-1347/R17, European Brite-Euram Programme
- H.-W. Song, C.-H. Lee, H.-J. Kim, S.-J. Kwon, S.-W. Pack and K.J. Byun (2005), Service Life Design of Durability and Safety of Reinforced Concrete, Proceedings of an International Workshop on Durability of Reinforced Concrete under Combined Mechanical and Climatic Loads, Qingdao Technological University, Qingdao, China, October 27-28, pp. 15-26
- H.-W. Song, S.-J. Kwon, K.J. Byun and C.-K. Park (2006), Predicting Carbonation in Early-aged Cracked Concrete, Cement and Concrete Research, in press