

# 염해를 고려한 콘크리트 구조물의 내구성 설계

## Performance Based Durability Design of Concrete Structures for Chloride Attack



김영근\*

Young-Geun Kim



조병영\*\*

Byoung-Young Cho

### 1. 머리말

콘크리트 구조물의 일반적인 사용 수명은 70년에서 100년으로 알려져 왔고, 철근콘크리트 구조는 내구성, 내화성 및 내진성이 우수한 공법으로 건축 및 토목 구조물에 주로 적용되었다.

그런데 최근 국내·외에서 철근콘크리트 구조물의 내구성 저하와 관련한 피해의 심각성이 크게 대두되고 있는 것 중의 하나인 염해는 콘크리트 구조물의 조기 성능 저하와 구조적 안전성 및 사용 수명 저하에 치명적인 원인이 되고 있다.

국내의 경우 1990년대 초 대규모 신도시 건설에서 시멘트, 골재 등 건설자재의 부족으로 인하여 일부 세척 상태가 미흡한 바닷모래의 사용이 콘크리트 내부의 철근을 부식시키는 원인으로 알려지게 되면서 염화물에 의한 콘크리트 구조물의 조기 열화 문제가 사회적으로 이슈화되기 시작되었으며, 최근에는 국토의 효율적 이용을 위하여 해양개발에 대한 필요성이 대두되면서 서해대교, 영종도신공항 및 거가대교(부산가덕도-거제간 해저 침매 및 사장교, <그림 1> 참조)가 해양환경하에서 대규모로 건설되는 등, 이에 따라 철근콘크리트 구조물의 염해에 대한 내구 성능 설계가 중요성을 더하고 있다.

따라서 본고에서는 염해 환경하에 있는 철근콘크리트 구조물의 염해 성능 향상을 위한 내구 성능 설계 방법 및 염해 예측 기법에 대하여 중점적으로 고찰 하였다.

### 2. 콘크리트 염화물 및 염해의 분류

#### 2.1 염화물의 유입 경로

콘크리트 내부로의 염화물 유입 경로는 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 첫째는 콘크리트 제조단계에서 염분이 함유된 바닷모래를 사용하거나 또는 화학혼화제, 혼합수, 시멘트 등과 같이 재료에 의해 콘크리트에 포함되는 경우, 둘째는 구조물이 완성된 후 해수의 염분이 침투되거나 해염입자가 콘크리트 표면에 부착하여 흡수와 확산에 의해 콘크리트 내부로 침투되는 경우이다. 이외에도 동절기에 도로에서 눈이나 얼음을 녹일 목적으로 사용하는 염화칼슘(CaCl<sub>2</sub>) 등과 같은 용설제, 세설제가 콘크리트 내부로 침투되는 경우가 있다.

이상과 같이 콘크리트 제조시 처음부터 염분이 함유된 것을 내부 염화물, 구조물이 완성된 후에 침투되는 경우를 외부 염화물이라 하며 염해 문제를 다룰 때 엄밀히 구별하여 접근하여야 한다.



① 3주탑사장교      ② 2주탑사장교      ③ 침매터널

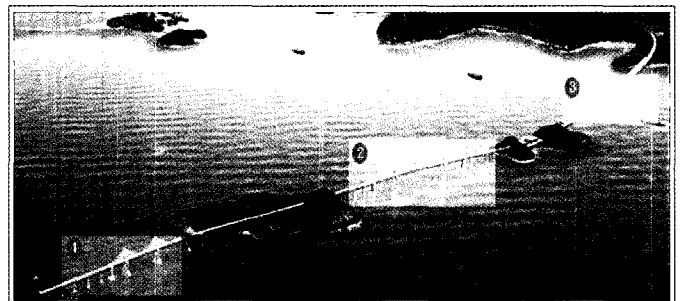


그림 1. 거가대교 조감도(2010년 12월 준공 예정)

\* 정회원, 한국건축자재시험연구원 연구개발부장  
Ygkim@kicm.re.kr

\*\* 정회원, 한국건축자재시험연구원 선임연구원

표 1. 각국의 염화물이온량 규정

국가	규격	염화물량 기준
미국	ACI 301-72	염화칼슘(CaCl <sub>2</sub> )의 혼입은 시멘트 질량의 2% 이하
	ACI 318-83	시멘트 질량에 대한 가용성 염화물량(Cl <sup>-</sup> ) 1) RC : 염분 환경 : 0.15%, 일반 환경 : 0.30%, 건조 환경 : 1.00% 2) PC : 0.06% 이하
	ACI 222R-85	시멘트 질량에 대한 경화 후 산 추출 염화물량(Cl <sup>-</sup> ) 1) RC : 0.08% 2) PC : 0.20%
유럽	BS EN 206-1-2000	최대 Cl <sup>-</sup> 함량(시멘트 질량 %)으로 규정함 무근콘크리트 : 1.0% 일반 RC : 0.02% 또는 0.04% 프리스트레스트 콘크리트 : 0.10% 또는 0.20%
	JASS5-1991	1) 콘크리트에 함유된 염화물량(Cl <sup>-</sup> ) : 0.3 kg/m <sup>3</sup> 이하 2) 규제를 초월하는 경우는 방청상 유효한 대책을 강구하고 그 방법은 특기에 따른다. 단, 그 경우에 있어서도 염화물량은 0.6 kg/m <sup>3</sup> 을 넘지 않아야 한다.
일본	콘크리트 표준시방서	콘크리트에 포함된 염화물량(Cl <sup>-</sup> )은 0.3 kg/m <sup>3</sup> 이하, 부득이 초과한 경우는 방청상 유효한 대책을 강구하고 그 방법은 특기에 따른다. 단, 이 경우에서도 염화물은 0.6 kg/m <sup>3</sup> 을 초과하면 안 된다. 1) 굳지않은 콘크리트 중의 전 염화물이온량은 원칙적으로 0.30 kg/m <sup>3</sup> 이하로 한다. 2) 외부로부터 염화물이온의 침입이 우려되지 않는 철근콘크리트나 포스트텐션방식의 프리스트레스트콘크리트 및 가외철근을 갖는 무근콘크리트 등의 경우로서 염화물이온량이 적은 재료의 입수가 매우 곤란한 경우에는 책임기술자 또는 구입자의 승인을 얻어 콘크리트 중의 전 염화물이온량의 허용상한치를 0.60 kg/m <sup>3</sup> 로 할 수 있다. 3) 재령 28일이 경과한 굳은 콘크리트의 수용성 염화물이온량은 다음의 값을 초과하지 않도록 하는 것이 좋다.

굳은 콘크리트의 최대 수용성 염화물이온량

한국	콘크리트 표준시방서	부재의 종류	콘크리트 속의 최대 수용성 염화물 이온량(%) (시멘트 질량에 대한 비율)
		프리스트레스트콘크리트	0.06
		염화물에 노출된 철근콘크리트	0.15
		건조한 상태이거나 습기로부터 차단된 철근콘크리트 <sup>1)</sup>	1.0
		그 밖의 철근콘크리트 구조	0.30
		주 1) 외부 대기조건에 노출되지 않고 습기로부터 차단된 건조한 상태의 실내 구조체의 콘크리트	
	KS F 4009	콘크리트 중량에 대하여 염소이온으로 0.3 kg/m <sup>3</sup> 이하 단, 구입자의 승인을 얻은 경우에는 0.6 kg/m <sup>3</sup> 이하로 할 수 있다.	

콘크리트와 관련하여 염화물량의 규정은 국가 마다 조금씩 다르고, 원재료에서의 염분량과 콘크리트 중의 염분량으로 하여 규제하는 경우로 크게 구분되며 표현방식도 다양하다(표1 참조).

2.1.1 내부 염화물

내부 염화물은 콘크리트 제조시 혼합되는 골재, 화학혼화제, 혼합수 및 시멘트 등에 포함되어 있는 염화물이 콘크리트 내에 유입되는 것으로서 내부 염화물은 콘크리트 내에 균일하게 분포하며 염화물량은 시간이 경과하여도 크게 변화하지 않지만 구조물에 미치는 영향은 상당히 큰 것으로 알려져 있다.

바닷모래의 염분은 약 3%의 염분농도를 가진 바닷물에 기인되며 모래 자체의 함수율에 따라 변화하며, 바다에서 채취된 직후의 모래는 함수율이 약 10%이며 염분(NaCl)은 약 0.3% 정도이다.

2.1.2 외부 염화물

해양 및 항만구조물 등과 같이 해수에 직접 노출된 콘크리트 구조물은 외부에서 침투되는 염분이 많기 때문에 시간이 경과함에 따라 콘크리트 내부에 염화물이 다량 축적된다.

또한 해안주변에 건설된 콘크리트 구조물은 해수 중의 염분이 비산하여 콘크리트 표면에 흡착하여 침투함으로써 콘크리트의 내구성을 저하시킨다.

해염입자의 크기는 해상에서는 약 3~18 $\mu$ m 정도의 크기이고 비산하여 육지로 이동하면서 염분의 입자가 약 0.03~0.6 $\mu$ m 정도의 크기로 작게 되는 경향이 있다. 해안에 건축된 철근콘크리트 구조물은 비산염분에 의하여 경과 년수에 따라 더 많은 염분이 콘크리트 중에 축적되며 그 양은 부위에 따라 콘크리트 제조시의 각 재료로부터 혼입된 염분량의 수배에 까지도

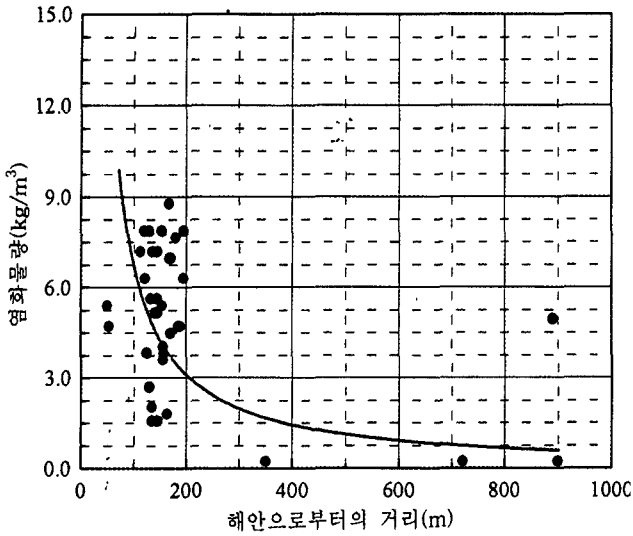


그림 2. 해안으로부터 거리에 따른 염화물량(동해안 실측치)

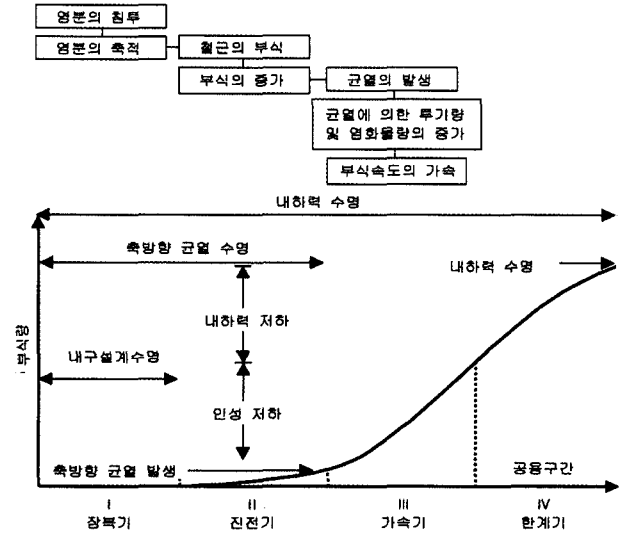


그림 3. 염해 열화의 진행 과정

이르게 된다. 일반적으로 대기 중의 비산염분량은 육지 방향으로 해안에서 200m 부근까지는 많고 300~400m 부근에서 급격히 감소하는 경향이 있다(표 2, 그림 2 참조).

2.2 염해 단계의 분류

콘크리트에 균열이 발생하지 않았거나 특별한 상황을 제외한 다면 염해에 의한 철근콘크리트 구조물의 성능저하는 부식량을 지표로 하여 <그림 3>와 같은 과정으로 모델링 할 수 있다.

- 1) I 잠복기( $t_{\Delta_1}$ ) : 콘크리트 내부로 외부 염화물이온의 침입 및 철근 근처에서 부식 발생 한계량까지 염화물이온의 축적 단계
- 2) II 진전기( $t_{\Delta_2}$ ) : 철근의 부식 개시로부터 부식균열 발생까지의 기간
- 3) III 촉진기( $t_{\Delta_3}$ ) : 부식균열 발생 이후 부식속도가 증대하는 기간
- 4) IV 한계기( $t_{\Delta_4}$ ) : 부식량이 증가하여 부재로서의 내하력에 영향을 미치는 단계

3. 확산법칙에 기초한 염해 내구성설계

3.1 잠복기와 임계염화물량

염해에 의한 성능 저하 진행 단계 중 잠복기는 콘크리트 구조물의 공용개시 후부터 콘크리트 내부의 철근이 부식되기 시작할 때까지의 기간으로 정의된다.

콘크리트 내부의 철근이 부식되는 시점을 정확히 설정하는 것은 매우 어려운 문제이지만 일반적으로 철근 부근에서 콘크리트 내부 염화물량이 부식임계량을 초과하게 되면 철근 부식이 개시되는 것으로 알려져 있다. 따라서 잠복기의 기간을 결정하게 되는 중요한 요인은 콘크리트 내부로의 염화물이온 침투 속도와 콘크리트 표면으로부터 철근까지의 깊이인 피복두께라 할 수 있다.

콘크리트 중 철근에 부식을 발생시키는 임계염화물량에 있어서는 염화물이온 농도로 시멘트 질량의 0.4% 정도 또는 콘크리트 용적에 대하여  $1.2 \text{ kg/m}^3$ 에 상당하는 값으로 보고되고 있으며, 이러한 철근 부식 임계염화물량에 관한 정확한 값을 적용하는 것은 어려운 상황이지만 철근 표면 위치에서 콘크리트 내부의 염화물량이 상기의 값에 도달하면 철근의 부식이 발생할 확률이 매우 높게 되는 것으로 알려져 있다(그림 4 참조).

현재 콘크리트 표준시방서 내구성편에서는 철근부식 임계염화물이온 농도를  $1.2 \text{ kg/m}^3$ 로 제안하고 있으며, 염화물이온 침

표 2. 콘크리트 표면의 염화물이온 농도  $C_0(\text{kg/m}^3)$ 의 제안값

구분	해안으로부터의 거리(km)				비고				
	간만대	비말대	해상대 기중	해안선 부근	0.1	0.25	0.5	1.0	
-	-	-	-	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5	콘크리트 표준시방서
서·남해안	20.0	5.0	2.5	2.5	2.0	1.5	-	-	
동해안	-	13	11.7	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5	한국도로공사

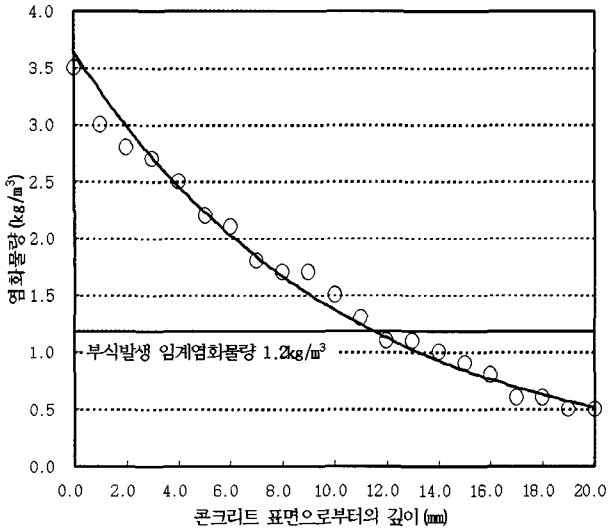


그림 4. 겉보기 염화물이온 확산계수에 의한 프로파일

투에 의한 콘크리트 구조물의 내구성은 식(1)에 의해 평가한다.

$$\gamma_p C_d \leq \Phi_k C_{lim} \quad (1)$$

- 여기서,  $\gamma_p$  : 염해에 대한 환경계수, 일반적으로 1.11
- $\Phi_k$  : 염해에 대한 내구성 감소계수, 일반적으로 0.86
- $C_{lim}$  : 철근부식이 시작될 때의 임계염화물이온 농도, 일반적으로  $1.2 \text{ kg/m}^3$
- $C_d$  : 철근위치에서 염화물이온 농도의 예측값

### 3.2 염화물이온의 확산

콘크리트 내부로의 염화물이온 침투속도를 산정하는 방법으로 염화물이온의 확산을 고려하는 방법이 적용되고 있으나, 이는 콘크리트 내부로의 염화물이온 침투가 해수와 같이 염화물 이온이 용해되어 있는 용액의 침투, 염화물이온의 콘크리트 내·외부 농도차에 의한 확산 및 시멘트 수화물에 의한 염화확산 이온으로서 콘크리트 내부로의 염화물이온 침투를 명확히 설명하기는 곤란하다.

- 1) 염화물이온 확산이론은 어떤 의미로 매크로적인 관점에서 수식 계산에 의해 수행되는 것이라고 할 수 있으며, 겉보기 확산계수를 구함으로써 향후 염화물량에 대한 예측이 가능할 수 있다.
- 2) 콘크리트와 같은 시멘트계 재료에 있어서 염화물이온 확산계수는 정상상태 및 비정상상태로 구분하여 염화물이온의 확산을 가정하여 평가 할 수 있다. 콘크리트는 다양한 재료로 구성된 복합재료로 염화물이온의 확산과정을 수학

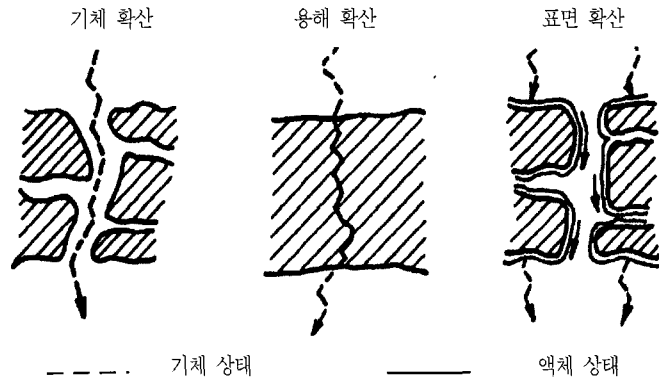


그림 5. 확산의 종류

적 공식으로 평가한다는 것은 한계점이 있다.

- 3) 예를 들어, 염화물이온 확산에 있어 일반적으로 적용되고 있는 Fick의 법칙에 있어서도 염화물 이온이 함유된 골재나 화학혼화제 등에 의해 콘크리트에 내재되어 있는 내부 염화물에 대해서는 고려하고 있지 않다. 또한 이와 유사한 염화물이온 확산의 평가를 위한 각종 모델들은 염화물이온과 대기 중의 이산화탄소가 콘크리트 내부로 침투함으로써 발생하는 복합적인 화학적 상호작용을 설명하지 못하는 한계점도 있다.
- 4) 이러한 한계점에도 불구하고 Fick의 법칙에 근거한 염화물이온 확산에 관한 모델들이 콘크리트 내부로 침투되는 염화물이온의 확산에 있어 실제 구조물과 유사한 상황으로 평가하고 있는 실정이다.
- 5) Fick의 법칙과 같은 수학적 모델의 적용이 실제 건설현장에서 난해하게 받아들여질 수 있지만 다른 어떤 방법보다 현실적이고 효과적으로 실제 콘크리트 구조물에서 염화물 이온의 확산을 평가할 수 있는 방법으로서 콘크리트 구조물 내부로의 염화물이온 침투속도를 예측하는데 용이하기 때문이다.

따라서 콘크리트 구조물을 정상상태로 가정할 경우는 모든 구간에서 콘크리트 내부를 통과하는 염화물이온의 이동은 확산 방향으로 일정하게 유지되며, 염화물이온의 확산은 콘크리트 내부의 어떤 지점에서도 변화되지 않고 일정하게 유지되는 것으로 하여 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 콘크리트 내에서의 염화물이온 침투는 Fick의 제 2법칙을 적용할 수 있다.
- 2) 콘크리트 표면에서의 염화물이온 농도  $C_0$ 는 일정하게 유지된다.
- 3) 염화물이온 확산계수는 시간에 대해 일정하다.

### 3.3 염해 내구 성능 설계

콘크리트의 염해에 대한 내구성의 평가는 일반적으로 식 (2)와 같이 염화물이온의 확산계수로 평가 할 수 있다.

$$\gamma_p D_p \leq \Phi_k D_k \quad (2)$$

- 여기서,  $\gamma_p$  : 염해에 대한 환경계수, 일반적으로 1.11
- $\Phi_k$  : 염해에 대한 내구성 감소계수, 일반적으로 0.86
- $D_k$  : 콘크리트의 염화물이온 확산계수의 특성값  
( $\text{cm}^2/\text{년}$ , 또는  $\text{cm}^2/\text{sec}$ )
- $D_p$  : 콘크리트의 염화물이온 확산계수의 예측값  
( $\text{cm}^2/\text{년}$ , 또는  $\text{cm}^2/\text{sec}$ )

콘크리트 구조물을 비정상상태로 가정할 경우 콘크리트 내부로의 염화물이온 침투는 실제 콘크리트 구조물에서 발생하게 되는 상황에서 염화물이온 확산은 콘크리트 표면으로부터의 거리에 따라 변화하게 된다.

이러한 비정상상태의 염화물이온 확산 평가에 있어서 일정 농도의 염수에 콘크리트 시험체를 침지한 후 침투깊이별 염화물량을 평가하거나, 대기환경에서의 폭로시험 등에 의한 평가 방법이 활용되고 있으며, 실제 콘크리트 구조물로부터 채취한 시료의 침투깊이별 염화물량을 평가함으로써 향후 대상 구조물의 염화물이온 침투를 예측할 수 있는 방법으로도 적용될 수 있다. 또한 비정상상태의 염화물이온 확산계수의 평가에는 일반적으로 식(3)과 같은 Fick의 제 2법칙을 유한요소법 또는 유한차분법을 사용하여 구한다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) \quad (3)$$

- 여기서,  $C$  : 콘크리트 표면으로부터의 깊이  $x$ 에서 염화물이온 농도( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
- $D$  : 염화물이온 확산계수( $\text{cm}^2/\text{sec}$ )
- $t$  : 재령(sec)
- $x$  : 거리(cm)

식(3)은 식(4)와 같이 오차함수(error function)를 도출하기 위하여 초기 조건 및 경계 조건을 적용함으로써 염화물이온 확산계수를 평가할 수 있게 된다.

- $C = 0, x > 0 \ \& \ t = 0$  (초기조건)
- $C = C_0, x = 0 \ \& \ t > 0$  (경계조건)

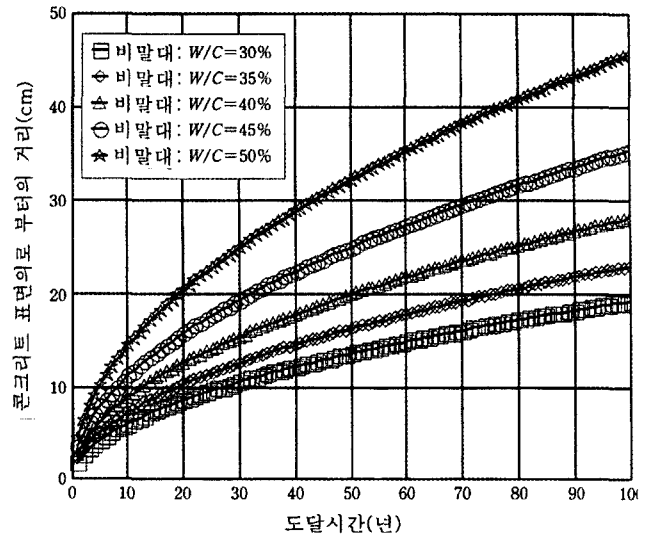


그림 6. 염화물이온 1.2 kg/m<sup>3</sup>의 도달시간

$$C(x, t) = C_0 \left( 1 - \text{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right) \quad (4)$$

- 여기서,  $C(x, t)$  : 콘크리트 표면으로부터의 깊이  $x$ , 재령  $t$ 에서의 염화물이온 농도(%)
- $C_0$  : 콘크리트 표면의 염화물이온 농도(%)
- $x$  : 콘크리트 피복두께(cm)
- $t$  : 재령(sec)
- $D$  : 염화물이온 확산계수( $\text{cm}^2/\text{sec}$ )

이상과 같은 법칙을 활용하여 콘크리트 내부로 침투한 염화물이온이 철근의 부동태 피막을 파괴하는 한계치, 즉 부식발생

임계염화물량에 도달했을 때를 철근의 부식이 개시되는 시점으로 가정하면 콘크리트 내부 철근의 부식개시 시기  $t_{cr}$ 은 식(5)와 같이 표현할 수 있게 된다.

$$t_{cr} = t \text{ 이 때 } C(x, t) = C_{Lim} \quad (5)$$

여기서,  $C_{Lim}$ 는 부식발생 임계염화물량을 나타내며,  $C(x, t) = C_{Lim}$ 로 될 때 즉, 콘크리트 표면으로부터의 깊이  $x$ 는 철근의 피복두께를 의미하게 되며,  $t$ 는 철근의 피복두께에 있어서 염화물이온량이 부식발생 임계염화물량에 도달하는 시점으로 예측되는 것이다(그림 6 참조).

식(3) 및 식(4)는 벽이나 슬래브 부재와 같이 염화물이온의 침투가 1차원으로 이루어질 경우에는 적용이 가능하지만 염화물이온의 침투가 2차원 확산으로 이루어지는 경우에는 적용이

불가능하게 된다. 이에 따라 2차원 확산에 의한 염화물이온 침투를 받게 되는 경우에는 x방향과 y방향으로의 확산에 있어서 식(6)과 같이 수정 할 수 있다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) \quad (6)$$

또한, 식(7)은 오차함수를 도출하기 위하여 식(8)과 같이 변환 할 수 있다.

$$C(x,y,t) = C_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \operatorname{erf} \left( \frac{y}{2\sqrt{Dt}} \right) \right) \quad (7)$$

현실적으로 다양한 환경에 위치하고 있는 콘크리트 구조물 및 부재들은 재하를 받고 있는 상태에서 균열이 발생되고 있으며, 콘크리트 구조물이 위치하고 있는 환경에서의 온도 및 습도 차이, 콘크리트에 있어서는 표면 및 내부 공극, 결함 및 균열이 발생할 수 있다. 그러므로 실제로는 콘크리트 구조물의 염화물이온 확산은 비록 낮은 물-결합재비의 콘크리트라고 할 지라도 2차원의 염화물이온 침투가 이루어지는 것으로 가정하는 것이 타당하다.

따라서 식(7) 과 식(8)에 의해서 콘크리트 구조물의 염화물이온 확산계수를 평가하고 염해에 의한 잠복기를 예측하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

전술한 염화물이온 확산계수 및 잠복기의 예측에 활용한 식은 콘크리트 제조시 염화물이온이 혼입되어 있지 않고, 단지 외부로부터의 염화물이온 확산만을 고려한 것이다. 그러나 국내 건설현장에서는 주로 바닷모래를 사용하고 또한 콘크리트의 시공성 확보 측면에서 각종 혼화제의 사용으로 콘크리트 내부에 염화물이 혼입되어 있는 경우에는 내부 염화물량을 고려하

여 식(7)을 식(8)과 같이 변환하는 것이 가능하다.

$$C(x,y,t) = C_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \operatorname{erf} \left( \frac{y}{2\sqrt{Dt}} \right) \right) + C(x,y,0) \quad (8)$$

여기서,  $C(x,y,0)$  : 콘크리트 내부에 혼입되어 있는 초기 염화물량(%)

식(8)은 염화물의 확산이 2차원의 방향성을 갖는 경우이나 현재 콘크리트표준시방서 내구성편에서는 1차원적으로 하여 식(9)와 같이 나타내고 있다.

$$C_d = C_i + (C_0 - C_i) \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_d t}} \right) \right) \quad (9)$$

여기서,  $C_d$  : 위치 x(cm), 시간 t(년, 또는 sec)에서 염화물이온 농도의 설계값(kg/m<sup>3</sup>)

$C_i$  : 초기 염화물이온 농도 ; 최대치로 0.3 kg/m<sup>3</sup>

$C_0$  : 표면 염화물이온 농도

erf : 오차함수,  $\operatorname{erf}(s) = \frac{2}{\pi^{1/2}} \int_0^s e^{-\lambda^2} d\lambda$

$D_d$  : 염화물이온의 유효확산계수(cm<sup>2</sup>/년, 또는 cm<sup>2</sup>/sec),  $D_d = \gamma_c D_k$

$\gamma_c$  : 콘크리트의 재료계수, 일반적으로 1.0이 사용되며, 구조물의 최상부에는 1.3

$D_k$  : 콘크리트 염화물이온 확산계수의 특성치 (cm<sup>2</sup>/년, 또는 cm<sup>2</sup>/sec)

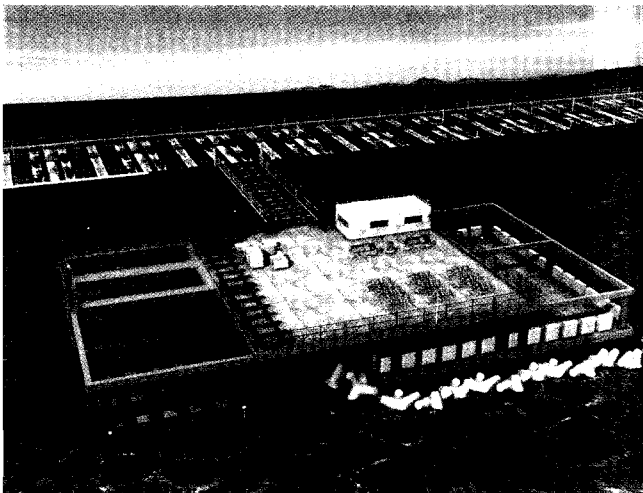


그림 7. 해양환경 옥외폭로 시험장 조감도(안)(한국건설자재시험연구원)

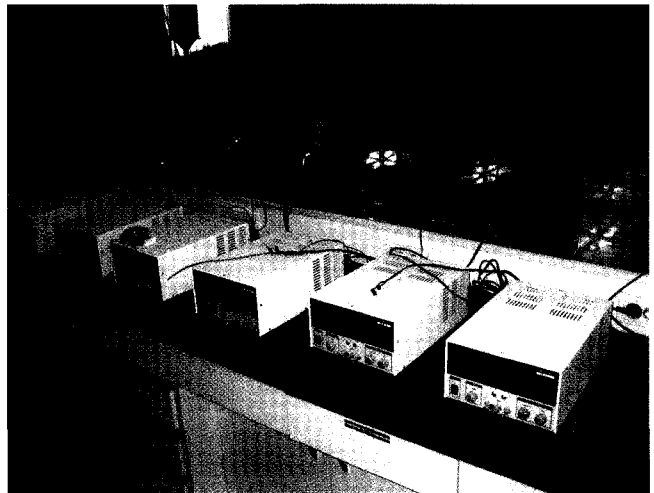


그림 8. 촉진 염화물이온 침투 시험(NT Build-492)

### 3.4 확산계수의 추정

확산계수는 염화물이온의 침투 예측에서 중요한 해석변수로 확산계수의 추정은 주의를 기해야 한다. 특히, 확산계수는 콘크리트 배합 특성에 따라 많은 차이를 나타내기 때문에 확산계수 산정은 실측자료나 실험 자료에 근거하는 것이 바람직하다. <그림 7>은 이러한 자료의 수집을 가능하게 하는 옥외 폭로 시험장의 조감도를 나타낸 것이며, <그림 8>은 축진 염화물 이온 침투 실험을 나타낸 것이다. 겉보기 확산계수를 산정하는 방법에는 기존 데이터에 기초하여 개략적인 값을 구하는 방법과 실제 콘크리트 구조물의 염화물량을 측정하여 구하는 방법이 있다. 경제성 측면에서 다소 불리하지만 실제 콘크리트 구조물에서 염화물량을 분석하여 실제 염화물량을 구함으로써 염화물 확산계수를 산정하는 방법이 가장 확실한 데이터를 확보할 수 있다. 그러나 대상 구조물의 환경적·사회적 조건 등의 각종 상황에 따라 실제 콘크리트 구조물로부터 시료를 채취하여 분석하는 것이 곤란한 경우는 기존 데이터를 활용하여 겉보기 염화물이온 확산계수를 산정하게 된다.

이상과 같이 기존의 데이터를 활용하거나 실제 콘크리트에서 채취한 시료로부터 겉보기 염화물이온 확산계수를 산정함으로써 침투깊이별 염화물이온의 프로파일(profile)을 적용하여 염화물량을 추정할 수 있으며, 그 추정결과를 기초로 철근 주위의 염화물량이 부식 발생 임계염화물 농도를 초과하는 시기를 산출함으로써 잠복기가 종료되고 진전기가 개시되는 시기를 예측할 수 있다.

콘크리트의 염화물이온 확산계수의 예측값  $D_p$ 는 평가 대상 콘크리트에 대해 실제 실험이나 실측된 자료를 통해 구할 수 있는데 콘크리트표준시방서 내구성편에서는 물-시멘트(결합재)비에 따른 확산계수 예측값을 식(10)과 같이 제시하고 있다.

$$\log D_p = a(W/C)^2 + b(W/C) + c \quad (10)$$

여기서,  $W/C$  : 물-시멘트(결합재)비

$a, b, c$  : 실험으로부터 정해지는 상수

LIFE-365에서는 보통포틀랜드시멘트를 사용한 콘크리트와 포틀랜드시멘트에 실리카퓌를 혼입한 콘크리트에 대해 각각 별도의 식을 적용하여 실리카퓌의 혼입에 따른 확산계수 저감효과를 반영하여 식(11)과 식(12)로 제시하고 있다.

- 1) 포틀랜드시멘트 또는 포틀랜드시멘트와 플라이애쉬(또는 고로슬래그미분말)를 혼입한 경우

$$\overline{D}_R = 3.154 \times 10^{-1.06 + 2.40(W/B)} \quad (11)$$

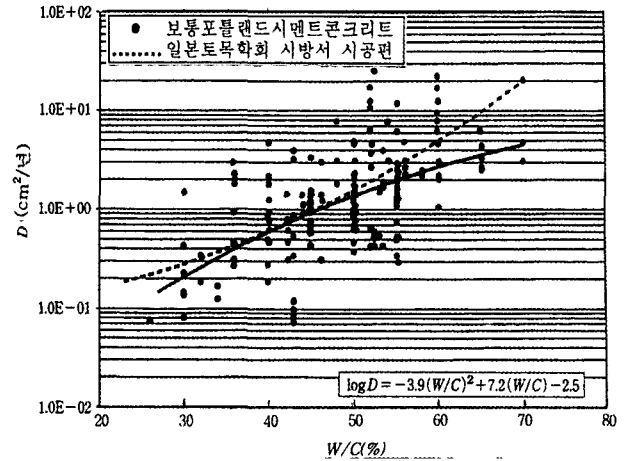


그림 9. 물-시멘트비와 확산계수의 관계

- 2) 포틀랜드시멘트와 실리카퓌를 혼입한 경우

$$\overline{D}_R = 3.154 \times e^{-16.5 a_{SF}} 10^{-1.06 + 2.40(W/B)} \quad (12)$$

여기서,  $\overline{D}_R$  : 기준 평균확산계수

(재령 28일, 온도 20°C 기준) (cm²/년)

$W/B$  : 물-결합재비

$a_{SF}$  : 실리카퓌-결합재 중량비(0 ≤  $a_{SF}$  ≤ 0.15)

(단, 1cm²/년 = 3.17 × 10<sup>-12</sup> m²/sec)

## 4. 염해 방지대책

### 4.1 콘크리트의 배합 및 사용재료

#### 4.1.1 물-시멘트비

염해 환경하에서 콘크리트 내부의 철근 부식 방지 또는 부식 지연을 위해서는 콘크리트의 모세관 공극을 최소화하여 콘크리트의 조직을 치밀화 하는 것이 중요하며, 이러한 모세관 공극량은 물-시멘트비에 의해 가장 많이 지배되므로 물-시멘트비를 되도록 작게 하여야 한다(그림 9 참조). 이때 단위시멘트량이 많을 경우는 분체량이 증가하여 균질한 콘크리트를 제작할 수 있으나, 반면 시공성의 확보를 위하여 단위수량이 증가될 수 있어 오히려 콘크리트 조직의 치밀화가 곤란할 수도 있으며, 건조 수축에 의한 균열을 발생시킬 수도 있다. <표 4, 5>는 현재 콘크리트 표준시방서에서 규정하는 해양콘크리트의 최대 물-시멘트비 및 단위시멘트량을 나타낸 것이다.

#### 4.1.2 시멘트

해수중의 콘크리트가 팽창 파괴하는 것에 대해서는 그 원인

표 4. 내구성으로 정하여진 AE콘크리트의 최대 물-시멘트비(%)

환경구분	시공조건 일반 현장 시공의 경우	공장제품 또는 재료의 선정 및 시공에서 공장 제품과 동등 이상의 품질이 보증될 때
해중	50 이하	50 이하
해상 대기중	45 이하	50 이하
물보라 지역	45 이하	45 이하

표 5. 내구성으로 정해지는 단위시멘트량(kg/m<sup>3</sup>)

환경구분	굵은골재 최대치수(mm)	25	40
	물보라 지역 및 해상 대기중 해중		330 이상 300 이상

이 유산염과의 반응에 의한 에트링가이트의 생성 때문이라는 이론이 유력하나 시멘트중의 C<sub>3</sub>S에도 영향을 받는다는 것이 다수의 연구에서 보고 되고 있다. C<sub>3</sub>S가 많을수록 즉, CaO가 많은 만큼 Ca(OH)<sub>2</sub>의 석출량이 많아지며 팽창률이 커지고 압축강도는 작아진다. 보통포틀랜드시멘트는 CaO가 수화하는 과정에서 Ca(OH)<sub>2</sub>의 생성량이 많을수록 팽창률이 크며, 반면 고로슬래그 시멘트에서는 슬래그(slag)가 포졸란 반응을 일으켜 잠재수경성을 발휘하기 때문에 Ca(OH)<sub>2</sub>가 소비됨으로서 Ca(OH)<sub>2</sub>의 양이 적어져 고로슬래그 시멘트가 해수에 대한 저항이 큰 이유이다.

4.1.3 골재

골재는 일반적인 콘크리트용 골재와 크게 다르지 않지만 알칼리골재 잠재반응성이 있는 부순골재의 경우 시멘트중의 알칼리 성분과 반응하여 알칼리 골재반응을 일으킬 수도 있으며, 잔골재에 염분이 포함되어 있는 경우는 알칼리 골재반응이 촉진되므로 특별한 주의가 요구된다.

4.1.4 혼화재료

시멘트 외에 결합재료 고로슬래그미분말이나 플라이애쉬, 포졸란 물질들은 자원의 재활용을 통한 경제적인 효과 외에도 콘크리트 품질도 향상시키는 부가적인 효과로 인해 점차 그 사용이 확대되어 가고 있다. 특히 해양콘크리트 구조물에서 활발하게 적용되고 있으며 많은 연구에서 그 효과가 검증되고 있다. 특히 고로슬래그 미분말의 경우 성분 중 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 시멘트 알칼리 분위기에서 용출하여 칼슘알루미네이트 수화물(4CaO · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · nH<sub>2</sub>O)을 형성하여 침투되는 염화물이온과 반응하여 프리델층 염으로 고착시킴으로써 염화물에 대한 저항성이 증가하게 된다. 화학혼화제인 AE제, 감수제, 고성능감수제 및 유동화제의 경우 응결 경화 등의 촉진을 위하여 염화물이 함유될 수

도 있어 염해가 예상되는 경우 혼화제의 염화물량에 있어서도 철저한 관리가 요구된다.

4.2 염화물의 침입 차단 및 방지

4.2.1 표면보호 처리

콘크리트 표면보호는 콘크리트로 침투될 수 있는 각종의 유해물질을 일차적으로 콘크리트 표면에서 차단하는 것으로 염해, 탄산화 및 동해의 방지대책으로서도 상당히 유효하다. 콘크리트의 표면보호 처리법으로는 도장, 코팅, 라이닝, 함침 등의 방법이 있으며, 콘크리트의 표면 보호 공법은 유지관리가 가능한 것이 유리하다. 이러한 표면보호재에 대해서는 최근 다양하게 연구 개발되고 있고 일부 제품이 시판되고 있으나 실사용에 있어서는 차염성 뿐만 아니라 내후성, 방수성, 내알칼리성, 콘크리트와의 부착성, 균열대응성 및 시공성 등에 대한 종합적인 검토가 필요하다. 또한, 환경조건이 열악한 구조물의 피복재로서 영구설설형 거푸집으로 불리는 폴리머시멘트나 고강도 프리캐스트 패널을 콘크리트 거푸집으로 설치하여 콘크리트를 타설하는 방법도 주목을 받고 있다.

4.2.2 철근의 방청처리법

콘크리트의 염해나 탄산화 등은 콘크리트 내부의 철근이 부식되면서 철근이 팽창하여 팽창 압력이 콘크리트의 파괴로 이어지므로 철근 자체의 부식을 방지하는 방법도 적극적으로 고려될 수 있다. 이러한 방법으로는 철근의 표면을 내식성이 강한 금속으로 도금하거나 에폭시 등의 수지를 피복하는 방법과 철근 자체를 내식성이 강한 합금으로 만드는 방법 등이 있다.

최근 내염성 철근으로 철근차체의 성분에 크롬과 같이 내식성이 강한 금속 등을 함유시킴으로써 철근자체의 부식에 대한 저항성을 높이는 연구가 진행되고 있으며, 이러한 내염성 철근은 콘크리트에 대한 부착강도나 시공성이 보통철근과 동일하여 기존의 철근과 동일하게 사용할 수 있으나 아직은 실험적 단계에 있어 본격적으로 사용되고 있지는 않지만 향후 기대되는 재료중의 하나이다.

4.2.3 방청제의 이용

방청제는 콘크리트 배합시 소량을 첨가함으로써 금속의 부식속도를 효과적으로 감소시키는 혼화제를 말한다. 방청제는 각종 기계분야 즉 화학 장치, 수조 보일러, 부수기관, 각종 파이프라인 등의 방식에 많이 사용되고 있으며 그 종류도 다양한데 이를 크게 분류하면 아노드 반응 억제형과 캐소드 반응 억제형으로 대별할 수 있다. 콘크리트용 방청제로서의 요구 성능은 우수한



방청 효과뿐만 아니라 콘크리트에 혼입될시 콘크리트의 물성에 해로운 영향을 미치지 않는 것이 요구되며, 또한 인체에 무해하고 환경오염의 원인이 되는 유해물질을 포함하지 말아야 한다.

4.2.4 염화물의 고정화

시멘트의 수화반응시 주위에 존재하는 염화물은 시멘트 구성 광물중 칼슘알루미늄네이트(C<sub>3</sub>A) 화합물과 반응하여 물에 녹지 않는 즉, 안정된 프리델씨 염을 생성하여 부식의 원인이 되는 수용성 염화물의 양을 감소시킨다. 이와 같이 포틀랜드시멘트는 프리델씨 염과 같은 형태로 염화물을 난용성의 염으로 고정화하여 콘크리트 내부에서 용해 가능한 염화물의 양을 줄이는 역할을 하게 된다. 시멘트 성분중 염화물을 고정시키는 칼슘알루미늄네이트의 함유량이 많을 경우 프리델씨 염이 많이 생성되어 유리할 수 있을 것으로 예측되지만 칼슘알루미늄네이트가 많은 시멘트는 화학적 침식 즉, 황산염에 대해 취약하므로 칼슘알루미늄네이트를 사용한 고정화의 원리를 방식대책으로서 직접적으로 사용할 수는 없다.

4.2.5 전기적 방식법

전기적 방식법은 콘크리트 기술자에게는 익숙하지 못한 방법이지만 강재 구조물에는 이미 오래전부터 사용되어온 방법이다. 그러나 콘크리트에 있어서는 콘크리트 자체가 절연체가 되므로 구조물에 따라 그 적용대상이 한정되는 경우도 있어 아직 검토의 여지가 남아있다.

5. 맺음말

본고에서는 철근콘크리트 구조물의 염해와 관련하여 염화물의 유입경로, 메커니즘, 내구성 설계 방법·방지대책 및 염해에 의한 철근 부식 예측에 대하여 정리하였다. 선진외국에서는 이미 염해에 대한 내구성 설계 기법을 체계화하였으나, 국내의 경우는 1990년대 초 신도시 건설과 관련하여 바닷모래 사용에 따른 콘크리트 중의 염화물량에 대해서만 규정하고 있을 뿐 해양환경하에서의 외부염화물 침투 및 염해환경하에서의 수명 예측 등 내구성 설계와 관련해서는 미흡한 실정이었다. 다행히 최근 들어 철근콘크리트 구조물의 염해와 관련하여 내구성 및 사용(공용)수명이 고려된 개념으로 설계, 시공, 유지관리에 관한 각종 시방 및 지침이 정비되고 있을 뿐만 아니라, 실제 확률이론을 바탕으로 설계된 100년 내구수명의 해양 구조물이 건설되고 있는 등 염해에 의한 내구성 크게 향상될 것으로 기대된다. 그러나 실제 콘크리트 구조물의 내구성 저하는 염해 환경 단독으로 뿐만 아니라 탄산화, 동해 및 균열 등이 복합적으로

작용함에 따라 차후에는 염해를 동반한 복합 열화에 대해서도 지속적인 연구의 필요성이 요구된다. □

참고문헌

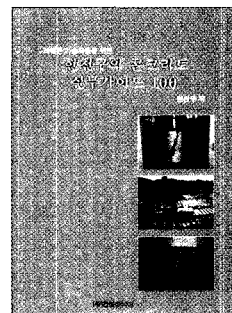
1. 한국콘크리트학회, 콘크리트 표준시방서 내구성편, 한국콘크리트학회 2004.
2. 김무한 외, 염해 및 중성화 피해를 입은 콘크리트 구조물의 내구성 회복을 위한 보수공법 시스템 개발 및 실용화 방안, 건설교통부, 2005. 4.
3. 박상준, 김영진, 임현칠, 장현갑, "부산-거제간 연결도로 사업에 적용한 100년 수명 고내구성 콘크리트", 콘크리트학회지, 17권 6호, 2005. 11, pp.62~71.
4. 정해문, 안태송, "이광명, 염해에 대한 콘크리트 교량의 내구성 향상 기술", 콘크리트학회지, 16권 2호, 2004. 3, pp.31~37.
5. 日本コンクリート工學協會, 海洋コンクリート構造物の防蝕指針(案), 日本コンクリート工學協會, 1990. 3.
6. 日本建築學會, 海洋建築物構造設計指針(浮遊式)・同解説, 日本建築學會, 1990.
7. 日本土木學會, 콘크리트構造물의耐久設計指針(案), 日本土木學會, 1995. 3.
8. プレストレスト・コンクリート建設業協會 編, 海洋コンクリート構造物の防蝕Q&A, 技報堂出版, 2004. 2.
9. Ravindra K. Dhir and Michael J. McCarthy, *Concrete Durability and repair Technology*, Thomas Telford, 1999.
10. www.gkproject.com.

도서소개

레미콘 기술자들을 위한 **인간의 콘크리트** 실무가이드 100

인간 저

건설산업 관련 정보 전문 월간지인 "레미콘 아스콘 골재"의 창간 1주년 기획좌담회에서 기획되어 연재되기 시작한 기술 기사로, 1997년 8월호 「콘크리트의 강도증진」 부터 2005년 11월호 「초음파 속도법 및 복합법」을 모은 합본집이다.



출판사 (주)건설미디어  
 발행일 2006년 2월 16일  
 총쪽수 210쪽  
 정 가 18,000원  
 구입처 032-453-3221