

염해 환경에 있는 지하철 콘크리트 구조물의  
내구성 향상 대책수립에 관한 연구  
A Study for Development of Durability of the Subway  
Concrete Structure exposed to Chloride Environment

이무관\*  
Lee, Moo-Kwan

김은겸\*\*  
Kim, Eun Kyum

김대호\*\*\*  
Kim, Dae Ho

ABSTRACT

Durability of concrete has been currently issued in the engineering societies and a large number of studies on the concrete corrosion in salty environment have been performed. The reinforcement corrosion, which is the primary reason of deterioration of the concrete structure exposed to chloride environment, is caused by the chloride ions infiltration owing to underground water seeping into the concrete. In this study, the endurance periods using the diffusion equation of the concrete specification have been evaluated on the concrete structures with different additives for the brand new R/C subway structure exposed to seashore underground water. Furthermore, the guidance for proper use of the additives and the reasonable thickness of concrete cover are derived for concrete mixing.

From the result of the evaluation corresponding to salt damage for Incheon subway line 1, the endurance periods of the ordinary Portlandcement concretes are represented as 42~75 years and fail to achieve the objective period of 100 years. However, the lower water-cement ratio expands the endurance period and the blast furnace slag concrete with small quantity of the silica fume, which shows the best performance of corrosion resistance in this study, represents more than 170 years of the endurance period. Moreover, the case of use of blast furnace slag and fly ash together shows the endurance period of 134~171years and it means that the result very satisfies the objective endurance period.

1. 서론

최근, 콘크리트의 내구성이 사회적인 문제로서 부각되면서 고품질을 갖는 콘크리트 제조기술 개발 등 많은 연구가 내구성으로 집중되고 있는 실정이다. 콘크리트의 내구성에 영향을 주는 요인으로는 중성화, 염해, 알칼리골재 반응, 동결융해 등 여러 가지가 있지만 해양환경의 영향을 받는 지역에 건설되는 콘크리트 구조물의 경우에는 염해에 의한 철근 부식이 가장 지배적인 열화인자로 작용하고 있다. 특히 해양환경에 건설되는 지하철과 같은 지하구조물의 경우는 염해에 직접적인 영향을 받지는 않지만 지하수에 유입된 염화물이온의 침투에 의해 철근의 부식이 초래될 수 있어 염해에 대한 대책이 요구된다. 또한, 지하철 구조물은 다른 구조물과는 다르게 장기간의 내구수명을 요구하고 있어, 그 기간동안 구조안전성, 사용성, 내구성 등의 소요성능을 유지해야만 한다. 유지관리측면에서 보면 본구조 및 부속시설물의 교체 또는 재시공으로 인한 사회적, 경제적인 손실이 매우 크므로 이러한 구조물은 설계시부터 목표내구수명을 설정하고 이 기간동안 확보해야 할 성능저하에 대한 분석이 반드시 필요하다고 할 수 있다.

이에 본 연구에서는 해안가 지하수에 노출된 RC 지하철 신설구조물을 대상으로 콘크리트 표준시

\* 인천광역시 도시철도건설본부 과장, 정회원

\*\* 서울산업대학교 교수, 정회원

\*\*\* (주)서영엔지니어링 대리, 정회원

방서(내구성편)의 염화물이온 확산방정식을 이용하여 혼화재료 사용에 따른 내구수명을 평가함으로써 배합시 적절한 혼화재료의 사용 및 적정 피복두께에 대한 적용방안을 도출하고자 한다.

## 2. 염해에 대한 내구성 관련 기준 및 평가 방법

본 연구에서 적용된 내구성 평가 방법은 단순히 배합시 재료의 제한사항이 아닌 내구수명을 고려한 국내의 콘크리트 표준시방서(내구성편, 2004년)에서 제시한 염화물이온 확산방정식을 이용하여 평가하였으며 이는 성능조사형 평가개념을 기반으로 하고 신뢰성 이론의 개념을 보완한 것이다.

염해를 받는 철근콘크리트구조물의 성능저하를 각 기간에 대해 구분하면 그림 1과 같으며 본 연구에서는 철근 위치에서의 염화물이온량이 철근부식을 일으키는 한계량(임계 염화물이온량)에 도달하는 기간까지를 내구수명이라 정의하였다. 철근부식 임계 염화물이온량( $C_{lim}$ )을  $1.2 \text{ kg/m}^3$ 로 하고 목표내구수명을 구조물의 중요도에 따라 100년으로 설정하였다.

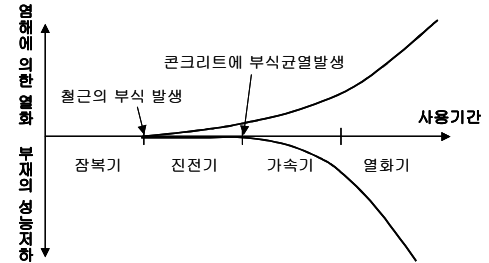


그림 1 염해에 의한 부재의 성능저하

### 2.1 콘크리트 구조물의 내구성 평가

염화물이온의 침투에 의한 콘크리트 구조물의 내구수명 평가는 식 1과 같은 확산 방정식(Fick의 제 2법칙)을 사용하여 평가하였다.

$$\frac{\partial C_c}{\partial t} = D_d \frac{\partial^2 C_c}{\partial x^2} \quad (1)$$

여기서,  $D_d$  : 콘크리트의 겉보기 염소 이온 확산계수 ( $\text{cm}^2/\text{sec}$ )

$C_c$  : 콘크리트중의 염분량 ( $\text{kg/m}^3$ )

$x$  : 콘크리트 표면에서의 거리 ( $\text{cm}$ )

$t$  : 시간 ( $\text{s}$ )

윗 식의 해는 어느 일정의 조건하에서는 식 2와 같다.

$$C_d(x,t) - C_i = (C_0 - C_i) \cdot \left( 1 - \text{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_d t}} \right) \right) \quad (2)$$

여기서,  $C_d(x, t)$  : 위치  $x(\text{cm})$ , 시간  $t(\text{year})$ 에서의 염화물이온량( $\text{kg/m}^3$ )의 설계값

$C_i$  : 초기 염화물이온량

$C_0$  : 표면 염화물이온량

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

즉, 특정위치에서의 시간에 따른 염화물이온량( $C_d$ )을 평가하여 임계염화물량( $C_{lim}$ )에 도달하는 시기를 결정함으로써 구조물의 내구수명을 평가할 수 있다.

### 2.2 콘크리트의 염화물이온 확산계수( $D_d$ ) 모델

콘크리트의 내구성 평가를 위한 염화물 확산계수는 모든 재료와 환경조건에서 확산계수를 추정하는 모델은 제안되고 있지 않지만 콘크리트 표준시방서(내구성편)에서는 기존 문헌의 실측데이터를

기초로 염화물이온 확산계수의 평균값을 식 3 및 식 4와 같이 제안하고 있다.

$$\log D = 4.5(W/C)^2 + 0.14(W/C) - 8.47 \quad (\text{보통시멘트}) \quad (3)$$

$$\log D = 19.5(W/C)^2 - 13.8(W/C) - 5.74 \quad (\text{고로슬래그미분말 시멘트}) \quad (4)$$

윗 식은 데이터의 불규칙성이 크기 때문에 환경조건을 구분하지 않고 시간 및 온도에 따른 변동성을 고려하지 않은 물-결합재비에 대한 하나의 식으로 모델화하고 있으며 실제 실험의 실측자료를 통해 구한 회귀분석식이다. 하지만 다양한 혼화재료 및 대체율을 고려할 수 없기에 본 연구에서는 삼성건설 기술연구소(고내구성 콘크리트의 염소이온 확산특성 평가, 2003)에서 각 콘크리트에 대해 침지 시험을 통해 측정된 각각의 겔보기 염소이온 확산계수를 위의 회귀식과 비교하여 적용하였다.

#### 4. 내구수명 평가 및 분석

##### 4.1 지하철 구조물의 노출환경

본 연구에서 평가한 대상구조물은 현재 시공 중인 인천지하철 1호선(연장선) 지하철 구조물로서 해안 매립지에 위치하고 있으며 지하수위 -4.2~0.0 m에 노출되어 있어 해수 및 지하수의 영향을 받고 있다. 지하수 염화물량은 3.19~5.67 g/l로서 해수의 30% 수준으로 평가되었으며 현재 콘크리트 표준시방서(내구성편)에서는 지하구조물에 대한 표면염화물량에 대한 설계치가 없어 실내실험결과 등을 참고하여 3.0 kg/m<sup>3</sup>으로 가정하였다. 피복두께는 최외측 철근에서 콘크리트 표면까지의 거리 중 지하수에 노출되어 있는 벽체를 기준으로 하였으며 상하부 슬래브 외측 및 벽체의 내측 중 가장 작은 피복두께는 80mm이므로 설계피복두께는 80mm, 표면염화물 농도는 3.0kg/m<sup>3</sup>으로 설정하였다. 그림 2에서는 대상구조물의 단면을 나타내며 표 1에서는 대상구조물의 설계조건을 나타내었다.

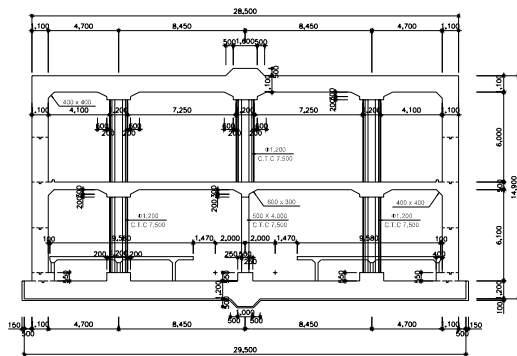


그림 2 대상구조물의 단면도

표 1 대상구조물의 설계조건

항목	값
목표내구수명(t)	100 year
표면염화물량(C <sub>0</sub> )	3.0 kg/m <sup>3</sup>
초기염화물량(C <sub>i</sub> )	0 kg/m <sup>3</sup>
한계염화물량(C <sub>lim</sub> )	1.2 kg/m <sup>3</sup>
피복두께(c)	80mm
물-결합재비(W/B)	37%, 42%, 47%

##### 4.2 혼화재료 종류에 따른 배합설계 및 확산계수

기존의 혼화재료의 특성 분석 및 염해저항성 연구를 통해 보면 콘크리트의 염분침투 저항성능을 향상시키기 위해서는 치밀한 콘크리트의 공극구조를 형성하는 것이 매우 중요하다. 이를 위한 대책으로 본 연구에서는 보통포틀랜드시멘트(OPC)를 기본 시멘트로 하고 배합시 내염해성이 강한 고로슬래그미분말(G), 플라이애쉬(F), 실리카폼(S) 등의 콘크리트의 혼화재료를 사용하여 콘크리트의 내염해성을 평가하였다. 표 2는 혼화재료의 종류 및 물-결합재비에 따른 콘크리트의 배합표와 겔보기 염소이온 확산계수를 나타내었다.

표 2 콘크리트의 배합설계표 및 염소이온 확산계수

Names of Mix	Item	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )						cm×%		Diffusion coefficient (D, cm <sup>2</sup> /year)	
				W	Cementitious Materials			S	G	Admixture			
					C	GGBS	FA			SF	SP		AE
OPC		37	45	168	454	-	-	-	767	952	1.0	0.017	0.600
		42	45	168	400	-	-	-	787	976	0.9	0.015	0.761
		47	47	168	357	-	-	-	838	960	0.85	0.017	1.068
F20+OPC80		37	45	168	363	-	91	-	752	934	0.75	0.018	0.468
		42	45	168	320	-	80	-	774	961	0.85	0.025	0.585
		47	47	168	286	-	71	-	826	946	0.7	0.017	0.863
G30+OPC70		37	45	168	318	136	-	-	762	946	0.8	0.018	0.307
		42	45	168	280	120	-	-	783	972	0.75	0.013	0.439
		47	47	168	250	107	-	-	835	956	0.65	0.015	0.468
F20+S5+OPC75		37	45	168	340	-	91	23	749	929	0.9	0.023	0.366
		42	45	168	300	-	80	20	771	957	0.85	0.025	0.527
		47	47	168	268	-	71	18	810	927	0.9	0.025	0.556
G30+S5+OPC65		37	45	168	295	136	-	23	759	942	0.75	0.015	0.205
		42	45	168	260	120	-	20	765	949	0.75	0.015	0.249
		47	47	168	232	107	-	18	832	952	0.8	0.015	0.263
G35+F15+OPC50		37	45	168	227	159	68	-	751	932	0.65	0.014	0.263
		42	45	168	200	140	60	-	773	959	0.65	0.014	0.278
		47	47	168	178	125	54	-	804	921	0.7	0.014	0.337

4.3 평가 결과 및 분석

(1) 혼화재료별 내구수명

혼화재료 종류별 콘크리트의 염소이온 침투저항성을 상호 비교하기 위하여 각각의 염소이온 확산 계수 및 표면염화물량이 일정하다는 가정하에 추정된 콘크리트의 내구수명 예측결과를 그림 3 및 표 3에 나타내었다.

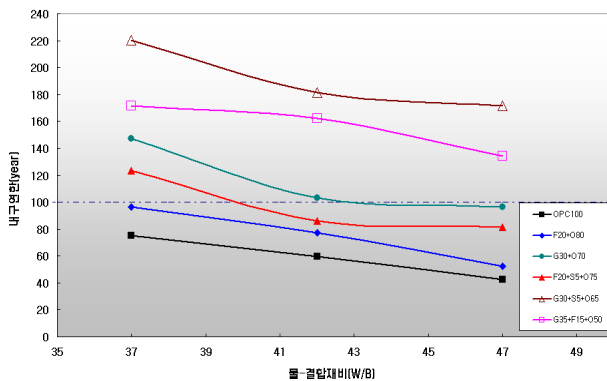


그림 3 시멘트 종류별 내구연한

표 3 시멘트종류별 내구수명평가 결과

혼화재료종류	내구연한(year)		
	W/C=37%	W/C=42%	W/C=47%
OPC	75	59	42
F20+ OPC80	96	77	52
G30+ OPC70	<b>147</b>	<b>103</b>	97
F20+ S5+ OPC75	<b>123</b>	86	81
G30+ S5+ OPC65	<b>220</b>	<b>182</b>	<b>172</b>
G35+ F15+ OPC50	<b>171</b>	<b>163</b>	<b>134</b>

혼화재료의 종류별로 물-결합재비가 37%, 42%, 47%에 대한 내구수명을 평가해본결과 혼화재료를 사용하지 않은 보통포틀랜드시멘트(OPC)의 경우는 3가지 물-결합재비에 대해 각각 75년, 59년 42년으로서 모두 목표내구수명 100년을 만족시키지 못하는 것으로 평가되어 혼화재료의 사용이 필수적임을 알 수 있으며 물-결합재비가 낮을수록 내구수명이 증가함을 알 수 있었다. 또한, 고로슬래그 미분말(G)을 혼화재료로 사용한 콘크리트는 플라이애쉬(F)를 사용한 콘크리트보다 현저하게 향상된 내구수명을 보여주어 고로슬래그미분말이 플라이애쉬보다 염해 저항성이 뛰어난 혼화재료임을 확인

할 수 있었다.

두가지의 혼화재료를 혼합하여 사용한 콘크리트는 더욱 향상된 내구수명을 보여주었다. 특히, 고로슬래그미분말(G)에 실리카 흙(S) 5%를 사용한 콘크리트는 172~220년의 내구수명을 나타냄으로서 가장 뛰어난 내염해성을 보여주었고 이는 실리카 흙(S)을 사용하지 않고 고로슬래그미분말만을 혼화재료로 사용한 콘크리트보다 약 70%향상된 내구성능을 보여줌으로서 소량의 실리카 흙을 사용한 삼성분계시멘트가 염해에 대한 저항성이 크게 향상됨을 알 수 있었다.

고로슬래그미분말(G)과 플라이애쉬(F)를 함께 혼화재료로 사용한 콘크리트의 내구수명 또한 134~171년으로서 목표내구수명 100년을 크게 웃도는 결과를 나타내었으며 이는 염해에 대한 저항성뿐만 아니라 건설심도가 깊어짐에 따라 더욱 더 Massive해지는 지하철 콘크리트구조물의 수화열 제어에도 효과적인 것으로 판단된다.

## (2) 혼화재료별 소요피복두께

국내의 설계기준에 의한 구조물의 피복두께는 염해환경처럼 침식 및 화학작용을 받는 콘크리트에 대해 최대 8cm의 피복두께를 규정하고 있으며 또한, 국내 공항콘크리트의 구조물의 피복두께는 비말대구간 및 토양에 접하는 지하구간 콘크리트구조물에 대해 10cm의 피복두께를 요구하고 있다. 이에 본 연구에서는 각 시멘트에 대해 목표내구수명 100년을 만족시킬 수 있는 최소한의 피복두께에 대한 분석을 통해 신설 구조물 설계시 혼화재료의 선택에 따른 적정 피복두께산정의 기준을 확립하고자 한다.

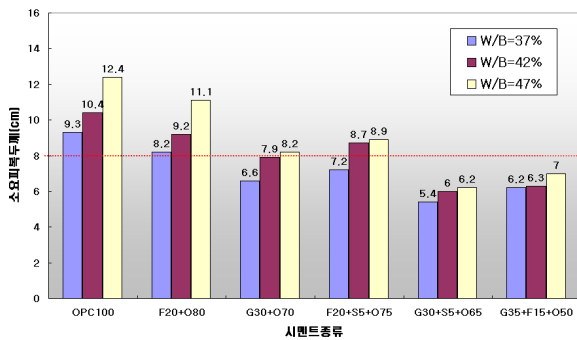


그림 4 혼화재료별 소요피복두께

혼화재의 종류별로 물-결합재비가 37%, 42%, 47%에 대한 소요피복두께를 산정한 결과를 그림 4에 나타내었다. 물-결합재비가 37%인 경우에는 대상 구조물의 피복두께 8 cm를 대부분 넘지 않았지만 보통포틀랜드시멘트와 플라이애쉬20%를 대체한 시멘트는 각각 9.3, 8.2cm의 결과를 나타내었다. 물-결합재비가 42%의 경우에는 보통포틀랜드시멘트의 소요피복두께가 10cm를 넘는 10.4cm의 소요피복두께를 나타내었으며 반면에 고로슬래그미분말30%+ 실리카 흙5%의 혼화재를 사용한 시멘트의 소요피복두께는 6cm로서 보통포틀랜드시멘트의 비해 약 60%정도의 피복두께만을 필요로 하는 것으로 분석되었다. 물-결합재비가 높은 47%의 경우에도 고로슬래그미분말+ 실리카 흙을 포함한 시멘트는 6.2cm의 소요피복두께를 나타내어 그 증가량이 매우 작았으며 이는 어느 정도의 물-결합재비의 증가로 인한 워커빌리티의 개선 및 단위 시멘트량의 감소로 인한 수화열의 감소등의 내구성 향상에 장점을 지닐 수 있을 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 논문에서는 해안가 지하수에 노출된 지하철 구조물의 염해에 대한 내구성 확보방안을 도출하기 위하여 혼화재료별, 물-결합재비별 염소이온 확산계수를 통하여 내구수명 평가를 수행함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 보통포틀랜드시멘트(OPC)를 사용한 콘크리트의 내구수명은 물-결합재비가 37%, 42%, 47%에 대해 평가하였을 경우 42~75년으로서 염해환경(해안가 지하수)에 위치하는 지하철 콘크리트 구

구조물의 목표내구수명 100년을 확보하기 위해서는 혼화재료의 사용이 필수적임을 알 수 있으며 물-결합재비가 낮을수록 내구수명이 증가함을 알 수 있었다.

3. 동일한 조건에서 혼화재료의 종류에 따라 보통포틀랜드시멘트를 포함한 5가지의 혼화재료를 사용한 콘크리트의 내구수명은 1가지의 혼화재료를 사용한 콘크리트보다 2가지 혼화재료를 혼합하여 사용한 콘크리트가 상대적으로 큰 내구수명을 나타내었으며, 특히 고로슬래그미분말(G)에 소량의 실리카 흙(S)를 사용한 콘크리트가 모든 물-결합재비에 대해 170년 이상의 내구수명을 나타냄으로서 가장 뛰어난 내염해성을 나타내었다.
4. 고로슬래그미분말(G)과 플라이애쉬(F)를 함께 혼화재료로 사용한 콘크리트의 내구수명은 모든 물-결합재비에 대해 목표내구수명 100년을 크게 웃도는 결과를 나타내었으며 이는 염해에 대한 저항성뿐만 아니라 건설심도가 깊어짐에 따라 더욱 더 Massive해지는 지하철 콘크리트구조물의 수화열 제어에도 효과적일 것으로 판단된다.
5. 국내의 설계기준에 의한 콘크리트 구조물의 피복두께는 염해환경 및 토양에 접하는 지하구간의 피복두께를 8~10 cm로 규정하고 있지만 피복두께의 증가로 인한 초기균열 및 수화열증가에 대한 고려가 필수적이기 때문에 고로슬래그미분말(G)30%+ 실리카흙(S)5%와 같은 적절한 혼화재료를 사용함으로써 목표내구수명 100년을 확보할 수 있는 피복두께를 6 cm까지 줄일 수 있는 것으로 나타났다.

최근까지 콘크리트 구조물의 염해환경에 대한 연구는 해수에 직접적으로 영향을 받는 비말대 및 해중에 위치한 교량 및 항만시설에 대해 활발히 수행되어져 왔다. 하지만 해안가 근처 해수를 포함한 지하수에 노출된 지하철 콘크리트에 대한 내구성 평가 연구는 미미한 상태이다. 향후 실리카흙의 첨가량의 변화에 대한 내구수명의 변화 및 각 혼화재료별, 물-결합재비별 다양한 염소이온 확산계수의 DATA축적을 통한 다양한 혼화재료의 선택을 통해 지하콘크리트구조물의 내구성 확보방안이 더욱 확립될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. 김은겸 등(2004), “고로슬래그미분말을 사용한 콘크리트의 염화물이온에 의한 철근부식 저항성 연구”, 콘크리트학회논문집, 제16권 1호, pp.1~9
2. 김은겸 등(1998), “해안 콘크리트 구조물의 염화물이온이동 및 철근부식에 관한 실험적 연구”, 대한토목학회논문집, 제18권 제1-4호, pp.447~455
3. Dhir, R. K., Jones, M. R., Ahmed H. E. H., and Seneviratne, A. M. G.(1990), "Rapid Estimation of Chloride Diffusion Coefficient in Concrete," Magazine of Concrete Research, Vol. 42, No. 152, pp. 175-185
4. 한국콘크리트학회(2004), “콘크리트 표준시방서-내구성편”
5. 한국콘크리트학회(2002), “염해 및 탄산화에 대한 철근콘크리트 구조물의 내구성 설계/시공/유지관리 지침”
6. 삼성건설 기술연구소&한양대학교 산업과학연구소(2003) “고내구성 콘크리트의 염소이온 확산 특성 평가”