

시간의존성을 고려한 해안가 철도 콘크리트 구조물에 대한 내구성 설계 기법의 개발

Development of Durability Design for Railroad Concrete Structures Exposed to Marine Environment Considering Time Dependency

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

ABSTRACT

This paper presents a refined design model for current railroad design code on concrete structures exposed to marine environment. A time-varying diffusion coefficient(D) as well as surface chloride(C_s) and chloride threshold level(C_{lim}) are studied. Averaging value of the D with time over exposed duration were used to refined durability design model to consider time dependent characteristic of D. The values for C_s and C_{lim} for the seashore in Korea revised for realistic durability design. The proposed model was verified by the so-called performance-based durability design, which is widely used in recent durability design code. Results show that the current standard specification underestimates durability performances of concrete structures exposed to marine environment, so that the cover depth design using current durability evaluation in the standard specifications is very much conservative. Thus, it is found that proposed durability design models for the railroad design code for railway concrete structures can be used effectively for service life design of concrete structures in marine environment.

1. 서 론

염소이온의 침투로 인해 콘크리트 내부 철근에 발생하는 부식은 해안 환경에 노출된 철근 콘크리트 구조물에 있어서 주요한 열화 인자 중 하나이다. 삼면이 바다로 둘러싸인 한반도의 해안가 철도 콘크리트 구조물은 이러한 염해로 인해 조기열화가 발생하여 내구성이 심각하게 훼손될 수 있다. 따라서 콘크리트 철도 시설물에 대해서는 염해에 대해 구조물이 목표내구수명을 만족하도록 설계하여야 한다.

최근 염해를 받는 콘크리트 구조물의 목표내구수명 확보를 위해 표준시방서(콘크리트표준시방서-내구성편-(2004))¹⁾와 설계기준(철도설계기준(2004))²⁾이 제정되었으며, 콘크리트 구조물의 내구성 설계에 이를 반영하고 있다. 그러나 이러한 시방 및 기준은 일본의 표준시방서에 근거하여 제정되었으므로, 염해 내구성 평가식을 비롯한 주요 설계변수 등이 일본의 기준과 동일하여 염해 내구성 설계시 우리나라의 환경 특성을 제대로 고려하기 어려우며, 염소이온 확산계수와 같은 설계 변수의 시간의존성을 고려하지 못하여 과다 설계를 유발하는 문제점을 가지고 있다. 또한 송하원 등(2006)은 철도설계기준에 제시된 염해 내구성 설계 항목을 분석하여 해안가 철도 구조물의 설계단계에서부터 염해 관련 설계 변수에 대해 우리나라의

* 연세대학교 교수, 정회원

** 연세대학교 박사과정, 정회원

*** (주)석탑엔지니어링 기술연구소 소장, 정회원

**** 한국철도시설공단 KR기술연구소 부장, 정회원

***** 한국철도시설공단 수도권지역본부 건설2팀장, 정회원

염해 환경을 정확히 반영하여 결정하는 것은 해안가 철도구조물의 내구성 설계에 있어서 필수적임을 제안하였다³⁾.

이에 본 연구에서는 기존의 철도설계기준의 문제점을 해결하고자 설계 변수의 합리적인 제시를 통해 철도 콘크리트 구조물에 대한 염해 내구성 설계기법을 개선하고자 한다. 이를 위해 염소이온 확산계수의 시간의존성을 고려할 수 있도록 시간에 대한 확산계수 평균값을 염소이온 확산방정식에 적용하였으며, 국내 해안 환경조건에 근거한 콘크리트의 표면 염소이온농도를 각 해안가에서의 현장 실험값을 토대로 조수 간만의 차가 큰 서, 남해안과 동해안으로 구분하여 제시하였다. 또한 콘크리트 구조물의 합리적인 내구수명을 예측하기 위하여 기존의 문헌을 분석하여 철근 부식 개시시기를 예측할 수 있는 최적의 임계 염소이온농도값을 사용하였다. 내구수명 100년을 보장할 수 있는 내구성 설계를 본 논문에서 제안한 내구성 설계 모델을 이용하여 국내 해안 환경에 접해 있는 철도 콘크리트 구조물에 대해 수행하였으며, 내구성 설계 결과를 동일 구조물에 대해 기존의 철도설계기준(2004)²⁾의 결과와 비교, 검증하였다.

2. 철도 염해 내구성 설계 기준의 제안

2.1 기존 설계 기준의 분석

2004년 개정된 철도설계기준(철도교편)²⁾에는 '염해에 대한 내구성설계' 항목이 일본토목학회에서 개정된 콘크리트표준시방서(시공편)⁴⁾에 근거하여 추가되었다. 염해 내구성 평가식을 비롯한 주요 염해 설계변수 등이 일본의 시방서와 동일하여 염해 내구성 설계시 우리나라의 환경 특성을 제대로 고려하지 못하게 된다. 또한 이 기준에 의하여 해안가에 건설될 철도 콘크리트 구조물에 대해 내구성 설계를 수행한 결과, 통상적으로 설계에 적용되는 피복두께로는 해안으로부터 1km에서도 내구성을 거의 만족시킬 수 없고, 100년을 만족시키기 위해 도출된 설계피복두께는 비현실적인 피복두께를 제시하게 된다³⁾. 이로부터 알 수 있듯이 기존의 철도설계기준의 염해 내구성 설계 항목은 국내 염해 환경을 적절히 고려하지 못하고, 염해에 대해 과다설계를 유발하는 등의 문제가 있음을 알 수 있다.

2.2 염해 설계 변수의 제안

앞서 살펴본 바와 같이 기존의 철도설계기준이 여러 문제점을 가지고 있으므로, 이를 해결하기 위하여 염해 내구성 설계 결과를 결정하는 염소이온 확산계수(D), 표면 염소이온농도(C_s), 임계 염소이온농도(C_{lim})와 같은 주요 염해 설계변수에 대해 제안한다.

2.2.1 염소이온 확산계수

시멘트의 수화반응은 시간에 따라 콘크리트의 공극구조를 개선, 즉 공극의 연계성을 감소시키기 때문에 D는 시간에 따라 감소하게 된다. 그러나 기존의 철도설계기준은 D의 시간의존성을 고려하지 못하며, 이는 해안가 철도 콘크리트 구조물의 과다설계를 유발하는 큰 요인으로 작용하여 왔다. 따라서 D의 시간의존성을 고려한 모델의 개발 및 적용이 필요하다.

구조물의 재령에 대한 D의 평균값의 개념은 시간의존성을 고려하여 Fick의 제2법칙을 해결하는데 사용될 수 있다⁵⁾. 확산계수의 평균값(D_m(t))은 시간 t에서의 확산계수를 적분하여 시간에 대해 나눈 값으로서 다음의 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다⁶⁾.

$$D_m(t) = \frac{1}{t} \int_0^t D(\tau) \cdot d\tau \quad (1)$$

여기서, D(t)는 시간 t에서의 확산계수를 나타낸다.

D의 시간의존성을 고려하기 위하여, 식 (1)에 Life-365⁷⁾에서 제안한 시간에 대해 변화하는 D 모델을 대입하여 D의 시간이력을 고려할 수 있는 식 (2)를 철도설계기준의 내구성 평가 및 설계에 적용하도록

한다⁸⁾.

$$D_m(t) = \frac{D_R}{1-m} \left(\frac{t_R}{t} \right)^m \quad (t < t_{\text{lim}} = 30\text{년}) \quad (2a)$$

$$D_m(t) = \frac{D_R}{1-m} \left[(1-m) + m \frac{t_{\text{lim}}}{t} \right] \left(\frac{t_R}{t_{\text{lim}}} \right)^m \quad (t \geq t_{\text{lim}} = 30\text{년}) \quad (2b)$$

여기서, D(t)는 시간 t에서의 확산계수, D_R은 기준시간 t_R(=28일)에서의 확산계수이며 m은 재령계수, t_{lim}은 확산계수의 감소한계(=30년)을 의미한다.

기준시간에서의 확산계수 D_R 및 재령계수 m은 혼화재료(실리카폼, 고로슬래그, 플라이애쉬 등)의 치환율을 고려할 수 있는 Life-365의 모델을 참고하여 각각 식 (3)과 식 (4)와 같이 산정할 수 있다⁷⁾.

$$D_R = 1 \times 10^{(-12.06 + 2.40(W/B))} \quad (\text{보통포틀랜드시멘트}) \quad (3a)$$

$$D_R = 1 \times 10^{(-12.06 + 2.40(W/B))} \times e^{-16.5 \cdot \%SF} \quad (\text{실리카폼}) \quad (3b)$$

여기서, W/B는 물-결합재비를 나타내며, %SF는 실리카폼 치환율(%SF ≤ 15)을 나타낸다.

$$m = 0.2 + 0.4(\%FA/50 + \%SG/70) \quad (4)$$

여기서, %FA와 %SG는 각각 플라이애쉬와 고로슬래그미분말의 치환율(%FA ≤ 50, %SG ≤ 70)을 의미한다.

2.2.2 표면염소이온농도

송하원 등(2006)이 보고한 바와 같이 기존의 철도설계기준(2004)에서 제시하고 있는 콘크리트의 C_s 값은 여러 문제점을 가지고 있다³⁾. 이 기준치는 일본토목학회 콘크리트 표준시방서⁴⁾를 그대로 인용하였기 때문에, 우리나라 동해안은 일본해안과 유사하나, 서남해안은 매우 큰 조수간만을 보이는 특이한 해안환경을 보여주고 있는데도 불구하고, 간만에 대한 C_s 규정값이 정해져 있지 않는 것과 같이 우리나라의 환경조건이 전혀 고려되지 않은 기준값이라 할 수 있다. 따라서 국내 염해 환경조건에 근거한 C_s 값이 제시될 필요가 있으며, 아래 도표에 이러한 C_s 제안값을 각 해안가의 실구조물에 대한 현장 실험을 통해 분석한 값을 토대로 조수 간만의 차가 큰 서, 남해안과 동해안으로 구분하여 C_s값을 나타내었다⁸⁾.

도표 1. 우리나라 환경조건에 근거한 콘크리트의 표면염화물량 제안(kg/m³)⁸⁾

Distance (m)	간만대	비말대	해상대기중	해안선부근	100m	250m	500m	1000m	비고
서, 남해안	20.0	5.0	2.5	2.5	2.0	1.5	-	-	제안값
동해안	-	13	-	9.0	6.5	2.5	1.5	1.0	
철도설계기준 (2004)	-	13	-	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5	기준값

위에서 제시한 도표 1은 우리나라 환경조건에 근거한 염해 설계 변수라고 할 수 있다. 그러나 도표 1의 근거가 되는 실험자료수가 부족하여, 이를 토대로 도출된 도표 1의 결과를 국내 철도 관련 체계 및 콘크리트 관련기준으로 적용하기에는 무리가 있다고 판단된다. 따라서 위의 결과를 기반으로 방대한 실구조물의 자료분석 및 전문연구자 및 실무자의 공청회와 관련 전문연구위원회의 회의를 거쳐 기준화하여야 한다고 판단되어 본 철도 구조물 염해 내구성 기준에는 건설교통부의 주관하에 제정된 기존의 콘크리트 표준시방서 내구성편(2004)¹⁾ 및 철도설계기준(2004)²⁾에서 제시한 값을 사용하도록 한다.

2.2.3 임계염소이온농도

C_{lim}는 해안환경에 접해 있는 콘크리트 구조물의 내구수명 예측에 있어서 철근의 부식개시시기를 결정

한다는 측면에서 중요한 설계 변수가 된다. RC 구조물의 내부 철근은 제설염이나 해수로부터 공급된 염소이온이 콘크리트 내부로 침투, 확산하여 철근위치에서의 염소이온농도가 C_{lim} 을 초과하게 되면 부식환경에 놓이게 된다. C_{lim} 은 콘크리트 내부로 침투한 염소이온이 철근의 부동태피막을 파괴시키는 염소이온농도로 정의할 수 있다. 우리나라와 일본의 내구성 관련 기준¹⁻²⁾에서는 1.2 kg/m^3 이 철근의 부식개시 시점으로서 제시되었다. 그러나 단위결합재량은 시멘트 수화물의 부식방지특성을 내포하고 있으며, 철근과 콘크리트 계면에서의 구속된 염소이온으로 인한 어느 정도의 부식 위험성을 고려하여야 하므로 C_{lim} 은 단위결합재량에 대한 전염소이온농도로서 나타내는 것이 타당하다⁹⁾. 또한 1.2 kg/m^3 의 C_{lim} 값은 단위결합재량이 300 kg/m^3 인 콘크리트에 대해 0.4%에 해당하며, 이는 콘크리트 구조물에 대해 최소 한계치이다. 그러므로 콘크리트 중의 C_{lim} 은 모든 경우의 콘크리트에 대해 일괄적으로 1.2 kg/m^3 를 적용하기 보다는 시멘트 중량 대비 0.4%가 더욱 합리적인 염해 환경의 콘크리트 구조물에 대한 내구성 평가를 가능케 할 수 있을 것이다.

3. 개선된 철도 내구성 설계 기준의 적용 및 검증

3.1 해안가 철도 콘크리트 구조물의 내구수명 예측

본 연구에서 제안한 염해 내구성 평가 모델(개선안)과 기존의 철도설계기준 모델(기준안)을 이용하여 해안환경에 있는 콘크리트 구조물에 대해 염해에 대한 내구수명을 예측하였다. OPC 콘크리트 및 고로슬래그 미분말(SG)을 40% 치환한 콘크리트에 대해서 피복두께는 50과 80mm, 물-결합재비는 30, 40, 50%, 해안으로부터의 거리는 250m에 대해 평가하였으며 다음의 그림 1에 각 해석조건에 대한 내구수명의 평가결과를 나타내었다.

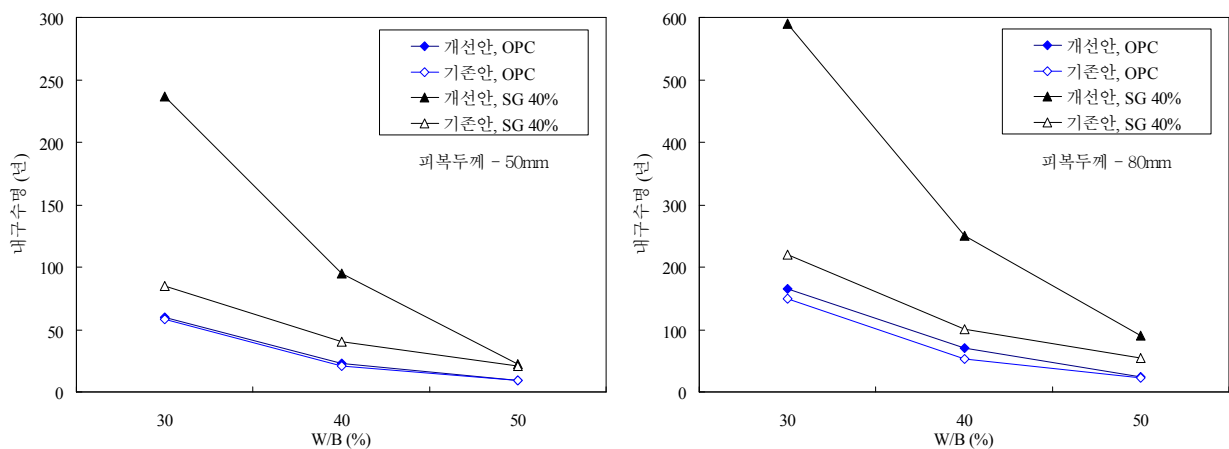


그림 1. 해안가 콘크리트 구조물의 내구수명 예측

각 해석조건에 대하여 개선된 모델 및 기존의 철도설계기준 모델을 통해 내구수명 평가를 수행한 결과, 모든 경우에 대해 모델을 통한 평가 결과가 기존 설계기준의 평가결과에 비해 수명이 높게 나왔음을 알 수 있다. 이로부터 기존 철도설계기준에서의 염해 내구성 기준이 제안된 모델에 비해 콘크리트 구조물의 염해 내구성을 과소평가하고 있음을 알 수 있다. 특히 OPC의 경우에는 그리 큰 차이를 보이지 않지만, 고로슬래그 미분말을 치환하는 경우에는 기존 규격과 개선된 규격을 통해 예측된 내구수명이 150년에서 300년 이상까지의 큰 차이를 보이게 된다. 이는 제안된 모델이 혼화재로 인해 시간에 따라 콘크리트내의 공극구조가 개선되는 특성을 반영하는 재령계수를 적용하였기 때문이라고 판단된다.

또한 철도설계기준 철도교편(2004)²⁾의 최소피복규정은 특수 환경, 즉 해안에서 250m 이내에 위치하는 콘크리트 구조물의 경우 벽체나 슬래브는 50mm, 기타 부재는 80mm로 제시되어 있다. 해안으로부터의 거리가 250m에 위치하는 피복두께 50mm 구조물의 경우에 제안된 모델에 의해 내구수명을 예측한 결과 고로슬래그를 혼입한 물-결합재비 30%의 경우를 제외하고는 모두 내구수명 100년을 만족하지

못하고 있음을 알 수 있다. 따라서 피복두께 50mm로써 고내구성을 요하는 콘크리트 구조물의 경우에는 혼화재의 첨가 및 낮은 물-결합재비의 적용이 배합설계시 고려되어야 한다고 판단된다.

피복두께 80mm 구조물의 경우에는, 해안으로부터 250m에 위치하고 있는 구조물에 대한 해석결과에서 슬래그를 혼입하는 모든 경우에 대해 높은 내구성능을 보유하고 있음을 알 수 있지만, 50% 물-결합재비의 OPC를 사용한 구조물은 약 25년 정도로 상당히 낮은 내구수명을 가지고 있음을 알 수 있다. 그러므로 피복두께 80mm로써 고내구성을 필요로 하는 해안가의 콘크리트 구조물의 배합설계시에는 고로슬래그와 같은 혼화재료를 사용하도록 하거나, OPC를 사용하는 경우에는 40%를 초과하는 높은 물-결합재비의 콘크리트는 지양해야 할 필요가 있다고 판단된다.

3.2 철도 콘크리트 구조물의 내구성 설계 예

본 연구에서 제안한 철도설계기준의 개선안과 기존안에 대하여, 염해환경하에 있는 철도 콘크리트 구조물의 여러 부재에 대해 내구수명 100년을 보장할 수 있도록 내구성 설계를 수행하였으며, 그 결과를 도표 2, 3과 그림 2에 나타내었다.

기존의 설계기준을 통한 설계 결과로부터, OPC를 사용하는 경우 거의 모든 부재에 대해 내구성 설계로부터 도출된 설계피복두께(x_f)가 구조설계에 의한 피복두께(x_{sd})보다 큰 값을 유발하였다. 고로슬래그를 사용하는 경우에도 해안으로부터 거리 1000m 구간에 있는 구조물을 제외하고는 상당수가 x_{sd} 보다 큰 값이 계산되었으며, 상당수가 비현실적인 피복두께의 결과를 보여주고 있음을 알 수 있다. 그러나 개선된 모델을 사용하여 계산된 x_f 은 고로슬래그 미분말을 40% 혼입한 콘크리트를 사용하고 해안으로부터 거리가 250m인 구조물의 일부 경우에 대해서만 만족하지 못했을 뿐, 나머지 구간에 대해서는 모두 x_{sd} 보다 작은 값이 나왔음을 알 수 있다. 또한 도표 2, 3과 그림 2에서 OPC 및 SG 40%의 두가지 경우에 대해 기존의 철도설계기준에 의해 계산된 설계피복두께가 개선된 모델에 의해 얻어진 값보다 더 큰 피복두께를 요구하였다. 이러한 설계결과의 차이는 기존의 철도설계기준이 D의 시간의존성을 고려하지 못하므로 염소이온침투에 대한 구조물의 염해 내구성능을 과소평가하였기 때문이라고 판단할 수 있다.

3.3 개정된 설계 기준의 검증

기존의 철도설계기준에서의 염해 내구성 설계 모델을 개선하고자 본 논문에서 제안된 모델을 검증하기 위하여 성능기반형 확률론적 설계기법(PBD)¹⁰⁾을 사용하였으며⁵⁾, 개선된 설계기준의 검증을 위해 다음의 절차를 따른다: (1) 제안된 모델에 의해 주어진 배합에 대한 설계확산계수(D_d)를 구한다. (2) 제안된 모델로부터 계산된 설계피복두께가 구조설계로부터 계산된 피복두께를 만족하는 구간에 대하여 내구수명 100년을 만족하도록 성능평가형 설계기법(PBD)에 의해 설계피복두께(x_f)에 해당하는 한계확산계수(D_{cr})를 구한다. (3) $D_{cr} > D_d$ 를 평가하여 개선된 모델이 합리적인 설계방법인지를 평가한다. 그림 3에 이러한 내구성 설계 및 검증 절차의 흐름을 나타내었으며, 그 결과를 도표 4, 5에 나타내었다.

성능기반형 내구성 설계기법에 의해 염해를 받는 대상 구조물이 목표내구수명 100년을 만족하도록 하는 D_{cr} 을 평가한 결과, 도표 4, 5와 같이 모든 구간에서, 제안된 모델에 의해 계산된 D_d 가 PBD에 의해 계산된 D_{cr} 보다 작게 나옴을 알 수 있다. 이는 개선된 모델이 신뢰할 만한 선진 내구성 설계 기법에 비해 보수적인 염해 내구성 설계를 수행하고 있음을 의미하고, 또한 기존의 철도설계기준이 매우 보수적인 설계결과를 유발하다고 판단할 수 있으므로, 개선된 철도설계기준에 적용될 염해 내구성 평가 모델은 이러한 기존의 문제점을 개선할 수 있다고 판단된다.

도표 2. 기존의 철도설계기준(2004)로부터 도출한 설계피복두께

구분	f_{ck} (MPa)	X_{sd}^* (mm)	x_r (mm)					
			OPC			SG 40%		
			250m	500m	1000m	250m	500m	1000m
상부바닥판	27	50	185	125	70	105	70	40
PSC beam	35	40	115	75	45	70	45	30
PF beam	40	50	95	65	40	65	45	25
하부구조	27	100	185	125	70	105	70	40
옹벽 및 하수	24	80	245	165	95	155	105	60

* X_{sd} - 구조설계를 통해 도출된 피복두께

도표 3. 개선된 철도설계기준(안)으로부터 도출한 설계피복두께

구분	f_{ck} (MPa)	X_{sd}^* (mm)	x_r (mm)					
			OPC			SG 40%		
			250m	500m	1000m	250m	500m	1000m
상부바닥판	27	50	137	89	48	74	48	26
PSC beam	35	40	90	50	검토불필요	49	27	검토불필요
PF beam	40	50	70	31	검토불필요	38	17	검토불필요
하부구조	27	100	137	89	48	74	48	26
옹벽 및 하수	24	80	161	109	65	87	59	35

* X_{sd} - 구조설계를 통해 도출된 피복두께

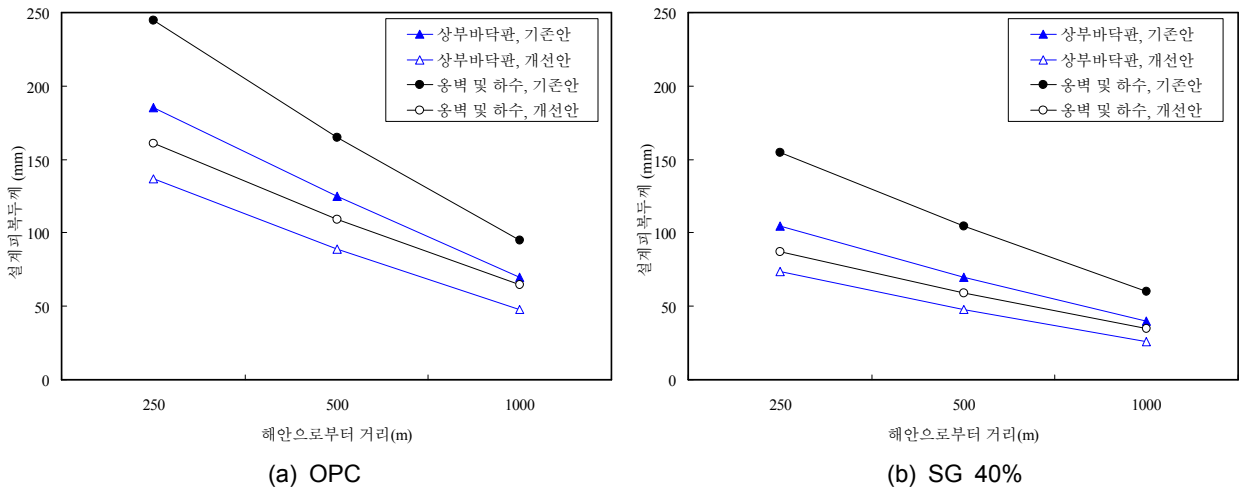


그림 2. 내구수명 100년을 만족하는 설계피복두께 (mm)

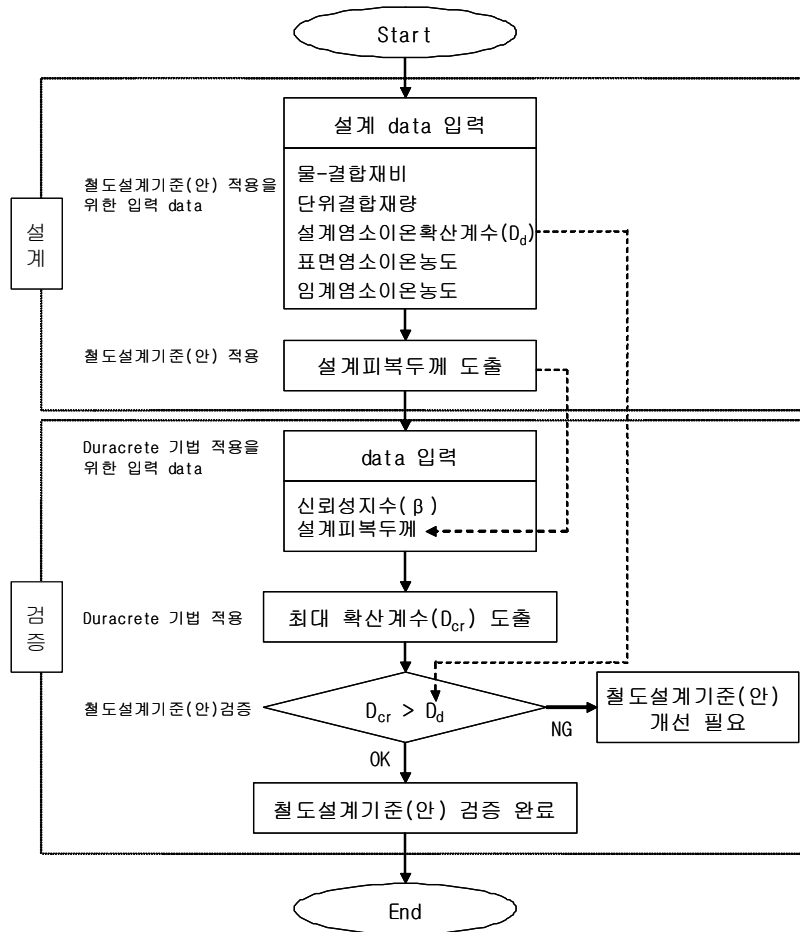


그림 3. 개선된 철도설계기준의 염해 내구성 설계 검증 flow chart⁵⁾

도표 4. 개선된 철도설계기준(안)의 검증(보통포틀랜드시멘트)

구분	X _{sd} ¹⁾ (mm)	x _r (mm)			D _{cr} (×10 ⁻¹² m ² /sec)			D _d (×10 ⁻¹² m ² /sec)	판정기준	결과
		250m	500m	1000m	250m	500m	1000m			
상부바닥판	50	137	89	48	-	-	33.29	11.70	D _d < D _{cr} ?	OK
PSC beam	40	90	50	검토불필요	-	18.23	-	6.99		
PF beam	50	70	31	검토불필요	-	21.24	-	5.70		
하부구조	100	137	89	48	-	-	33.29	11.70		
옹벽 및 하수	80	161	109	65	-	-	40.27	14.59		

* X_{sd} - 구조설계를 통해 도출된 피복두께

도표 5. 개선된 철도설계기준(안)의 검증(고로슬래그미분말 40%치환)

구분	X _{sd} ¹⁾ (mm)	x _r (mm)			D _{cr} (×10 ⁻¹² m ² /sec)			D _d (×10 ⁻¹² m ² /sec)	판정기준	결과
		250m	500m	1000m	250m	500m	1000m			
상부바닥판	50	74	48	26	-	30.75	44.39	11.70	D _d < D _{cr} ?	OK
PSC beam	40	49	27	검토불필요	-	21.40	-	6.99		
PF beam	50	38	17	검토불필요	14.90	25.68	-	5.70		
하부구조	100	74	48	26	27.27	30.75	44.39	11.70		
옹벽 및 하수	80	87	59	35	-	37.41	47.56	14.59		

* X_{sd} - 구조설계를 통해 도출된 피복두께

4. 결 론

본 연구에서는 염해환경하에 있는 철도 콘크리트 구조물에 대한 기존 철도설계기준의 내구성 설계기법을 개선하고 이를 검증하였으며, 본 연구를 통한 결론은 다음과 같다.

- 1) 염소이온 확산계수 이력 및 시간의존성을 고려한 염소이온 확산계수를 도출하였으며, 이를 확산방정식에 적용하였다. 이를 통해 염소이온 침투 거동의 시간에 따른 의존성을 정확히 반영하여 현실적인 내구성 평가 및 설계가 가능하다.
- 2) 국내 해안 환경조건에 근거한 콘크리트의 표면 염소이온농도를 각 해안가에서의 현장 실험값을 토대로 조수 간만의 차가 큰 서, 남해안과 동해안으로 구분하여 제시하였으며, 이를 향후 개정에 반영될 수 있도록 보다 많은 데이터의 축적이 필요하다.
- 3) 본 논문에서 제안한 염해 내구성 설계 모델과 기존 철도설계기준의 모델에 대하여, 염해환경하에 있는 철도 콘크리트 구조물의 내구수명 100년을 보장할 수 있도록 내구성 설계를 수행하였으며, 최신 설계기법인 성능기반형 확률론적 설계기법을 사용하여 본 연구에서 제안된 모델을 검증하였다. 그 결과, 기존의 염해 내구성 설계기준이 매우 보수적인 설계결과를 유발하므로, 제안된 염해 내구성 설계 모델은 기존 시방기준의 이러한 문제점을 개선할 수 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국철도시설공단 및 사회기반 시설물 평가 중점 연구단(ISARC; 과제번호 C104A1020001-04A0202-00000)의 연구비 지원사업에 의해 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부 (2004), 콘크리트표준시방서(내구성편).
2. 건설교통부 (2004), 철도설계기준(철도교편).
3. 송하원, 백승우, 이현정, 이선호 (2006), "염해환경하의 철도 콘크리트 구조물에 대한 내구성 설계", 한국철도학회 2006 춘계 학술발표회 논문집.
4. 日本土木學會 (2003), 콘크리트標準示方書[施工編]
5. Song, H.-W., Pack, S.-W. and Moon, J. S. (2006), "Durability Evaluation of Concrete Structures Exposed to Marine Environment Focusing on a Chloride Build-up on Concrete Surface", Proceedings of the International Workshop on Life Cycle Management of Coastal Concrete Structures, Nagaoka, Japan, pp. 1-9.
6. Poulsen, E. (1993), "On a model of chloride ingress into concrete, Nordic Miniseminar-Chloride Transport", Department of Building Materials, Chalmers University of Technology, Gothenburg, pp. 1-12.
7. Thomas, M.D.A. and Bentz, E.C. (2000), Life-365 Manual, released with program by Master Builders.
8. 한국콘크리트학회 (2004), 해양환경에서 염해를 받는 철근콘크리트조 구조물의 유지관리 지침(안), 특수환경 콘크리트 위원회.
9. Glass, G.K. and Buenfeld, N.R. (1997), "The Present of the Chloride Threshold Level for Corrosion of Steel in Concrete", Corrosion Science, Vol. 39, No. 5, pp. 1001-1013.
10. ISO/TC98 (2005), General principles on the design of structures for durability, ISO/CD 13823.