

# 해양 콘크리트 구조물의 신뢰성 기반한 내구성 평가

## Reliability based durability assessment of marine concrete structures

송 하 원\*      임 동 우\*\*      백 승 우\*\*\*      이 창 흥\*\*\*\*  
Song, Ha Won\*    Lim, Dong Woo\*\*    Pack, Seung Woo\*\*\*    Lee, Chang Hong\*\*\*\*

### ABSTRACT

In order to prevent deterioration of reinforced concrete structures exposed to marine environment, performance based durability design than the design by conventional deemed-to-satisfy rule should be concerned. For example, even though chloride threshold level, which is a major parameter for durability design, is defined as a  $1.2 \text{ kg/m}^3$  in the Korean concrete specification, it shows that the chloride threshold level leads to over design in its real application so that realistic value should be determined for the performance design. In this paper, not only the probabilistic properties of chloride threshold level obtained from published data are taken into account, but also the experimental results of the probabilistic properties using surface chloride content, diffusion coefficient, cover depth are considered in the assessment utilizing the concept of performance based durability design. In computation, the Monte Carlo Simulation (MCS) is used to perform an assessment due to chloride attack for a target submerged tunnel box. This study found that the specification on current chloride threshold level should be modified for more rational and accurate assessment and design.

### 요 약

해양 환경에 노출된 구조물의 열화를 평가하는데 있어서 신뢰성을 확보하기 위해서는 기존의 사양설계에 비해 한 단계 발전된 신뢰성에 기반한 확률론적 설계가 필요하다. 또한 내구성 설계에 있어서 중요한 변수가 되는 임계염화물량은 국내 콘크리트 시방서에서  $1.2\text{kg/m}^3$ 으로 결정되었으나, 실설계 적용시 과다 설계를 유발하는 등의 문제를 보여주고 있다. 본 논문에서는 기존 문헌을 통해 임계염화물량의 확률 특성을 결정하고, 실제 실험 및 문헌 고찰을 통하여 표면염화물량, 확산계수, 피복두께의 확률적 특성을 고려하였다. 이를 이용하여 Monte Carlo Simulation을 활용한 신뢰성 염해 내구성 해석을 첨대 터널 구조물에 대해 수행하여 대상 구조물의 염해내구성능을 평가하고 콘크리트 표준시방서에서 제시한 부식 임계 염소이온농도에 대한 타당성을 검토하였다. 분석 결과, 현실적인 염해 내구성 설계 및 평가를 위하여 기존에 제안된  $1.2\text{kg/m}^3$ 의 임계값에 대한 검토 및 개선이 필요함을 알 수 있었다.

\* 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수·공학박사·song@yonsei.ac.kr

\*\* 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 석사과정·ypogle@hanmail.net

\*\*\* 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사과정·공학석사·yannism@cmme.yonsei.ac.kr

\*\*\*\* 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사과정·공학석사·lch1730@cmme.yonsei.ac.kr

## 1. 서 론

콘크리트 구조물의 염해 내구성 설계 방법은 그 설계 수준에 따라 사양설계, 결정론적 설계, 확률론적 설계의 3가지로 분류할 수 있다<sup>1)</sup>. 염해를 받는 신설 구조물의 내구성 설계는 해당 구조물의 관련 자료가 충분치 않으므로 실제 구조물의 성능과 환경 하중을 미세하게 고려할 수 없는 사양설계나 안전계수법과 같은 방법에 의해서 설계하지만, 기존 구조물을 평가하는 경우에는 대상 구조물로부터 구한 신뢰성 있는 실측자료를 기반으로 하여 전확률법을 통해 구조물의 잔존 수명을 보다 정확히 평가할 수 있다<sup>2)</sup>. 이러한 염해 내구성 평가 기법을 적용하기 위해서는 염소이온 침투에 관련된 변수(표면 염화물량, 확산계수, 임계염화물량)의 합리적인 결정이 선행되어야 한다. 그 중에서 임계염화물량은 철근의 부식개시를 나타내는 주요 변수로서 현재 국내외 관련기준<sup>3),4),5)</sup>에 명확히 제시되어 있다. 특히 2004년 제정된 콘크리트 표준시방서 내구성편<sup>3)</sup>에는  $1.2\text{kg/m}^3$ 으로서 임계염화물량을 정의하고 있지만, 콘크리트 단위체적당 중량으로 나타내는 임계치는 결합재의 부식저항특성을 제대로 나타내지 못하는 문제가 발생하여 구조물의 내구수명을 과소평가할 우려가 있다<sup>6)</sup>. 따라서 본 연구에서는 국내외 관련 기준에서 제시한 임계염화물량을 문헌조사를 통해 구한 실제 실험값과 비교분석하여 그 타당성을 평가하고자 한다.

## 2. 확률론적 내구성 해석

신뢰성 이론을 기본 개념으로 하고 있으며, 환경하중과 내구성능으로 표현되는 한계상태함수( $g(t)$ )를 통해 식 (1)과 같이 시간  $t$ 에서 구조물이 내구적 한계상태에 도달할 확률을 계산한다.

$$P_{F,t} = \frac{n(g(t) < 0)}{N} = \frac{n(C_{lim} - C_d(t) < 0)}{N} = \Phi(-\beta_t) \quad (1)$$

여기서,  $C_d(t)$ 는 시간  $t$ 에서의 염소이온농도,  $P_{F,t}$ 는 시간  $t$ 에서 내구적 한계상태에 도달할 확률을 나타내며,  $N$ 은 전체표본개수,  $n(g(t) < 0)$ 은  $g(t) < 0$ 을 만족하는 개수,  $\Phi$ 는 표준정규분포함수,  $\beta_t$ 는 신뢰성 지수를 나타낸다. 본 연구에서 구조물의 내구수명은 사용 개시 후 내구적 파괴확률이 10%에 도달하였을 때로 정의하였으며<sup>5)</sup>, 이는 신뢰성 지수 1.3에 해당하는 값을 의미한다.

## 3. 염해를 받는 구조물의 내구 수명 예측

### 3.1 해석 입력 변수

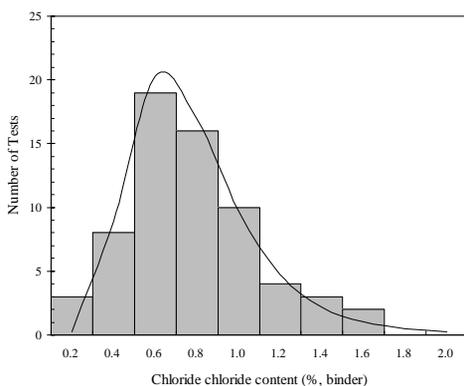


그림 1 임계염화물량의 히스토그램<sup>8)</sup>

본 연구에서 제안한 확률론적 내구수명 예측 기법을 실제 구조물에 적용하기 위하여 대상 구조물로서 해저 RC 터널 구조물을 선정하였다. 목표내구수명 100년으로 설계된 대상 구조물에는 4성분계 콘크리트가 사용되었으며, 단위 결합재량은  $400\text{kg/m}^3$ , 콘크리트의 물-결합재비는 35%로 설계되었다. 표면염화물량, 염소이온 확산계수와 피복두께는 기존 문헌 및 현장 실험을 통해 구한 값을 입력 변수로 사용하였다<sup>7)</sup>. 임계염화물량의 적용을 위하여 우선 기존의 국내외 여러 문헌에서 보고한 실험값을 정리하여 그 히스토그램을 다음의 그림 1과 같이 나타내었다.<sup>8)</sup> 총 65개 실험값의 통계적 분석을 통하여 임계염화물량은 대수정규분포를 따르고 있으며, 평균이 결합재 중량 대비 0.69%이고 표준편차가 0.39%임을 알 수 있었다. 이는 기존의 국내의 기준에서 제시한 값에 비해 약 75%이

상 큰 값을 보이는 것으로 나타났다. 콘크리트 표준시방서 내구성편(2004)<sup>3)</sup>에서 제시한 임계값인  $1.2\text{kg/m}^3$ 과의 비교분석을 위하여, 본 연구에서는 해석 적용 임계염화물량을 BS 8110<sup>4)</sup>에서 제시한 결합재 단위중량 대비 0.4%와 앞서 수행한 문헌 분석을 통해 얻어진 결합재 중량 대비 0.69%의 총 세

가지 경우에 대해서 해석을 수행하고자 한다(표 1).

표 1 대상 터널 구조물에 대한 구간별 해석 입력변수

입력변수	단위	입력값		분포	참고문헌
		평균	표준편차		
표면염소이온농도	%, (결합재 중량대비)	3.0	0.9	정규	-
피복 두께	mm	94.7	9.5		-
확산 계수	$m^2/s \times 10^{-12}$	3.77	0.92		-
임계염화물량	%, (결합재 중량대비)	0.69	0.456	대수정규	(8)
		0.4	0.264		(4)
	$kg/m^3$	1.2	0.198		(3)

### 3.2 해석 결과

목표내구수명 100년으로 설계된 대상 구조물에 대한 확률론적 내구성 평가를 위하여 표 1의 입력변수를 식 (1)에 적용하였다. 총 3가지의 임계염화물량( $1.2kg/m^3$ , 0.4%, 0.69%)에 대하여 시간에 따른 부식 발생 확률과 신뢰성 지수를 구하여 그림 2와 같이 나타내었다. 그림 2로부터 대상 구조물이 100년 경과하였을 때의 부식 발생 확률은 13.3%, 8%, 1.9%이며, 신뢰성 지수는 1.1, 1.4, 2.1임을 알 수 있다. 또한 앞서 언급한 바와 같이 구조물의 염해 내구수명을 부식발생 확률 10%(신뢰성지수 1.3)으로 정의하였을 때, 대상 구조물의 내구수명은  $1.2 kg/m^3$ , 0.4%, 0.69%에 대하여 각각 85년, 110년, 200년으로 예측되었다. 결과로부터 알 수 있듯이, 국내 기준에서 제시된 임계치를 통한 내구수명은 85년으로서 대상 구조물의 설계시 정한 목표내구수명(100년)을 만족하지 못했다. 또한 결합재 중량대비 %로 규정한 BS 8110<sup>4)</sup> 기준에서 제시한 임계염화물량 0.4%에 비해 내구수명이 과소 평가되었음을 알 수 있었으며, 실제 실험값(0.69%)에 의한 내구수명의 50%에도 미치지 못하는 결과를 도출하였다. 국내 기준에서 제시한 임계염화물량이 안전측을 고려한 하한치로 설정되었을지라도, 단위체적당 중량단위( $kg/m^3$ )으로 정의된 임계치는 앞서 설명한 바와 같이 결합재의 부식 저항 특성을 고려하지 못한다는 문제가 있다. 또한 실제로 유럽 선진 내구성 설계 기준인 Duracrete<sup>9)</sup>에서는, 기존의 다양한 실험결과를 바탕으로 해수에 항시 접촉하는 경우의 임계염화물량은 비말대, 조수간만대에 있는 콘크리트 구조물에 비해 매우 높은 임계치(결합재 중량대비 1.8%)를 적용하고 있다. 따라서 현재 국내 기준에서 제시된 임계염화물량  $1.2 kg/m^3$ 은 해안 콘크리트 구조물의 과다 설계를 유발할 가능성이 있으므로 이에 대한 개선의 여지가 있다고 판단된다.

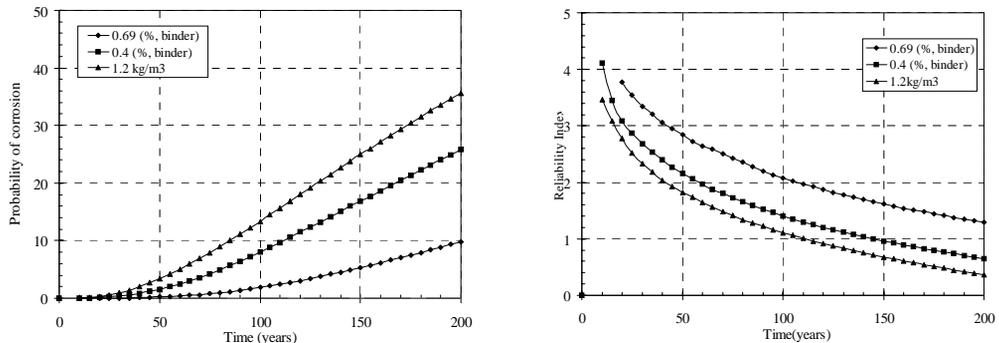


그림 2 실험값 및 국내외 시방서 제안값에 따른 잔존내구수명 검토

표 2 확률론적 방법에 의한 잔존내구수명 평가

구 분	콘크리트 표준시방서 <sup>3)</sup>	BS 8110 <sup>4)</sup>	실측값 <sup>8)</sup>
임계염화물량 ( $C_{lim}$ )	1.2 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	0.4 (% , 결합재중량대비)	0.69 (% , 결합재중량대비)
내구 수명(년)	85	110	200

#### 4. 결 론

본 연구에서는 성능중심의 확률론적 내구성 평가 기법을 통해 실제 구조물의 실측결과와 문헌조사를 통한 입력 변수를 적용하여 염해를 받는 콘크리트 구조물의 내구수명을 예측하였다. 해석에 앞서 염해 관련 주요 변수 중에서 임계염화물량을 조사하기 위하여 다수의 문헌조사를 통해 분석한 결과, 임계치의 평균값이 결합재 중량 대비 0.69%의 값을 나타내고 있어, 콘크리트 표준시방서 내구성편에서 제시하고 있는 값과 비교하였을 때 약 2배 이상의 값을 보임을 알 수 있었다. 현재 콘크리트 시방서에서 제시하고 있는 임계염화물량의 타당성을 분석하기 위하여, 국외 기준에서 제안한 결합재 중량대비 0.4% 및 실험자료를 바탕으로 조사한 결합재 중량대비 0.69%의 임계치를 국내 기준의  $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 과 함께 내구수명을 예측하여 이를 비교하였다. 해석 결과로부터  $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 을 적용하였을 때, 다른 두가지 경우와 달리 대상 구조물이 목표내구수명(100년)을 만족하지 않음을 알 수 있었다. 해수중에 침지되어 있는 콘크리트의 임계염화물량은 유럽의 기준에서 결합재 중량대비 1.8%까지도 허용하고 있는 반면, 현재 기준에서 제시된  $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 의 값은 구조물의 여러 염해 환경조건을 고려하지 않고 일관되게 적용하고 있으며, 실제 실험값에 비해서도 상당한 차이를 보이므로 대상 구조물에 대해 과다 설계를 유발할 가능성이 크다고 판단된다. 따라서 효율적인 염해 내구성 설계 및 평가를 위하여 이에 대한 개선 및 검토가 필요할 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 건설교통부 건설 핵심과제의 일환으로서 사회기반시설물 평가 중점 연구단 및 성능중심의 건설기준표준화 연구단의 지원으로 수행된 결과의 일부이며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 송하원, “콘크리트 구조물의 내구성능 설계의 도입배경 및 발전방향,” 한국콘크리트학회지, pp. 14~23. 제18권, 4호, 2006.
2. 송하원, 임동우, 백승우, “염해를 받는 콘크리트 구조물의 확률론적 내구성 평가 및 설계”, 대한토목학회 2007년도 정기 학술대회 논문집, pp. 396~399, 2007.
3. 건설교통부, “콘크리트 표준시방서 내구성편” 2004.
4. British Standard 8110, “Part1. Structural use of concrete - Code of practice for design and construction”, British Standards Institute, 1985.
5. CEB-FIP, “Model Code for Service Life Design”, the International Federation for Structural Concrete (fib), Task Group 5.6, pp. 38~39, 2006.
6. K.Y. Ann, and H-.W. Song, “Chloride Threshold Level for Corrosion of Steel in Concrete”, Corrosion and Science, pp. 4113~4133, vol 49, 2007.
7. H-.W. Song, S.W. Pack, and K.Y. Ann, “Probability-based Service Life Prediction of Fixed Link Bridge Exposed to a Marine Environment”, the 4th CECAR, 2007.
8. H-.W. Song, S.W. Pack, and K.Y. Ann, “Probabilistic Assessment to Predict the time to Corrosion of Steel in Reinforced Concrete Tunnel Box Exposed to Sea Water”, Structural Safety, 2008, submitted.
9. Duracrete, “Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures”, Report BE95-1347/R17 European Brite-Euram Programme, 2000.