

## 염해 손상을 받는 RC 교량 바닥판의 강도 신뢰성 지수와 철근 부식도 등급과의 관계 연구

A Study on the Relation of Rebar Corrosion Rate and the Strength Reliability Index of RC Slab Decks having Chloride Contamination.

차 철 준\*  
Cha, Chul-Jun

박 미 연\*\*  
Park, Mi-Yun

조 호 남\*\*\*  
Cho, Hyo-Nam

### Abstract

This study focuses on evaluating the reliability index of a deck of RC slab having chloride contamination and studying the relation of grades of rebar corrosion and the reliability index of a bridge deck. For this purpose, first, the failure probability related to flexural strength was calculated using a model for deterioration, which contains the application of de-icing salts that usually causes significant long-term deterioration and reduction in the structural safety for strength of structure. And also, according to the depth of covering, the chloride contents depending on time due to depths of RC slab deck, the appearance time for initial corrosion of rebar and the occurrence time for split of covering were investigated using a MCS method.

### 요 지

본 연구의 목적은 염화물의 침투로 인한 RC 교량 바닥판의 신뢰성지수를 계산하고 철근부식으로 인한 교량 턱의 상태등급과 신뢰성지수와의 관계를 연구하는 것이다. 이런 목적을 위해 먼저 휨강도와 관련한 파괴확률을 열화(제설염에 의한 장기간의 구조물 손상 및 구조물 안전성 저하)와 관련하여 계산하였으며 구조물 면에 포함된 염화물의 농도, 피복두께 및 철근의 초기부식시간 그리고 염화물 확산으로 인한 철근의 균열시간 등을 MCS기법을 이용하여 찾아내었다.

**Keywords** : RC Slab Deck, Rebar, Corrosion, Reliability Index, Chloride Penetration

**핵심 용어** : RC 슬라브택, 철근, 부식, 신뢰성 지수, 염화물 침투

\* 정회원, 한국시설안전기술공단 부장

\*\* 정회원, UNICONS(주) 분석 평가 실장, 한양대 박사과정

\*\*\* 정회원, 한양대 토목공학과 교수

E-mail : cjcha@kistec.or.kr 031-400-4027

• 본 논문에 대한 토의를 2005년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 2005년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

최근 해양구조물의 건설사례증가와 더불어 제설염으로 인한 구조물의 성능저하가 빈번히 발생하고 있다. 즉, 염화물침투와 확산으로 인해 철근에 부식이 발생하고 시간이 지남에 따라 철근단면의 감소로 이어져 구조물의 휨 성능저하를 가져오게 된다. 실제로 영국의 경우 지난 수십 년 간 콘크리트 구조물의 손상 원인을 검토<sup>(4)</sup> 해본 결과 구조물의 성능저하원인으로 철근부식이 약 47%를 차지했고 그 중 직간접적으로 염화물의 영향을 받은 것이 약 31%에 이르는 것으로 보고된 바 있다. 더욱이 Thoft-Cristensen (2000)<sup>(5)</sup> 과 콜로라도 주 조사에 따르면 제설목적으로 살포된 염소이온의 침투가 중성화보다 더 큰 원인으로 작용했음을 알 수 있다. 우리나라의 경우 콘크리트구조물의 성능저하원인에 대한 정확한 통계자료는 없지만 최근의 자료를 보면 철근부식으로 인한 경우가 많은 것으로 보고<sup>(1)-(3)</sup>되고 있다. 그러나 실제공용중인 콘크리트구조물의 부식발생요인은 여러 가지 복합적인 원인들의 작용 때문에 어떤 특정한 요인으로 규명하는 것은 사실상 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 철근 부식의 요인을 염화물에 의한 것으로 제한하였고 염화물의 침투 및 확산에 따른 RC 교량 바닥판의 휨성능 저하에 관심을 두었다. 또한 육안 관찰에 기초한 철근 부식도 등급의 정성적 평가와 휨 성능 저하에 따른 요소 신뢰성 지수 감소의 정량적 평가를 부식발생 및 균열발생 시간 예측을 통해서 관계 짓고자 했다. 비록 정성적인 평가를 정량적 평가로 표현하는 데에는 많은 한계가 있으나, feedback을 고려한 신뢰성 기초의 설계 및 유지관리 전략을 세우기 위해서는 반드시 필요한 작업일 것이다.

## 2. 염화물 확산 및 철근부식 관련 이론 고찰

### 2.1 염화물 확산 이론

염화물 이온의 확산속도를 분석하는 방법으로 정상

상태(Steady state)에서의 Fick의 제1법칙과 비정상 상태(non-Stead state)에서의 Fick의 제2법칙 있다. Fick의 제1법칙은 확산 셀을 사용하여 시멘트 페이스트 또는 시멘트 모르타르의 확산계수를 분석하는 것으로 다양한 확산 셀이 개발되었다.<sup>(6)-(7)</sup> 반면에 Fick의 제2법칙은 콘크리트 공시체를 해안가에 폭로시키거나 또는 해수 중에 침적시킨 후 재령에 따른 깊이별 염화물 함유량을 분석한 결과로부터 염화물 침투깊이와 염화물 확산계수 등을 구하는 방법이다. 이 중 실구조물에 적용 가능하며, 시간에 따른 깊이별 염화물 함유량과 철근부식 임계값 까지 도달하는데 걸리는 시간을 예측할 수 있는 식을 유도하기위해 본 연구에서는 Fick의 제2법칙을 이용하였다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

여기서,

C: t시간에서 표면으로부터 x 깊이에서의 염화물 농도

D: 확산계수

### 2.2 염화물 침투 및 확산에 영향을 미치는 요인

염화물 침투 및 확산은 기본적으로 콘크리트가 가지고 있는 재료적·배합상·시공상의 특성에 영향을 받는다. 또한 미세 균열 및 공극, 농도차, 화학적 고착 및 흡착 등의 복잡한 현상, 대기 중의 습도 및 온도, 압축 및 인장력에 의한 균열 차폐 및 진진 등 여러 변수들이 복합적으로 작용함으로써 실제적으로 정확한 침투 및 확산 속도를 예측하기란 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 비정상상태(non-Stead state)에서의 염화물 확산에 따른 작용에 제한하였다.

### 2.3 염화물의 확산속도

Hoffman and Weyers(1994)<sup>(8)</sup>는 미국 내 321개의 콘크리트 교량 바닥판으로부터 얻어진 표본들을 비

교함으로써, 시간이 지남에 따라 추가된 염화물이 콘크리트 표면에 누적되지 않고 농도차에 의해 콘크리트 내부로 확산되기 때문에 표면과 내부의 농도가 일정해 진다는 것을 알아냈다. 이러한 경우 t 시간에서 콘크리트 표면으로부터 x 깊이에서의 염화물 함유량을 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$C(x,t) = C_0 \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{tD}} \right) \right] \quad (2)$$

여기서,

$C_0$  : 표면의 염화물 함유량

$D$  : 표면상의 확산계수

$\operatorname{erf}$  : Error function

또한 해안지역에서(해양성 대기)는 염분확산 바람에 의해 수분에 포함된 염화물이 이동)으로 염화물이 콘크리트 표면에 흡착되고, 그로 인해 표면의 염화물 농도도 공용시간이 증가함에 따라 증가한다. 이러한 경우에 t 시간에서의 콘크리트 표면으로부터 x 깊이의 염화물 함유량을 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$C(x,t) = 2W \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\frac{t}{\pi D}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \\ - \frac{x}{2D} \left[ 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{tD}}\right) \right] \end{array} \right\} \quad (3)$$

여기서,

$D$  : 표면상의 확산계수

$\operatorname{erf}$  : Error function

$W$  : Diffusion flux on concrete surface( $N/m^2s$ )

## 2.4 철근부식발생을 위한 임계 염화물함유량

염화물 함유량이 철근 주변의 부동태 막을 분해하기 위해서는 임계 염화물 함유량의 값( $C_{crit}$ )에 이르러야만 한다. Table 1과 Table 2에서 나타낸 바와 같이 임계 염화물 함유량 값을 구하기 위해 최근까지도 많

Table 1 일반적인 부식 임계치

부식 임계치		Reference
$N/m^3$	% by con'c wt.	
00.7	0.03	Lewis(1962)
0.02 ~ 0.28	0.0260 ~ 0.039	Hausmann(1967)
0.06 ~ 0.13	0.0260 ~ 0.057	Cady(1978)
0.05	0.022	Pfeifer et.al(1986)

Table 2 Condition 에 따른 부식 임계치

Condition	$Cl$ % by con'c wt.		
	$W/C=0.3$	$W/C=0.4$	$W/C=0.5$
Submerged Zone	0.33	0.3	0.225
Tidal Zone	0.15	0.12	0.09
Atmospheric Zone	0.12	0.09	0.06

은 연구가 이루어져 왔다.<sup>(9)</sup> 대부분의 수치적 연구에서 임계 염화물 함유량 값을  $0.06 \sim 0.12 N/m^3$ 의 범위로 놓는 경향이 있다. 이것은 염화물 확산속도에서와 같이 임계 염화물 함유량 값도 물 시멘트 비, 시멘트 종류, 온도, 물과 산소의 함유량, pH, 플라이애쉬 함유량, 실리카 요소의 함유량 등과 같은 여러 요인의 영향을 받기 때문이다. 따라서 유사한 교량에서조차도 그 값이 제각기 다르다. 이러한 이유로 본 연구에서도 임계 염화물 함유량의 값을  $0.06 \sim 0.12 N/m^3$ 의 사이의 uniform 분포로 된 확률변수로 제한하였다.

## 2.5 철근부식

### 2.5.1 철근부식의 메커니즘

철근 부식은 전기·화학적 반응에 의해 발생하며, 산화가 일어나는 애노드, 전기·화학적 환원이 일어나는 캐소드, 전도체, 전해질 등으로 이루어져 있다. 일반적으로 콘크리트 내부는 강알칼리성이고, 철근 표면에 얇은 부동태 피막( $20 \sim 60 \text{ \AA}$  두께의 수산화 제2철)이 있어서 부식이 방지된다. 그러나 콘크리트 내부로 침투 및 확산된 염화물이 염화이온( $Cl^-$ )으로 존재하여 부식 임계치를 초과함으로써 철근이 Fig. 1 같이 부분적으로 부식된다. 또한 이때 발생하는 붉은 녹은 강재의 단면을 감소시키고 팽창압(Fig. 2 참조)을 유

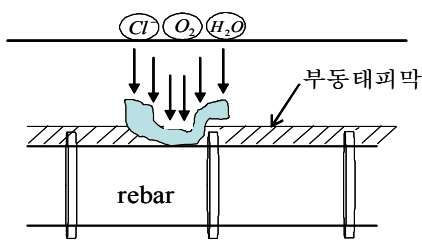


Fig. 1 염화 이온에 따른 부식

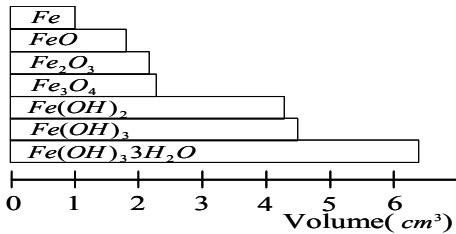


Fig. 2 부식에 따른 체적팽창

발시켜 초기 균열의 원인으로 작용하게 된다. 그러나 본 연구에서는 철근부식을 철근의 전길이, 전둘레에 걸쳐 동일하게 진행된다고 가정하였다.

### 2.5.2 철근부식에 영향을 미치는 요인

앞서도 언급했듯이 실제 RC 교량 바닥판의 철근부식은 많은 요인이 복합적으로 작용함으로써 발생된다. 그러나 사실상 직접적인 인자는 철근주위의 부동태피막 파괴이며, 부동태 피막 파괴의 주 원인으로 중성화에 의한 콘크리트의 pH 저하와 염화물 확산에 따른 임계 염화물 함유량 값의 초과 등을 들 수 있다. 또한 이러한 요인들은 RC slab deck의 강도, 밀실성, 건조수축 및 균열, 피복두께 등의 인자와 부식유발 촉진적인 외부 환경과 더불어 작용하게 됨으로써 부식진전의 속도차를 가져오게 된다. 따라서 본 연구에서는 복잡한 부식요인을 좀더 단순한 모델로써 구성하기위해 초기 염화물 함유량과 피복두께, 철근의 직경, 일반 지역과 염화물을 다량 포함하고 있는 해안 환경 등의 범위에 한정된 자료를 토대로 진행하였다.

### 2.5.3 철근부식 과정의 모델링

철근부식 과정의 현상모델은 R. Francois 와 G. Arliguie 의 실험 결과에 의해 제시된 것을 기초로 하

였다. 실제 현상에서 뚜렷하게 나뉘는 것은 아니지만 가장 보편적인 진행과정이고, 또한 경우에 따라서 활하중이나 기타 힘균열 존재 여부 등에 의해 초기 시작기간의 위치가 다음 단계로 결정되어질 수 있다. 이러한 현상 모델의 단계는 아래와 같이 정리할 수 있다.

① 잠복기간 : 잠복기간 동안의 부식 인자는 철근 주변에 도착하기 위해 최초 생긴 균열을 통해 침투한다. 또한 침투속도는 균열 폭의 크기보다는 균열의 유무에 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 초기 균열 및 공용 중 발생하는 균열은 단지 염화물이 철근까지 도달하는 시간단축에만 영향을 준다고 제한하였다.

② 개시기간 : 균열을 통하여 염화물 확산이 철근의 부동태피막까지 이르고, 부식을 일으킬 수 있는 임계 염화물 함유량의 값에 도달한다. 이때 부식은 비흡착 지역(bleeding에 의한 부착력 손실지역)의 철근을 따라 진전된다. 이 단계는 본 연구에서 초기 부식 개시시간( $T_{corr}$ )과 연관지어 연구를 진행하였다.

③ 유도기간 : 부식물이 결손부분의 공극을 채우거나, 채워진 부식물의 팽창압이 균열을 발생시키기 위해서는 다소 부족하다. 따라서 초기 균열이 발생되지 않는 반면에 부식의 진전속도를 상당히 늦춘다. 즉 유도기간과 다음 단계인 진전기간 사이를 부식으로 인한 초기균열개시시간( $T_{crack}$ )과 연관지을 수 있다.

④ 진전기간 : 모든 콘크리트 피복에 염화물이 확산되고 그로 인해 부식이 다시 시작된다. 또한 추가 누적되는 부식물의 팽창압으로 인해 균열이 발생·진전된다. 따라서 철근의 단면손실은 외부 활하중이 아닌 철근의 부식률에 따라 달라진다.

### 2.5.4 철근 부식정도 평가

#### 1) 철근의 부식정도 평가 방법

국·내외적으로 철근부식을 측정하기 위한 많은 방법들이 개발되었다. 특히 비파괴 검사방법으로 부식유무를 정성적·정량적으로 측정할 수 있다. 그러나 일반적으로 이용하고 있는 부식의 정도를 측정하는 방법으로는 육안에 의한 방법과 부식 면적을 계산법, 중량감소를 계산법 등이 있다. 이 중 가장 간편하고 단시간에 부식정도를 측정할 수 있는 것이 육안에 의한 방법이다. Table 3에서와 같이 이 방법은 다소 주관적

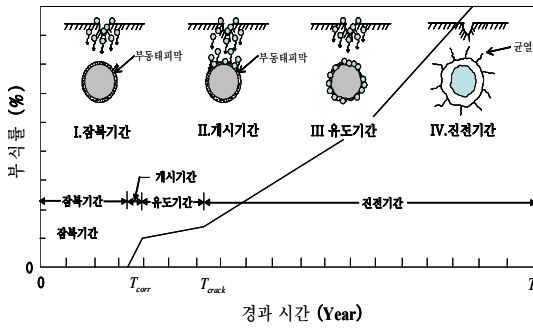


Fig. 3 철근의 부식 단계별 모델링

Table 3 철근의 부식도 등급

등급 부호	철근 상태
A	흑피의 상태, 또는 녹은 있지만 전체적인 얇고 치밀한 녹, 콘크리트 면에 부착 안됨
B	콘크리트 면에 부착
C	부분적 들뜬 녹 있지만, 작은 면적에 반점
D	단면결손 육안관찰 힘들지만, 철근 표면돌레 및 전체길이에 걸쳐 들뜬 녹 존재
E	단면 결손이 일어나고 있음

안전점검 및 정밀안전진단 세부지침

- 건교부/시설안전관리공단 (2000, 9)

이고 정성적인 면이 내포되어 있다. 그러나 이전의 대부분의 유지·보수 자료는 정성적인 것이 대부분이기 때문에 본 연구에서는 육안에 의한 철근 부식도 등급을 이용해서 정량적인 강도 신뢰성 지수로 변환하고자 하였다.

### 2.5.5 허용 균열폭에 관한 규정

균열을 통제하기 위한 기준으로 국내 콘크리트 시방서, 미국의 ACI 224, ACI 318 및 유럽의 CEB-FIP code가 있다. 이는 콘크리트의 특성상 발생되는 균열의 폭을 제한함으로써 부식 환경에서의 철근부식을 방지하는 목적도 포함되어 있다. 특히 ACI 224는 철근 부식 환경을 다섯 가지로 구분하여 각각의 허용 균열 폭을 제한했다. 또한 [ACI 224 식 2.1]은 콘크리트 부재의 인장 축 하단 균열폭을 계산하여 제한하도록 되어 있다. 그러나 본 연구에서는 준공 초기에 허용 균열폭 이내의 미세 균열만이 존재하였다고 가정하였다.

## 3. 활하중 모델

본 연구는 염해가 RC slab deck에 미치는 영향에만 중점을 두었기 때문에 활하중은 3등급인 DB-13.5(총 24.3 ton, 실제 설계하중은 허용 응력설계법 기초한 DB-9 임)로 하였다. 즉 시간이 지남에 따라 증가되는 활하중의 효과, 최대 활하중 모델에 의한 균열폭 증가 및 부식개시시간 단축 등의 모델 등은 본 연구에서 포함하지 않았다. 그러나 사실상 활하중에 의한 사용성 파괴 및 개시시간 단축, 균열에 미치는 영향 등은 매우 중요한 사항이므로 추후 신뢰성에 기초한 분석에 활용할 수 있는 실험 자료 및 공용상의 자료를 획득하여 추가해야 할 것이다.

## 4. 강도 신뢰성 해석

### 4.1 RC slab deck의 강도 신뢰성 해석

본 연구에서는 RC slab deck의 휨 강도에 대한 요소신뢰성해석(Element Reliability Analysis)을 기초로 하였다. 이미 국·내외적으로 요소 및 체계신뢰성해석(System Reliability Analysis)에 대한 연구가 수행되고 있으나, 점검 및 유지·보수관리가 요소별로 이루어지고 있기 때문에 요소신뢰성해석을 수행하는 것이 타당할 것으로 사료된다. 따라서 RC slab deck의 한계 상태방정식은 아래와 같이 정식화 될 수 있다.

$$g(\cdot) = M_U - M_{DL} - M_{LL} \quad (4)$$

여기서,

$M_U$  : RC slab deck의 휨에 대한 극한 모멘트

$M_{DL}$  : RC slab deck의 사하중에 대한 모멘트

$M_{LL}$  : 활하중에 대한 모멘트

### 4.2 시간 이력 신뢰성 해석

부식에 따른 교량의 열화손상은 하나 또는 여러 개의 구조적 요소가 가지고 있는 구조적 내력(capacity)의

감소를 유발시킨다. 그러므로 구조적 저항 즉 RC slab deck의 휨에 대한 극한 모멘트  $M_U$ (여기에서는  $R(t)$ 로 표기)는 시간에 따라 변한다. 또한 구조적 하중으로 작용하는 활하중 모멘트도 시간 상 (혹은 하중 밀도상)에서 무작위로 발생된다. 만약  $n$ 개의 독립적인 하중  $S_j$ 가 확정적 시간들  $t_j$  ( $j = 1, 2, 3, \dots, n$ )에서 시간간격 ( $0, t_L$ ) 사이에 발생한다면 이 시간 간격동안 임의의 시간에 구조물이 파괴될 확률을 아래와 같이 표현한다.

$$P_f(t_L) = 1 - P_r[R(t_1) > S_1 \cap \dots \cap R(t_n) > S_n] \quad (5)$$

여기서,

$$t_1 < t_2 < \dots < t_n$$

본 연구에서는 시간이력 신뢰성 해석의 결과를 보기 위해 1년 단위로 해석 결과를 산출하였다.

## 5. 적용 사례 및 수치해석

### 5.1 적용 사례

Fig. 4에서와 같이 적용 대상 교량은 공용 년수 20년 된 4경간 단순 RC slab 교량이다. 본 교량의 설계하중은 DB-9(설계 당시, 허용응력설계법, 현재 3등급교로 적용)이고, Deck 슬래브 폭은 4.0m (총 4.5m) 이고, 두께는 501mm이다. 또한 철근의 항복강도는  $350 N/m^2$ , 콘크리트의 압축강도는  $24 N/m^2$ , 상부와 하부 피복두께는 각각 53mm와 50mm이다. 본 교량

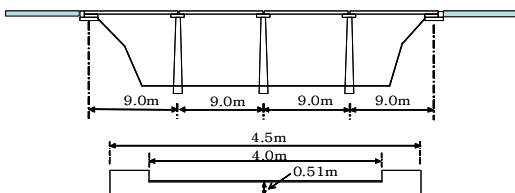


Fig. 4 적용 대상 교량 (4경간 RC Slab 교)

Table 4 주요 통계적 Parameter

Parameter	Mean	C.O.V	Distribution
$C_0$	0.35 $N/m^2$	0.50	log-normal
$C_{cr}$	0.09 $N/m^2$	0.19	uniform
Dead load	1.05 $D_n$	0.10	normal
Single Truck Live load (3등급교)	24.3 ton	0.10	normal
Model error	1.0	0.2	uniform
Humidity	0.75	0.05	normal

을 외관조사 한 결과 슬래브 하면에 폭 0.2~0.3mm의 균열이 전반적으로 발생되었고, 많은 부분에 걸쳐 0.4mm이상의 균열이 존재하며 박리 및 박탈 현상도 많이 발생되었다. 또한 철근 노출 및 부식이 심한 상태로 녹물 및 니도가 균열사이로 다량 배출된 상태이다. 연속 RC slab 교량에 적용되는 재료와 하중, 치수 등의 통계적 파라메타가 Table 4에 있다. 단, 위의 적용대상 교량은 다음과 같은 가정사항을 기초로 하였다. (i) 이 교량의 일일교통량은 500대이고 교통량에 따른 급격한 구조적 결함이 발생하지 않는다. (ii) Slab Deck의 철근부식 원인은 제설염이 지배적이다. (iii) Slab Deck과 하부구조는 염화물이 포함된 해양성 대기에 노출되어 있다. (iv) 슬래브의 깊이, 모든 재료적 특성과 모든 부식관련 파라메타 등은 교량 전체에서 동일하다. (v) 피복두께와 철근의 단면적은 각 단면에서 통계적으로 독립이다. (vi) 콘크리트의 압축강도는 일정하다.

### 5.2 수치해석 및 결과

#### (1) 염화물 함유량에 따른 부식개시시간 예측

우선, 대기 중 다량의 염화물을 포함한 해안 지역의 교량과 직접적인 제설 염 살포 등이 미치는 영향을 알아보기 위해 대상교량의 자료를 수집하여 수치해석을 실시한 결과 Fig. 5와 같은 결과가 나왔다. 즉 제설염의 직접적인 살포 및 초기 휨 균열이 존재하는 경우와 더불어 해양성 대기에 노출된 경우, 제설 염만 살포한 경우보다 약 1.5~2배 정도 빠르게 철근이 부식되었다. 이는 해안 지역일수록, 또는 초기 휨 균열이 존재할수록 염해에 의한 철근부식방지 대책 마련이 중요하

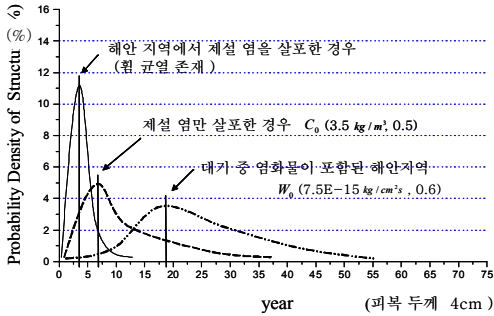


Fig. 5 철근의 초기부식 예측 개시시간

다는 것과 제설염 살포에 따른 염화 이온의 직접적인 침투를 차단할 수 있는 방수대책이 사실 상 RC slab deck의 수명에 큰 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다.

### (2) 피복두께의 영향

피복두께 산정 문제는 직접적으로 설계 및 유지·관리 단계 모두 연계되기 때문에 두께별 철근의 부식개시시간 ( $T_{corr}$ ) 및 균열개시시간을 ( $T_{crack}$ ) 정확히 예측한다는 것은 상당히 중요한 일이다. 그러나 실제 구조물에서는 피복두께와 더불어 많은 인자들에 의해 복잡적으로 작용하기 때문에 부식개시 및 균열개시 시간을 예측한다는 것은 한계가 있다. 따라서 본 연구에서 실험치 자료와 실제의 적용대상교량의 자료를 토대로 MCS기법을 이용하여 Fig. 6에서와 같이 피복두께가 각각 50mm와 60mm인 두 가지 경우의 부식개시 ( $T_{corr(5cm)}, T_{corr(6cm)}$ ) 및 균열개시시간 ( $T_{crack(5cm)}, T_{crack(6cm)}$ )을 예측하여 아래와 같은 결론을 도출했다.

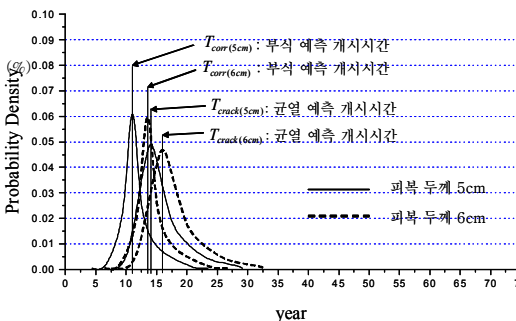


Fig. 6 철근의 초기부식 및 균열 예측 개시시간

Table 5 철근의 초기부식 및 균열 예측 개시시간

피복두께 (cm)	철근부식개시시간 ( $T_{corr}$ )		균열개시시간 ( $T_{crack}$ )	
	mean (t)	c.o.v	mean (t)	c.o.v
5	11.1	0.26	14.01	0.40
6	13.6	0.24	16.04	0.39

### (3) 철근 부식도와 신뢰성 지수

대상 교량의 염해에 대한 예상 신뢰성 지수 profile 이 Fig. 7과 같이 작성되어졌다. 또한 누적파괴확률도 Fig. 7과 같이 작성되었다. 대상 교량의 정밀 안전진단 결과 부식에 따른 교량의 상태등급 및 철근의 부식도는 모두 E 등급으로 나타났다. 본 대상교량의 수치 해석 결과 신뢰성 지수가 1.4에 근사했다. 이 대상교량의 정밀 안전진단 결과 내하력 평가에 따른 신뢰성 지수가 1.17인 것과도 유사했다. 따라서 본 교량은 오랜 공용기간에 따른 열화 손상과 설계하중을 초과한 차량 통행에 따른 부식 개시시간 단축과 신뢰성 저하가 수치해석의 값보다 다소 빠르게 진전시킨 것으로 사료된다. 본 연구에 따른 부식개시 및 균열개시 시간 예측을 토대로 Table 6과 같이 염해손상을 받는 RC 교량 바닥판의 시간별 철근상태와 강도 신뢰성 지수를 추정할 수 있다. 따라서 본 연구 결과는 공용시간별 염해 손상에 대한 점검 및 유지관리 조치시기를 결정하는 의사결정을 지원하며, 예측된 상태와 실제 상태의 비교에 의해 직접적인 열화손상 원인을 규명하는 지표로 삼을 수 있다. 또한 좀 더 많은 실험과 자료, 연구를 기반으로 예측과피시간 ( $T_{Failure}$ )을 추정한다면,

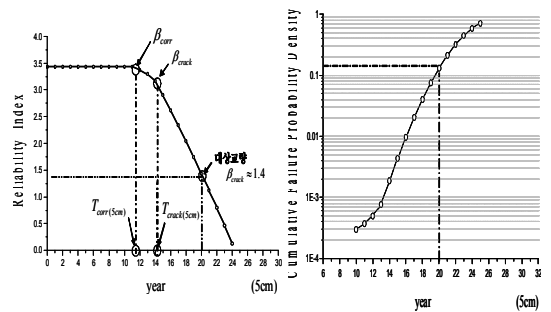


Fig. 7 대상교량의 예상 신뢰성지수 및 누적파괴확률

염해에 대한 목표 신뢰성지수 ( $\beta_{Target}$ )를 정립화 할 수 있고, 이를 설계 및 유지관리의 기준으로 한다면 단면의 최적설계 및 최적의 점검 시기·유지관리 전략 등을 수립할 수 있을 것이다.

Table 6 철근의 부식도와 신뢰성지수와의 관계

철근부식도 등급	모델상의 단계	강도 신뢰성 지수
A	잠복기간	$\beta_0$
B	개시기간	$\beta_0 \approx \beta_{corr}$
C		
D	유도기간	$\beta_{(T_{corr})} > \beta \geq \beta_{(T_{crack})}$
E	진전기간	$\beta_{(T_{crack})} > \beta$
현재상태 (E)	진전기간	$\beta_{(t=20)}$

Table 6 철근의 부식도와 신뢰성지수와의 관계

철근부식도 등급	예측 시간	대상교량 신뢰성지수
A	$t < T_{corr}$	$\beta_0 = 3.4348$
B	$t \approx T_{corr}$	$\beta_0 \approx 3.4348$
C		
D	$T_{corr} < t \approx T_{crack}$	$3.4348 > \beta \geq 3.1701$
E	$T_{crack} < t$	$3.1701 > \beta$
현재상태 (E)	$t = 20$	$\beta \approx 1.4$

## 6. 결론

본 논문에서는 대기 중 다량의 염화물을 포함한 해안 지역의 교량과 직접적인 제설염 살포 등이 미치는 영향과 피복두께의 영향, 그리고 국내 교량에 대한 철근 부식 개시시간과 균열 개시시간을 추정하였다. 또한 염해 손상에 지배적인 대상교량의 RC slab deck의 염해 손상에 따른 철근 부식과 그에 따른 성능저하 및 철근 부식도 등급과 관련 요소 신뢰성 지수를 추정하였다.

비록 본 연구는 제한된 염해 손상만을 고려한 RC slab deck의 휨 강도에 대한 요소 신뢰성에 기초를 두었지만, 더 많은 실험과 실제 공용 중인 교량의 자

료를 토대로 활하중 및 증성화 그리고 그 밖의 RC 구조물의 열화손상에 영향을 끼치는 주요인들을 더 연구한다면 그것들의 정량적 기준을 수립할 수 있을 것으로 사료된다.

## 참고문헌

1. 문한영, 김성수, 류재석, 김성섭 "해양환경하에 있는 콘크리트 구조물의 염해에 대한 고찰", 大韓콘크리트學會 學術發表會, 제8권 1호, pp.83-88.
2. 김성수 "海洋環境下에 방치한 콘크리트의 劣化 및 鐵筋의 腐食, 防蝕에 대한 研究", 漢陽大學校 大學院 土木工程學科 博士學位 論文, 1994.
3. 문한영, 김성수, "人工海水에서 實驗한 모르타르의 鐵筋腐蝕 平價에 대한 研究", 大韓土木學會論文集, 제13권 5호, pp.67-75.
4. P. A. M Basheer, S. E. Chidiac and A. E. Long, "Predictive Models for Deterioration of Concrete Structures." Construction and Building Materials, Vol.10, No.1, 1995 pp. 27-37, Dec.
5. Thoft-Christensen, P. "Stochastic Modelling of the Crack Initiation Time for Reinforced Concrete Structures", Structures Congress, Philadelphia, 2000.
6. Page, C.L., Short, N.R. and Tarras A.El., "Diffusion of Chloride Ions in Hardened Cement Pastes", Cement and Concrete Research, Vol.11, No.3, 1981 pp.395-406.
7. Roy, D.M., Kumar, A. and Rhodes, J.P., "Diffusion of Chloride and Cesium Ions in Portland Cement Pastes and Mortars Containing Blast Furnace Slag and Fly Ash in Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete", Proc. 2nd Intl. Conf., Madrid, ACI SP-91, 1988 pp.1423-1444.
8. Hoffman PC, Weyers RE. Predicting critical chloride levels in concrete bridge decks. In: Schueller GI, Shinozuka M, Yao JTP, Balkema AA, editors. Structural safety and reliability: Proceedings of ICOSSAR'93. Rotterdam, 1994. pp. 957-959.
9. Browne, R.D., "Mechanisms of corrosion of Steel in Concrete in Relation to Design, Inspection and Repair of Offshore and Coastal Structure", ACI SP-65, 1980 p.179.

(접수일자 : 2005년 1월 27일)