

# 철근부식에 의한 육지 콘크리트의 수명예측

## Predicting on Service Life of Concrete by Steel Corrosion

정우용\*      손영무\*\*      윤영수\*\*\*      이진용\*\*\*\*  
Jung, Woo-Yong      Sohn, Young-Moo      Yoon, Young-Soo      Lee, Jin-Yong

### ABSTRACT

In this research the remaining service life of the concrete due to the steel corrosion was predicted by three cases; causing carbonation, using sea sand, using deicing salts. In case of deterioration by carbonation, effective carbonation depth, effective coverage depth and relative humidity are considered for predicting method. In case of using sea sand, predicting method is made of rust growth equation from polarization resistance method. In case of using deicing salts, predicting method is made of transformation of Fick's law. Three methods are very useful in predicting service life of concrete.

### 1. 서론

콘크리트 교량의 내구성 평가의 핵심적 요소인 철근부식은 교량의 수명을 결정하는 중요한 요소이다. 그러나 지금까지의 국내 콘크리트교량의 철근부식 평가는 단순한 비파괴 시험에 의한 단편적인 관점으로 이루어지고 있으며 철근부식에 관한 국내의 연구도 부식에 대한 상대적인 비교나 정성적 특성이 대부분이었지 철근부식예측이나 잔존수명에 대한 연구는 거의 없었다. 따라서 콘크리트 교량에 대한 부식의 평가와 수명예측은 전문가의 경험에 따른 판단에 의존하는 경우가 대부분이다. 본 연구에서는 육지 콘크리트의 철근부식을 예측할 수 있는 일반적인 방법을 제시하기 위하여 콘크리트의 열화를 중성화, 해사에 의한 염화이온 함유, 해빙제에 의한 염화이온 침투로 나누어 예측한 뒤 세 가지 예측 중 가장 작은 값을 선택하는 방법을 취하고 있다.

### 2 철근부식의 시간이력

육지 콘크리트의 시간에 따른 철근부식의 양상은 조건에 따라 다르게 나타난다. 중성화나 염화이온의 침투와 같이 외부에서 물질이 침투반응하는 경우는 그림 1의 곡선①의 경우와 같지만 피복두께가 작아지거나 균열이 생기면 곡선③과 같이 비활성기간(Initiation Period,  $T_{in}$ )이 짧아진다 또한 해사와 같이 염화이온이 처음부터 내재되어 있는 경우는 그 양에 따라 곡선이 ①에서 ②나 ④로 이동하게 된다. 본 연구에서는 수명예측을 중성화에 의한 수명평가, 해사의 염화이온에 의한 수명평가, 해빙제에 의한 수명평가로 나누어 적절한 곡선형태로 선정하여 전개하였다. 또한 각 곡선에서의 유행기간(Propagation Period,  $T_{prn}$ )은

\* 정희원, (주) 동일기술공사 부설 기술연구소 연구원

\*\* 정희원, 고려대학교 토목환경공학과 대학원

\*\*\* 김희원, 고려대학교 토목환경공학과 교수

\*\*\*\* 정희원, (주) 동아건설 기술연구소 책임연구원

비활성기간에 비하여 짧고 예측하기가 힘들며 안정성확보를 위하여 콘크리트의 수명은 비활성기간으로만 으로 간주하였다. 물론 곡선④의 경우는 처음부터 부식이 활발히 진행해서 비활성기간과 활성기간을 구분 하기 모호하기 때문에 부식발생량이 한계부식량에 도달하면 수명이 다하는 것으로 계산하였다.

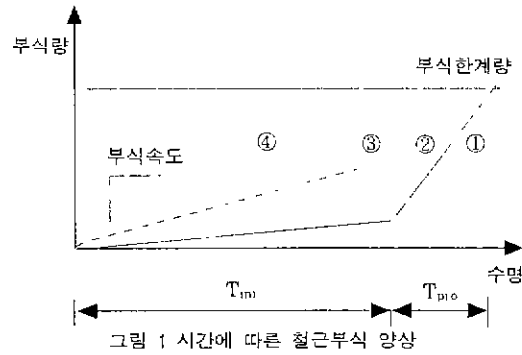


그림 1 시간에 따른 철근부식 양상

### 3. 중성화에 의한 수명예측

#### 3.1 콘크리트 깊이에 따른 pH분포 조사

콘크리트의 중성화깊이는 일반적으로 페놀프탈레인에 의하여 측정되며 보통 pH8.3~9.5를 나타낸다. 그러나 부식이 일어나는 시점은 pH11~11.5이며 염화이온량에 따라 그 이상에서도 발생할 수 있다. 따라서 콘크리트 깊이에 따른 pH분포를 정확하게 구하기 위하여 표 1과 같이 4가지 지시약을 통해 표 2와 같은 5개의 교량에 대하여 콘크리트 깊이에 따른 pH분포를 조사하였다.

표 1 여러 가지 지시약의 pH측정범위

지시약	pH구분 측정범위
Tropaeolin O	pH11~12.7
Alizarin yellow R	pH10.2~12.2
Thymolphthalein	pH9.3~10.5
Phenolphthalein	pH8.3~9.5

표 2 대상교량의 현황

교량이름	위치	준공연도
섬강교	영동선 60.7km	1971
자산교	영동선 60.6km	1971
동화교	영동선 78.3km	1971
속사천4교	영동선 151.2km	1975
김천교	경부선 229.4km	1970

표 3 중성화깊이 조사결과 (단위 mm)

교량	중성화깊이 (mm)			
	Phenolphthalein	Thymolphthalein	Alizarin yellow R	Tropaeolin O
섬강교	3.7	6.6	7.5	12.3
	14.5	15.0	17.6	19.9
	13.3	15.7	19.8	21.4
자산교	28.6	32.5	35.7	39.2
	12.1	18.9	19.4	23.1
동화교	5.8	8.0	10.5	11.0
	5.1	6.0	8.6	8.3
속사천 4교	6.3	9.7	13.4	15.9
김천교	16.4	19.1	21.7	22.6
	9.3	19.3	22.5	24.1
평균	11.5	15.1	17.7	19.8

조사 결과는 표 3과 같았으며 현재 행해지고 있는 페놀프탈레인에 의한 중성화 깊이가 실제 부식을 일으킬 수 있는 깊이보다 5~10mm 정도 작은 값을 나타냈으며 Broomfield의 연구와도 부합하였다. 이러한 5mm의 오차는 작게 보일 수도 있으나 중성화에 의한 수명예측의 경우 중성화 깊이의 제곱에 수명이 비례하므로 이러한 작은 값이 수명을 10년 이상 다르게 예측할 수 있으며 정밀안전진단시 10년이하의 교량에 대하여 때때로 중성화깊이의 값이 0mm로 나오는 이유를 잘 설명해준다.

### 3.2 임계부식 pH와 유효중성화깊이

3.1에서와 같이 페놀프탈레인에 의하여 결정되는 중성화 깊이는 실제 임계부식 pH값과 다르기 때문에 그림 1과 같이 이를 보정해 주어야 한다. 유효피복 두께는 식(1)과 같이 표현될 수 있다.

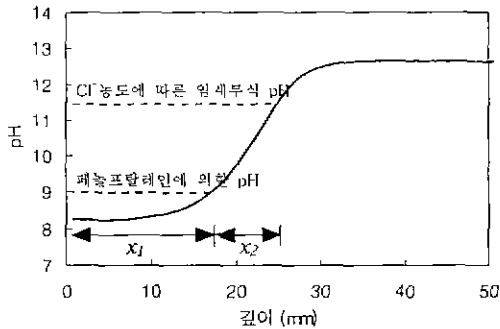


그림 1 임계부식 pH와 유효중성화 깊이

표 4 철근부식한계량과 표준정규확률변수( $\alpha$ )

철근부식한계량(%)	표준정규확률변수( $\alpha$ )
1	2.33
2.5	1.96
5.0	1.65
10	1.28
20	0.85
30	0.52

$$x = x_1 + x_2 \quad (1)$$

$x$ 는 유효중성화깊이이며,  $x_1$ 은 페놀프탈레인에 의한 측정깊이이며,  $x_2$ 는 염화이온양에 따른 임계부식 pH값이 보정치이며 표 3에 의하여 염화이온의 함유량이 거의 없는 경우 대략 6mm 정도로 한다.

### 3.3 유효피복두께와 부식량의 통계적 처리

콘크리트의 피복은 외부로부터 기체나 유체형태의 침투물을 방어한다. 그러므로 피복두께가 두꺼워지면 염화이온이나 중성화에 대하여 저항성이 더 커진다. 하지만 설계시의 피복두께가 모든 구조물에 정확히 적용되기에는 여러 가지 많은 제약조건이 수반되기 마련이다. 따라서 피복두께는 단일한 값으로 보지 않고 철근배근의 불균일성과 콘크리트 표면의 균열에 따른 피복두께  $d$ 의 감소를 정규분포를 통해 통계적으로 처리해야 한다. 균열에 의한 영향은 현재의 성과로는 고려하기 어려움이 있으므로 여기서는 시공에 의한 철근배근의 분산성에 대하여 고려하겠다. 표 4의  $\alpha$ 는 표준정규확률변수로서 정규분포표에 의하여 철근 배근 분산의 %허용치를 나타낼 수 있으며 이는 전체 철근에 대한 부식철근의 최대 한계치를 의미하기도 한다. Weyers에 의하면  $\sigma$ 값은 교량상판의 경우 현장타설시에 피복두께 50mm에 대하여 8mm로 한다는 통계가 있다.

$$d = d_1 - \alpha \sigma \quad (2)$$

$d$ 는 유효피복두께이며  $d_1$ 은 설계피복두께이며  $\alpha$ 는 철근부식 한계량에 대한 표준정규확률변수이고  $\sigma$ 는 피복두께의 표준편차이다.

### 3.4 상대습도를 고려한 중성화 예측식

중성화와 시간에 대한 일반식은 식(3)과 같이 표현할 수 있다. 상수  $n$ 은 Parrott이 제안한 평균상대습도에 의하여 결정될 수 있으며 그렇지 않은 경우에는 보통 0.5를 사용한다. 상수  $k$  값은 시멘트 종류, w/c, 상대습도 등에 따라 일정하지 않으므로 현재로서는 기존의 여러 제안식보다는 현장조사를 통한 중성화 깊이와 재령으로 유도하는 것이 바람직하다고 사료된다.

$$x = k T_{in}^n \quad (3)$$

$$n = 0.02536 + 0.01785r - 0.0001623r^2 \quad (4)$$

여기서  $r$ 은 상대습도이며  $T_{in}$ 은 비활성기간이고, 상대습도가 60%이하인 경우는  $n$ 은 0.5를 취한다.

### 3.5 중성화에 의한 수명예측방법

건전하게 설계, 시공되고 정기적으로 관리되고 있는 육지 구조물의 경우 지속적인 해빙제 투여나 자연 재해가 있지 않는 한 사용수명이 상당히 길다. 이렇게 양호한 상태의 육지 콘크리트의 경우는 중성화에 의하여 부식시점이 결정되며 유효 피복두께와 유효중성화깊이가 중요한 요소라 할 수 있다. 중성화 이후의 활성기간(Propagation Period)에 대하여는 현재로서 명확히 나타내기 어려우며 상대적으로도 기간도 짧기 때문에 비활성기간을 수명으로 간주했다. 예측방법 과정은 다음과 같다.

- ① 식(3)과 같이  $x = k T_{in}^n$ 이라고 가정한다.
- ② 대상 구조물이 위치한 지역에서의 월평균 상대습도를 구한 뒤, 식 (4)에 의하여  $n$ 값을 구하여 연평균  $n$ 값을 구한다. 상대습도값을 알 수 없는 경우  $n$ 은 보통 0.5를 사용한다.
- ③ 페놀프탈레인용액을 사용하여 중성화깊이( $x_1$ )과 pH값이 보정치( $x_2$ )를 식(1)에 대입하여 유효중성화깊이  $x$ 를 구한 뒤 재령( $t$ )를 식(3)에 대입하여  $k$ 를 구한다.
- ④ 구조물의 피복두께 중 설계도면상의 가장 작은 피복두께  $d_f$ 를 결정한다. 피복두께의 편차( $\sigma$ )를 구할 수 없으면 피복두께 50mm에 대하여 8mm를 사용하며 부식한계량( $\alpha$ )은 임의로 결정한 뒤 식(2)에 대입하여 유효피복두께  $d$ 를 구한다.
- ⑤ 유효피복두께  $d$ 를 식(1)에 대입하여 비활성기간( $T_{in}$ )을 구한다.

## 4. 해사 사용에 의한 수명예측

염화이온에 관계된 부식은  $Cl/OH$ 에 관계된다. 해사의 사용의 경우  $Cl$ 은 외부의 침투가 아니기 때문에 처음부터 작용하나  $OH$ 의 경우 수화반응이 활발한 일정기간이 지나면 중성화가 이루어지기 전까지는 대체로 큰 변화가 없다. 따라서 해사사용에 의한 부식은  $Cl$ 의 양이 지배하나 현재로서는 대상 콘크리트의 세공액 채취가 까다로울 뿐만 아니라 세공액에 의한 임계부식  $Cl$ 농도는 철근을 완전수용액에 담구었을때의 이상적인 부식발생농도이므로 실제 콘크리트 안에서는 다르게 작용할 수 있다. 즉 세공액은 평균농도이며 콘크리트 내부에서는 각기 다른 조건으로 인해 부식은 불균형적으로 일어날 수 있다. 본 연구에서 수행했던 여러 가지 조건에 다른 분극저항법에 의한 부식속도를 통계해석 프로그램 SAS를 통해 다중회귀분석한 뒤 부식량에 대한 함수를 나타낸 것을 수명예측에 사용하였다. 부식속도에 영향을 주는 인자 중 염화이온, 상대습도, 피복두께만으로 한정하였으나 부식에 의한 수명예측 중 가장 연구가 미흡한 해사를 사용한 경우에 대해서 의미있는 추정식이 될 것이다.

부식속도식을 적분하여 부식량을 산정할 수 있으며 부식에 의한 질량감소는 녹으로서 나타난다. 실제 철의 질량은 녹으로 변환시 2~6배의 부피를 가지며 보통 3배의 부피팽창을 사용하며 이는  $1 \mu Acm^{-2} = 11.5 \mu m yr^{-1}$  단면손실 =  $34 \mu m yr^{-1}$  즉 발생의 결과를 가져온다. 따라서 본 연구에서 수행하였던 결과에 의한 식(5)와 식(8)은 식(6), (7)과 식(9), (10)으로 변환된다. 콘크리트의 균열은 Rodriguez의 경우 0.015~0.04mm를 제시했으며 Browne의 경우 0.1mm를 제시했다. 이 값이 콘크리트 균열을 일으키는

부식량과 같게 되면 부식에 의한 수명은 다한 것으로 간주한다

① 상대습도 60%이상 경우

$$I_{corr} = 0.01169 e^{2.8899CI - 0.0120De + 0.0269Hu} \mu A/cm^2 \quad (5)$$

$$Q_{corr} = 0.1344 t \times e^{2.8899CI - 0.0120De + 0.027Hu} \mu m/yr \text{ 단면 손실} \quad (6)$$

$$Q_{corr} = 0.3975 t \times e^{2.8899CI - 0.0120De + 0.027Hu} \mu m/yr \text{ 녹 발생} \quad (7)$$

여기서  $CI$ 은 시멘트에 대한 염화이온의 중량%(0~0.4%),  $De$ 는 피복두께로  $cm(20\sim40cm)$ ,  $Hu$ 는 상대습도로 %(68~90%)를 나타낸다.

② 상대습도 50%인 경우

$$I_{corr} = 0.0692 e^{1.69848CI} \mu A/cm^2 \quad (8)$$

$$Q_{corr} = 0.7958 t \times e^{1.699CI} \mu m/yr \text{ 단면 손실} \quad (9)$$

$$Q_{corr} = 2.352 t \times e^{1.689CI} \mu m/yr \text{ 녹 발생} \quad (10)$$

여기서  $CI$ 은 시멘트에 대한 염화이온의 중량%(0~0.8%)를 나타낸다.

5. 해빙제에 의한 수명예측

육상콘크리트가 염화이온의 영향을 받는 경우는 해사를 사용한 경우를 제외하고는 해빙제 투여가 대부분이다. 그러나 해빙제의 영향은 불규칙한 사용의 빈도를 함수로 일반화시키는 작업이 어렵다. 그림 1은 시간에 따른 콘크리트 표면의 염화이온양을 모사한 것이며 이를  $C(x,t)$ 라는 특정함수로 가정한 것이다.

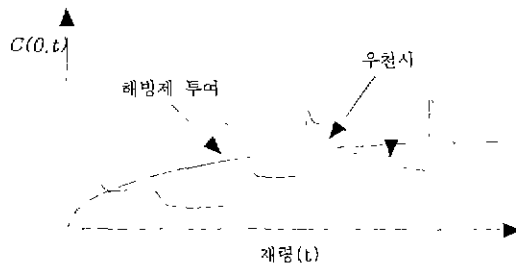


그림 2 해빙제 투여에 따른 콘크리트 표면의 염화이온 분포

염화이온에 의한 부식발생시점은 엄밀히 말해  $Cl/OH$ 에 의하여 결정되어지나  $OH$ 의 값에 큰 차이가 없다는 가정하에 각국의 규준은  $Cl$ 의 양으로 규정되어 있다. 식(11)은 Fick의 법칙의 일반해를 나타내며 콘크리트 표면의 농도를  $C(x,t) = kt^{1/2}$ 로 가정하면 식(11)은 식(12)와 같이 변환된다. 상수  $k$ 값은 콘크리트 표면에서 측정된 염화이온 값과 재령을 대입하여 결정한다. 식(12)에 의하여 철근주변의  $Cl$ 양과 허용기준이 같게 되는 시점을 수명으로 예측한다

$$C(x,t) = C_0 [1 - \text{erf}(x / (2 \sqrt{D_{eff}t}))] \quad (11)$$

$$C(x,t) = k \sqrt{t} \left\{ e^{-x^2/4D_{eff}T} - \left[ \frac{x\sqrt{\pi}}{2\sqrt{D_{eff}t}} \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_{eff}t}}\right) \right] \right\} \quad (12)$$

여기서  $C(x,t)$ 는 재령  $t$ 의 깊이  $x$ 에서의 염소이온의 농도,  $C_0$ 는 표면에서의 일정한 염소이온의 농도,  $D_{eff}$ 는 염소이온 유효확산계수,  $\text{erf}$ 는 오차함수이다

## 6 결론

- (1) 페놀프탈레인에 의한 중성화 측정은 pH 8.3~9.5를 나타내나 염화이온이 함유되지 않은 경우도 부식은 pH 11~11.5에서 일어날 수 있다. 더군다나 해사를 사용한 경우는 이보다 큰 pH에서 부식이 일어날 수 있다. 5개 교량에 대한 중성화 깊이 조사에서는 pH 9에서 pH12.5의 pH 변이 구역의 길이가 대략 5~10mm 정도로 나타났다. 이는 중성화에 의한 수명예측을 10년이상 차이나게 할 수 있다.
- (2) 염화이온, 상대습도, 피복두께를 고려한 재령에 대한 부식속도 및 부식량 산정식을 유도하였다.
- (3) 육지 콘크리트의 잔존수명예측을 기존의 연구의 종합과 본 연구의 시험을 통해 중성화에 의한, 해사에 의한, 해빙제에 의한 철근부식으로 제시하였다

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부의 연구비 지원을 받아 수행하였으며 이에 감사의 마음을 표시하는 바입니다. 아울러 연구 과정에 많은 도움을 주신 KIST의 조원일 교수님과 남상철 박사님, 홍익대학교의 이재호 교수님 그리고 실험 과정에 크나큰 도움을 주신 고려대학교 김강진 교수님과 분석화학연구실 연구원 여러분들에게도 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

## 참고 문헌

- (1) J.Kropp and H.K. Hilsdorf, "Performance Criteria for Concrete Durability", RILEM Report 12, E&FN SPON, 1995
- (2) James R. Clifton, "Predicting the Remaining Service Life of Concrete", NISTIR 4712, National Institute of Standards and Technology, November 1991
- (3) A. Bentur, S. Diamond and N.S. Berke, "Steel Corrosion in Concrete", E&FN SPON, 1997
- (4) John P. Broomfield, "Corrosion of Steel in Concrete", E&FN SPON, 1997
- (5) P. Schiessl, "Corrosion of Steel in Concrete", Report of the Technical Committee 60-CSC RILEM, Chapman and Hall, 1988
- (6) Stephen L. Amey, "Predicting the Service Life of Concrete Marine Structures", ACI Structural Journal V 95 March-April
- (7) Z.P. Bazant, "Physical Model for Steel Corrosion on Concrete in Concrete Sea Structure-Application," ASCE Journal of the Structural Division, Vol.105(ST6) 6 (June 1979)
- (8) J. Files, "Electrochemical Measurements on Concrete Bridge for Evaluation of Reinforcement Corrosion Rates", Corrosion, Vol 49, No.7, pp 601-613
- (9) Cady, P. D., and Wevers, R. E. "Deterioration Rates of Concrete Bridge Decks", Journal of Transportation Engineering V.100, No 1, 1984, pp 35-44
- (10) S. Felu, "Determining Polarization Resistance in Reinforced Concrete Slabs", Corrosion Science, Vol 29, No.1, pp.105-113
- (11) Denny A. Jones, "Principle and Prevention of Corrosion", 2th, Prentice Hall, 1996
- (12) 윤영수외, "잔존수명 예측모델의 개발", 고려대학교 방재과학 기술연구센터, 1999.4
- (13) "Corrosion of Material in Concrete", ACI 222R-89
- (14) "Guide to Durable Concrete", ACI 201.2R-92
- (15) Kenneth C. Clear, "Measuring Rate of Corrosion of Steel in Field Concrete Structures", Transportation Research Record 1211
- (16) "Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete". American Society for Testing and Materials, 1980
- (17) Mars G. Fontana, "Corrosion Engineering", 3th, McGraw-Hill, 1986
- (18) 염영유 콘크리트 철근의 부식예측 및 방지대책연구, 한국과학기술연구원, 1998.12
- (19) 건설교통부, "해사 및 일반간갈레를 사용한 콘크리트 품질 및 내구성 향상 기술", 1999.4