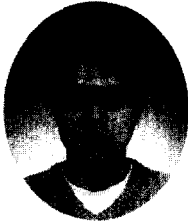


## 철근부식에 의한 육지 콘크리트의 잔존수명 예측

### The Prediction of Remaining Service Life of Land Concrete Due to Steel Corrosion



정우용\*

Jung, Woo-Yong



윤영수\*\*

Yoon, Young-Soo



송하원\*\*\*

Song, Ha-Won



변근주\*\*\*

Byun, Keun-Joo

#### ABSTRACT

This paper presents the prediction of remaining service life of the concrete due to steel corrosion caused by the following three cases: carbonation, using sea sand and using deicing salts. The assessment of initiation period was generalized considering the existing prediction models in the literature, corrosion experiment and field assessment. To evaluate the prediction equation of rust growth, the corrosion accelerating experiments was performed. The polarization resistance was measured by potentiostat and the conversion coefficient of polarization resistance to corrosion rate was determined by the measurement of real mass loss. Chloride content, carbonation, cover depth, relative humidity, water-cement ratio(w/c), and the use of deicing salts were taken into account and the resulting prediction equation of rust growth was proposed on the basis of these properties. The proposed equation is to predict the rust growth during any specified period of time and be effective in particular for predicting service life of concrete in the case of using sea sand.

Keywords : prediction of service life, steel corrosion, carbonation, sea sand, deicing salts, corrosion accelerating experiment, polarization resistance

\* 정회원, (주) 동일기술공사 부설 기술연구소 연구원

\*\* 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 교수

\*\*\* 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수

· 본 논문에 대한 토의를 2001년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2001년 4월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

철근부식과 콘크리트의 내구성에 관한 연구는 국내에서도 많이 수행되었으나 단순한 내구성의 상대적 저항성의 평가는 부식진행의 예측에 있어서도 역시 상대적인 평가만이 가능할 뿐이지 정량적인 부식의 양과 시간을 평가하는 데는 한계가 있다. 물론 염화이온의 침투를 받는 해안구조물의 경우는 그 동안 많은 연구가 있었고 수명예측 또한 많은 진전이 있었다. 그러나 보다 다수의 경우를 차지하고 있는 육지콘크리트에 대한 연구는 미비하며 해사나 해빙제의 사용에 의한 수명예측은 더욱 미비하다. 기존의 연구가 반드시 부식에 의한 수명을 예측하기 위한 목적으로 행해진 것은 아니지만 이러한 기준으로 본다면 국내의 관련 연구자들 가운데 오병환<sup>(1)</sup>의 논문에서 가압전류와 자연전류의 전하량환산에 의한 수명예측은 콘크리트 자체의 전기적 저항성에 의한 철근부식 평가에 의미가 있다. 또한 김은겸<sup>(2)</sup>의 AC 임피던스에 의한 부식평가 시험은 최근에 점차적으로 사용되고 있으며 부식전류를 실제상태의 교란 없이 측정할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 문한영<sup>(3)</sup>의 해양환경하의 콘크리트의 염해와 철근부식에 관한 연구는 여러 가지 조건에 대한 상대적인 비교로는 정리가 잘 되어 있고 김무한<sup>(4)</sup>의 중성화에 관한 연구는 수명예측기법에 관한 이론이 잘 설명되어 있다. 이 밖에 해수의 건습반복, 동결융해, 중성화 촉진 등에 관한 여러 가지 논문도 성능저하 여건의 촉진을 통한 상대적인 평가는 잘 이루어져 있다. 그러나 대부분의 연구들이 결론과 그 활용에 있어서 실질적인 검증은 필요로 하고 있다. 수명예측의 관점에서는 반전지전위법과 부식면적비보다는 부식전류와 질량감소량을 측정하는 연구를 필요로 하고, 중성화로 인한 철근부식에 있어서 상대습도와 유효중성화깊이의 영향에 대한 고려가 추가되어야 한다. 아울러 가압전압에 의한 철근부식의 연구들에 있어서는 추가적인 염화이온의 침투와 비활성기간에 대한 미고려 및 가압전압에 의한 실제 부식상태와는 다른 환경상태에 관한 연구가 요구된다.

본 연구에서는 육지 콘크리트의 철근부식을 예

측할 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.

비록 콘크리트의 치밀성, 균열 동결융해등은 반영하지 못했으나 육지 콘크리트의 수명예측에 도움이 되리라 판단 된다.

## 2. 철근부식의 시간이력

육지 콘크리트의 시간에 따른 철근부식의 양상은 조건에 따라 다르게 나타난다. 중성화나 염화이온의 침투와 같이 외부에서 물질이 침투반응하는 경우는 Fig. 1의 곡선①의 경우와 같지만 피복두께가 작아지거나 균열이 생기면 곡선③과 같이 비활성기간(Initiation Period,  $T_{ini}$ )이 짧아진다.<sup>(5)</sup> 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 곡선에서 활성기간(Propagation Period,  $T_{pro}$ )은 비활성기간에 비하여 짧고 예측하기가 힘들며 안정성확보를 위하여 콘크리트의 수명은 비활성기간만으로 간주하였다. 물론 곡선④의 경우는 처음부터 부식이 활발히 진행해서 비활성기간과 활성기간을 구분하기 모호하기 때문에 부식발생량이 한계부식량에 도달하면 수명이 다하는 것으로 계산하였다.

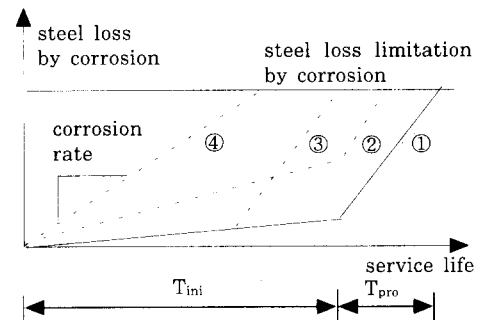


Fig. 1 Steel corrosion according to time

### 3. 중성화에 의한 비활성기간

#### 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 Table 1과 같이 4가지 지시약을 통해 Table 2와 같은 5개의 교량에 대하여 콘크리트 깊이에 따른 pH분포를 조사하였다.

Table 1 pH range of measurement of various indicator

Indicator	pH range
Tropaeolin O	pH 11.1~12.7
Alizarin yellow R	pH 10.2~12.2
Thymolphthalein	pH 9.3~10.5
Phenolphthalein	pH 8.3~9.5

Table 2 Examined bridges

Name of bridges	Location	The time of completion
Sum-Gang	Young-Dong highway 60.7km	1971
Ja-San	Young-Dong highway 60.6km	1971
Dong-Hoa	Young-Dong highway 78.3km	1971
Sok-Sa-Chon	Young-Dong highway 151.2km	1975
Kim-Chon	Kyung-Bu highway 229.4km	1970

조사 결과는 Table 3과 같았으며 현재 행해지고 있는 페놀프탈레인에 의한 중성화 깊이가 실제 부식을 일으킬 수 있는 깊이보다 5~10 mm 정도 작은 값을 나타냈으며 Broomfield의 연구와도 부합하였다.<sup>(6)</sup> 이러한 5 mm의 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 10년 이하의 교량에 대하여 때때로 중성화깊이의 값이 0 mm로 나오는 이유를 잘 설명해준다.

Table 3 The result of carbonation depth (mm)

Examined Place	Phe.	Thy.	Ali.	Tro.	
Sum-Gang	Pier	3.7	6.6	7.5	12.3
	Abut	14.5	15.0	17.6	19.9
	Abut	13.3	15.7	19.8	21.4
Ja-San	Abut	28.6	32.5	35.7	39.2
	Abut	12.1	18.9	19.4	23.1
Dong-Hoa	Abut	5.8	8.0	10.5	11.0
	Abut	5.1	6.0	8.6	8.3
Sok-Sa-Chon	Abut	6.3	9.7	13.4	15.9
Kim-Chon	Slab	16.4	19.1	21.7	22.6
	Slab	9.3	19.3	22.8	24.1
Average		11.5	15.1	17.7	19.8

#### 3.2 임계부식 pH와 유효중성화깊이

3.1에서와 같이 페놀프탈레인에 의하여 결정되는 중성화 깊이는 실제 임계부식 pH깊이와 다르기 때문에 Fig. 2와 같이 이를 보정해 주어야 한다. 유효피복 두께는 식(1)과 같이 표현될 수 있다.

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

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

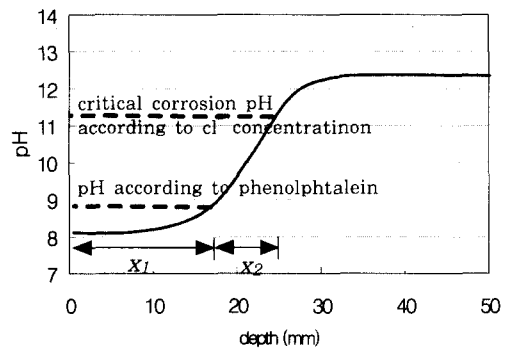


Fig. 2 Critical corrosion pH and effective carbonation depth.

### 3.3 유효피복두께와 부식량의 통계적 처리

콘크리트의 피복은 외부로부터 기체나 유체형태의 침투물을 방어한다. 그러므로 염화이온이나 중성화에 대하여 저항성이 더 커진다. 하지만 피복두께가 두껍다고 해서 부식이 반드시 적게 일어나는 것은 아니다. 피복두께가 두꺼워지면 산소 공급량과 수분침투율이 적어질 수 있기 때문이다.<sup>(7)</sup> 피복두께는 단일한 값으로 보지 않고 철근 배근의 불균일성과 콘크리트 표면의 균열에 따른 피복두께  $d$ 의 감소를 정규분포를 통해 통계적으로 처리해야 한다. 균열에 의한 영향은 현재의 성과로는 고려하기 어려움이 있으므로 본 연구에서는 시공에 의한 철근배근의 분산성에 대하여 고려하였다.  $\alpha$ 는 표준정규확률변수로서 정규분포표에 의하여 철근배근 분산의 %허용치를 나타낼 수 있으며 이는 전체 철근에 대한 부식철근의 최대 한계치를 의미하기도 한다. Weyers<sup>(8)</sup>에 의하면  $\sigma$  값은 교량상판의 경우 현장타설시에 피복두께 50 mm에 대하여 8 mm로 조사되었다.

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

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

Table 4 Steel loss limit and standard normal probability parameter( $\alpha$ )

Loss limit by corrosion (%)	Standard normal probability parameter( $\alpha$ )
1	2.33
2.5	1.96
5.0	1.65
10	1.28
20	0.85
30	0.52

### 3.4 상대습도를 고려한 중성화 예측식

중성화와 시간에 대한 일반식은 식(3)과 같이

표현할 수 있다. 상수  $n$ 은 Parrott<sup>(6,9)</sup>이 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.

$$x = kT_{mi}^n \quad (3)$$

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

여기서  $r$ 은 상대습도이며 상대습도가 60%이 하인 경우는  $n$ 은 0.5를 취한다.

## 4. 철근부식의 정량적 평가

### 4.1 시험개요

부식특성을 정량화하기 위한 시험은 표준용과 환경용으로 나누어 수행되었다. 시험방법의 전체적인 순서는 Fig. 3과 같다. 분극저항은 일정기간 동안 EG&G사 M273기종의 포텐시오스탯(Potentiostat)으로 ASTM G3-89에 근거하여 -30mV부터 +30mV까지 0.167mV/s 가압하여 전류의 변화량을 측정하여 구하였다. 분극저항의 시간에 대한 적분값을 실제질량감소량과 비교하여 변환계수값을 실험적으로 결정하였으며 변환계수값에 의하여 분극저항을 부식속도로 나타내었다. 중성화 측정은 CO<sub>2</sub> 10%, 온도 20±2℃, 습도 50±5%의 조건으로  $w/c$ 가 50%인 시료가 20 mm 이상 진행할 때까지 수행하였다. 또한 여러 가지 조건에 대한 부식속도 값을 SAS를 이용하여 다중회귀분석식으로 표현하였다.

실제부식질량은 콘크리트 타설 전 1/100g까지 측정된 뒤 일정기간이 지난 뒤 콘크리트를 부순 후 샌드브러쉬(Sand Brush)를 통하여 산화피막과 녹슨 부분을 깎아내어 질량의 차이값을 측정하였다. 이 때 온전한 철근에 대하여 산화피막만을 깎는 작업을 통해 산화피막의 질량을 구하고 녹슨 부분만의 질량을 계산하였다. 보편적으로 많이 쓰이는 정성적 시험방법인 반전지전위법(Half

Cell Potential Method)도 ASTM C876에 근거하여 함께 수행하여 비교하였다.

분극저항측정 시험장치는 Fig. 4와 같으며 전극을 내부에 장착한 이유는 전해질을 사용한 외부 전극형을 사용할 경우 측정에 의해 염화이온이 침투하기 때문이다. 기준전극(R)은 백금대신 스테인레스를 사용했으며 음극전극(C)은 카본을 사용하였다. 양극전극(W)에 해당하는 철근은 지름 10 mm의 이형철근을 사용하였다. 시험체의 모양은 가로, 세로, 높이가 각각 25 mm, 20 mm, 10 mm이며 모든 측면 방향은 파라핀으로 도포하였다. 또한 철근의 노출부는 무초산 실리콘으로 전선연결부를 제외하고 모두 도포하였다. 피복두께는 20 mm, 30 mm, 40 mm로 달리하였으며 환경용 시료의 경우 기준극을 외부에 설치하였다. 시험체의 배합은 Table 5와 같으며 총 101개의 철근에 대하여 500회 이상의 측정을 시행하였다. 시험체명에 있어서 ○○◇◇□□-△△로 표기하였으며 ○○은 w/c를, ◇◇는 환경조건(S:표준용, H:습도용, I:해빙제), □□는 염화이온양, △△는 피복두께를 나타낸다.

Table 5 Mix proportion of concrete

W/C	C (kg/m <sup>3</sup> )	W (kg/m <sup>3</sup> )	S (kg/m <sup>3</sup> )	G (kg/m <sup>3</sup> )
0.4	445	180	719	1024
0.5	348	180	731	1068
0.6	297	180	774	1097

## 4.2 부식속도와 분극저항과의 관계

부식속도를 측정하는 방법에는 분극저항법, AC 임피던스법, 전기화학적 노이즈법, 타펠법 등이 있다. 그러나 AC 임피던스법이나 전기화학적 노이즈법의 경우는 적용방법이 복잡하고 현장에서 사용하기에는 불편한 점을 많이 가지고 있으며 타펠법은 시간이 오래 걸릴 뿐 아니라 부식속도를 측정하면서 부식을 유발할 수도 있다.<sup>(10)</sup> 반면에 분극저항법은 가장 간단하며 부식속도를 측정하면서 부식을 유발하지 않는다. 다만 분극저항법은 식(5)에서 보여주듯이 타펠계수인  $\beta_a$ 와  $\beta_c$ 를 알아야만 사용할 수 있다. 그러나 이러한 타펠계수는 역시 타펠법을 사용해야만하고 정확

히 구하기도 힘들다. 또한 콘크리트와 같은 비고저항체에서는 타펠계수를 구하는 것은 더 어렵다.<sup>(11)</sup> 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 다음과 같은 방법을 사용하였다. 부식전류는 페러데이법칙인 식(6)에 의하여 질량으로 환산되어질 수 있으므로 식(7)과 같이 시간에 대한

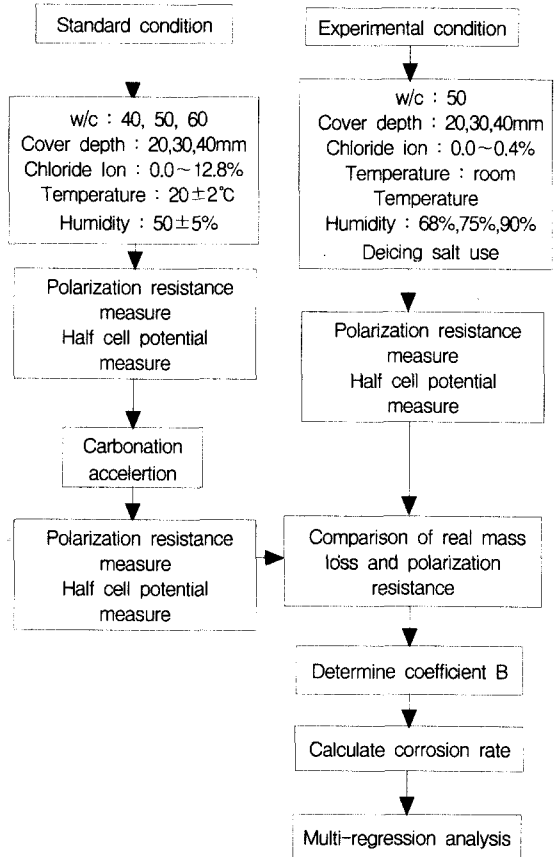


Fig. 3 Experiment flow chart

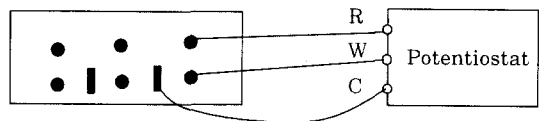


Fig. 4 Polarization resistance experiment device

분극저항의 역수를 적분한 값과 실제질량 감소량을 비교하여 변환계수 B값을 유추하는 시험을 시행하였다. 사실 B값은 재령과 시료에 따라 변하지만 현재로서는 대표값을 사용하였으며  $R_p$ 도 콘크리트저항에 의한 전압강하를 고려하여 구해

야 하지만 B값 자체가 실험적으로 구해진 것이므로 콘크리트 저항이 일정하다고 가정하면  $R_p$ 를 그대로 사용해도 무리는 없다고 판단된다. 또한 염화이온 함유량을 크게 하여 부식질량을 크게 유도하여 측정오차를 줄이고자 하였다. Fig. 5는 변환계수를 구하기 위한 데이터를 1차 회귀분석한 것이며 변환계수 B는 0.044V로 산출되었고 상관계수 R도 비교적 높게 나타났다.

$$R_p = \frac{dV}{di_{app}} = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3 i_{corr} (\beta_a + \beta_c)} = \frac{B}{i_{corr}} \quad (5)$$

$$m = \frac{M i_{corr} t}{zF} \quad (6)$$

$$Q_{corr} = \frac{55.85 \times A}{2 \times F} \int di_{corr} dt$$

$$= \frac{55.85 \times A \times B}{2 \times 96500} \int \frac{dt}{dR_p} \quad (7)$$

여기서  $R_p$ 는 분극저항( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ), V는 전압(V), B는 변환계수, m은 질량(g),  $i_{corr}$ 은 부식전류( $\text{A}/\text{cm}^2$ ), A는 철근의 단면적( $\text{cm}^2$ ), t는 시간, M은 철에 대한 1몰의 질량(55.85g), z는 이온수이고 여기서는 2, F는 96500A,  $Q_{corr}$ 은 부식질량(g)을 나타낸다.

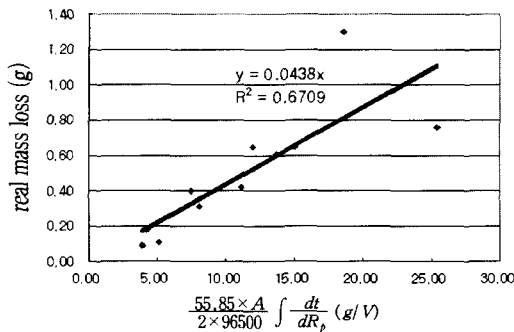


Fig. 5 Regression for determining coefficient B

### 4.3 여러 가지 조건에 따른 부식특성

#### 4.3.1 염화이온 함유량에 따른 부식특성

염화이온은 여러 가지 방법으로 콘크리트 구조물에 침투된다. 해사를 사용한 경우, 해빙제를 사

용한 경우, 해안가에 위치한 경우 등 많은 경우가 있으며 이러한 경우에 콘크리트의 수명은 다른 열화요인에 비하여 빠르게 수명이 단축된다. 염화이온에 의한 임계부식농도는 pH와 관련이 있기 때문에 중성화वाद도 연관되어 작용한다. 철근 주변의 pH가 떨어지면 더 적은 염화이온에 의해 철근은 부식될 수 있다. 해사를 사용할 경우에 가장 문제가 되는 것은 염화이온은 처음부터 존재하는 것이기 때문에 임계부식농도보다 많은 염화이온이 함유될 경우 초기재령부터 부식이 일어날 수 있다는 것이다. 이것은 피복두께를 크게 하여 산소공급량과 수분전달을 줄여도 부식이 계속 일어날 수 있음을 나타낸다. Fig. 6과 7은 염화이온 첨가량에 따라 분극저항과 반전지전위를 재령에 따라 나타낸 것이다. 정량적인 부식속도를 나타내는 분극저항은 염화이온량에 따라 확연한 성향이 있으나 정성적인 부식여부를 나타내는 반전지전위는 초기 재령시에는 뚜렷한 성향을 나타내지 않았고 300일 이후에 부식여부를 정성적으로 구분하였다.

Fig. 8은 부식속도가 재령 100일까지는 불안정한 특성을 보이다가 그 이후에 염화이온량에 따라 정량적인 크기를 가짐을 보여준다. 이는 초기 재령시 콘크리트가 수화반응이 아직 끝나지 않았고 내부의 수분이 많은 불안정한 상태이기 때문으로 판단된다. 따라서 부식속도에 대한 평가는 재령 100일에서 150일 이후에 측정하는 것이 바람직하다고 생각되며 이는 기존의 연구와도 부합한다.<sup>(14)</sup>

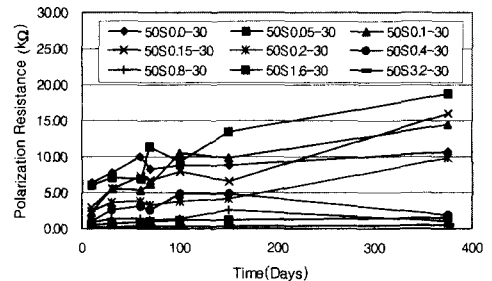


Fig. 6 Polarization according to time and chloride ion for w/c=0.5, cover depth 30mm

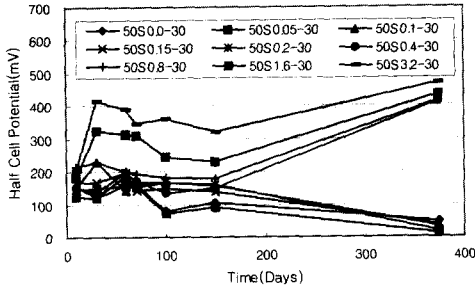


Fig. 7 Half cell potential according to time and chloride ion for w/c=0.5, cover depth 30mm

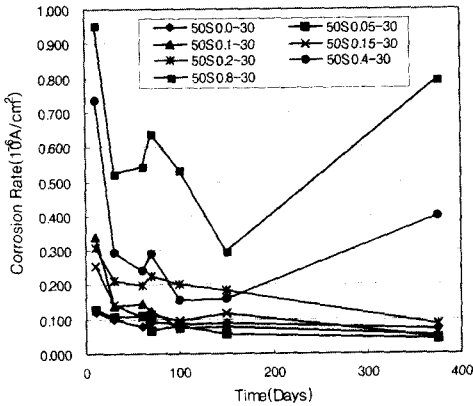


Fig. 8 Corrosion rate according to time and chloride ion for w/c=0.5, cover depth 30mm

#### 4.3.2 상대습도에 따른 부식특성

중성화에 의한 부식과 염화이온에 의한 부식 모두 수분을 필요로 한다. 일반적으로 염화이온 함유량이 없고 상대습도가 60% 미만인 경우는 부식이 거의 일어나지 않으며 60% 이상부터 부식속도가 증가하여 98%에서 부식이 가장 빠르다고 한다. 또한 염화이온량이 증가하면 상대습도가 60% 미만인 경우도 부식이 일어날 수 있다.<sup>(9)</sup>

본 연구에서는 항온항습조를 표준화용 시료에 대해 사용하였기 때문에 서로 다른 습도 조건과 일정한 온도를 유지하기 위해 실내온도 조건에서 다른 습도조건 상태를 유지하며 부식특성을 측정하였다. 360일간 90일 간격으로 4번 측정하였으며 90일까지는 실내에 방치하였고 90일 이후부터 서로 다른 세 가지 조건인 실내방치 상태(평균 68%, HA), 조금 물을 분사한 비닐로 포장

(평균 75%, HB), 많이 물을 분사한 비닐로 포장(평균 90%, HC) 상태로 보관하였다. 누적된 부식량을 측정하는 것이 아니라 특정시간에 측정된 상대습도에 따른 부식속도를 측정하는 것이기 때문에 습도의 영향을 어느 정도는 파악할 수 있었다.

Fig. 9와 10은 재령 150일인 시료에 대하여 상대습도와 염화이온에 따른 부식속도와 반전지전위를 나타낸 것이다. 상대습도가 증가할수록 동일한 염화이온에 대하여 부식속도가 증가하였으며 염화이온이 커질수록 상대습도 증가에 따른 상승비율이 커졌다. 반전지전위도 비슷한 경향을 보였다.

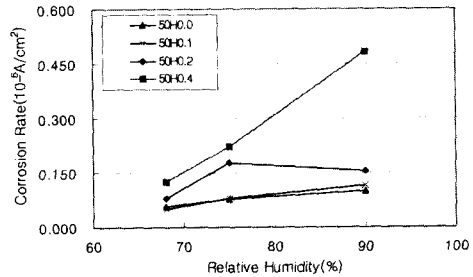


Fig. 9 Corrosion rate according to humidity for w/c=0.5, cover depth 20 mm

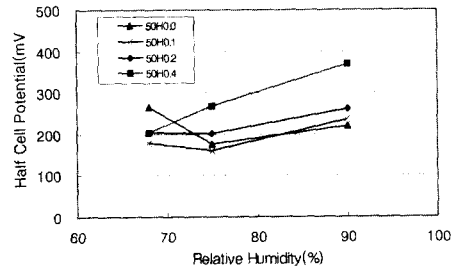


Fig. 10 Half cell potential according to humidity w/c=0.5, cover depth 20 mm

#### 4.3.3 피복두께에 따른 부식특성

피복두께가 증가할수록 외부의 침투물질인 수분, 염화이온, 해빙제, 중성화 진행 등의 영향이 작아질 뿐만 아니라 균열이 적게 발생한다. 하지만 피복두께가 두껍더라도 해사를 사용한 경우에는 염화이온 분포가 피복두께에 상관없이 일정하다. 또한 비가 온 뒤 장시간동안 건조하다면 피복

두께가 깊은 쪽이 수분이 더 많을 수 있다.<sup>(5)</sup>

Fig. 11에서 부식속도는 피복두께가 증가할수록 감소하였으나 염화이온의 침투에 의한 것이 아니므로 큰 변화를 보이지 않았으며 Fig. 12에서 반전지전위는 피복두께에 따라 명확한 성향을 보이지 않았다.

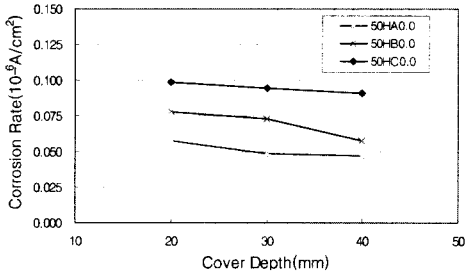


Fig. 11 Corrosion rate according to cover depth for w/c=0.5, cl0.0

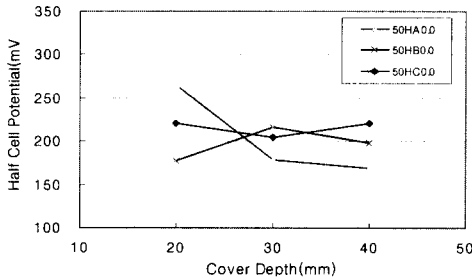


Fig. 12 Half cell potential according to cover depth for w/c=0.5, cl0.0

#### 4.3.4 w/c에 따른 부식특성

w/c가 큰 경우에는 공극률이 커지므로 습도가 높아지면 w/c가 작은 콘크리트보다 내부 습도가 빠르게 높아지며 수분함유량도 많아진다. 반면, 습도가 낮아지면 내부 습도도 빨리 떨어진다.<sup>(7)</sup>

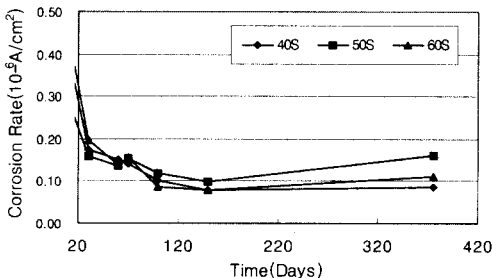


Fig. 13 Corrosion rate according to w/c and time for relative humidity 50%

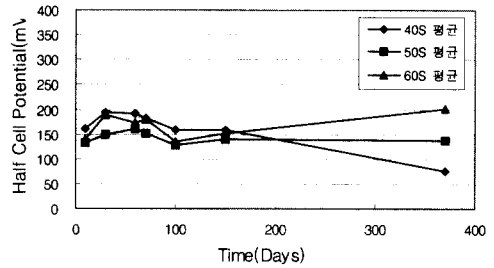


Fig. 14 Half cell potential according to w/c and time for relative humidity 50%

Fig. 13과 14는 표준용 시료의 w/c에 따른 평균 부식속도와 반전지전위를 나타낸 것이며 두 가지 모두 w/c에 대하여 특별한 성향을 나타내지 않았다. 이러한 이유는 시험 대상 시료의 상대습도 조건이 50%이어서 부식에 대한 공극률의 특성을 나타내지 못한 것으로 판단된다.

#### 4.3.5 중성화에 따른 부식특성

콘크리트는 대기와 접해있는 이상 중성화는 필연적인 작용이다. 그러나 중성화 작용은 일반적으로 느리게 일어나므로 피복두께가 충분하다면 콘크리트의 수명에는 큰 영향을 주지 않는다. 다만 피복두께가 두껍지 않거나 다른 열화요인이 뚜렷이 나타나지 않을 때 중성화는 제 1 성능저하 인자가 된다. CO<sub>2</sub>는 일반적으로 콘크리트가 포화습윤상태에서는 침투하기 어려우며 아주 건조한 상태에서는 콘크리트와 반응하기 어렵다. Parrott에 의하면 상대습도가 50~60%에서 중성화진행이 가장 빠르다고 한다. 중성화에 의한 부식은 수분과 산소의 공급이 중요한 요소이기 때문에 상대습도 95~98%에서 가장 빠르다고 하며 상대습도 60% 미만에서는 중성화가 일어나도 부식이 거의 일어나지 않는다고 한다.<sup>(9)</sup>

Fig. 15는 중성화가 20~25 mm까지 진행된 후까지 측정된 결과로서 콘크리트 중성화 이후에도 염화이온 0.4를 제외하고는 부식속도가 오히려 감소하였다. 이는 상대습도가 50%이하에서는 중성화가 일어나도 부식이 일어나지 않는다는 것을 보여주며 Fig. 16의 반전지전위도 비슷한 결과를 보여주었다.



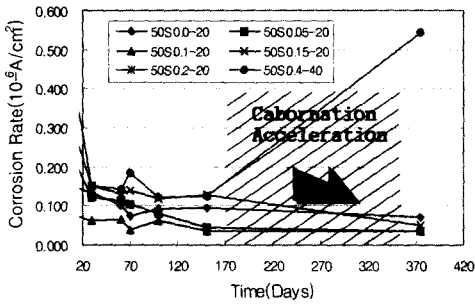


Fig. 15 Corrosion rate according to decarbonation for w/c=0.5, cover depth 20mm

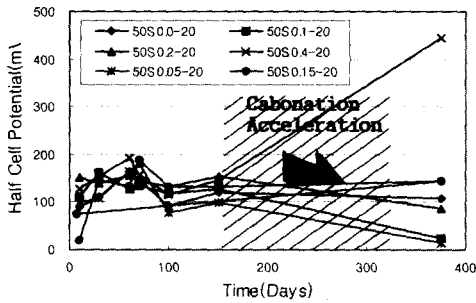


Fig. 16 Half cell potential according to decarbonation w/c=0.5, cover depth 20mm

#### 4.3.6 해빙제에 따른 부식특성

육지의 콘크리트 교량의 상판이 부식에 의해 손상되는 가장 큰 이유는 해빙제의 사용이다. 해빙제는 확산과 침투에 의해 콘크리트 내부로 전달되며 균열이 있는 경우에는 심각한 영향을 줄 수 있다. 또한 해빙제 투여는 얼마나 자주, 얼마나 많은 양을 투여하느냐가 중요한데 이는 특별한 기준이 없으므로 현장조사를 통하여 교량에 대하여 개별적으로 알아보아야 한다. 본 연구의 시험에서는 재령 90일부터 임의로 2주에 한번씩 해빙제와 물을 투여하고 밀폐된 공간에 360일간 90일 간격으로 부식속도 값을 측정하였다. 해빙제 투여와 함께 Fig. 17과 Fig. 18에서 보여주듯이 부식속도와 반전지전위에 급격한 변화가 있었다. 피복두께가 20 mm인 경우에는 부식속도가 상당히 커졌으며 30 mm와 40 mm의 경우는 해빙제 침투가 완전히 이루어지지 않아서인지 큰 차이가 없었다.

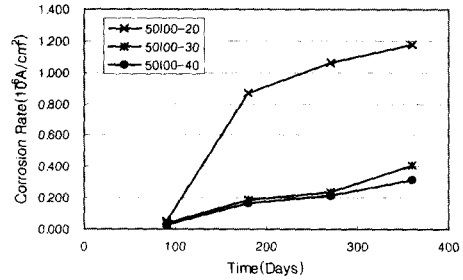


Fig. 17 Corrosion rate according to deicing use

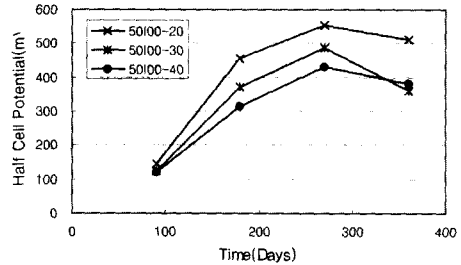


Fig. 18 Half cell potential according to deicing use

## 5. 철근부식에 의한 잔존수명예측방법

육지콘크리트의 철근부식에 의한 잔존수명예측을 다음의 세 가지 경우로 나누어 제시하였다. 각각의 경우에 대하여 가장 작은 수명을 콘크리트의 수명으로 예상하는 것이 바람직하다고 판단된다.

### 5.1 중성화에 의한 수명예측

건실하게 설계, 시공되고 정기적으로 관리되고 있는 육지 구조물의 경우 지속적인 해빙제 투여나 자연재해가 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 활성화기간(Propagation Period)에 대하여는 현재로서 명확히 나타내기 어려우며 상대적으로도 기간도 짧기 때문에 비활성기간을 수명으로 간주했다. 예측방법 과정은 다음과 같다.

- ① 식(3)과 같이  $x = kT_{ini}^n$  이라고 가정한다.
- ② 대상 구조물이 위치한 지역에서의 월평균 상

대습도를 구한 뒤, 식 (4)에 의하여  $n$ 값을 구하여 연평균  $n$ 값을 구한다. 상대습도값을 알 수 없는 경우  $n$ 은 보통 0.5를 사용한다.<sup>(12)</sup>

- ③ 페놀프탈레인용액을 사용하여 중성화깊이( $x_1$ )과 pH깊이 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  $d_1$ 을 결정한다. 피복두께의 편차( $\sigma$ )를 구할 수 없으면 피복두께 50 mm에 대하여 8 mm를 사용하며 부식한계량( $\alpha$ )은 임의로 결정한 뒤 식(2)에 대입하여 유효피복두께  $d$ 를 구한다.
- ⑤ 유효피복두께  $d$ 를 식(1)에 대입하여 비활성기간( $T_{ini}$ )을 구한다.

## 5.2 해사에 의한 수명예측

본 연구에서 측정된 부식속도를 통계해석 프로그램 SAS를 통해 다중회귀분석한 뒤 부식량에 대한 함수를 나타내었다. 부식속도에 영향을 주는 인자 중 염화이온, 상대습도, 피복두께만으로 한정하였으나 부식에 의한 수명예측 중 가장 연구가 미흡한 해사를 사용한 경우에 대해서 의미있는 추정식이 될 것이다.

### 5.2.1 상대습도 60% 이상인 경우의 부식속도

w/c가 50%이고 상대습도가 60% 이상인 경우에 대하여 상대습도와 피복두께의 영향력이 나타났다. 따라서 부식속도를 염화이온, 상대습도, 피복두께의  $e$ 의 누승으로 다중회귀 분석하였다. SAS에 의하면 T검정에서 유의수준 1% 미만의 적합함을 보였으며 잔차분포도에서도 함수설정이 타당함을 보여주었다.

$$I_{corr} = 0.01169e^{2.8899CI - 0.0120De + 0.0269Hu} \mu A/cm^2 \quad (8)$$

여기서  $CI$ 은 시멘트에 대한 염화이온의 중량%(0~0.4%),  $De$ 는 피복두께로 cm(20~40cm),  $Hu$ 는 상대습도로 %(68~90%)를 나타낸다. 또한 Fig. 19와 Fig. 20의 두 데이터 값이 거의 일치함을 보여 다중회귀의 신뢰도를 알 수 있다.

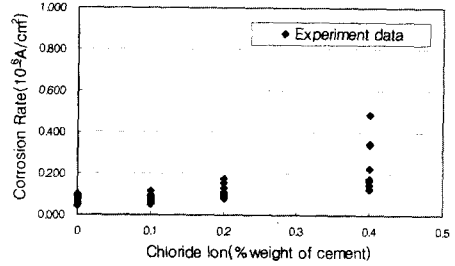


Fig. 19 Data by corrosion experiment

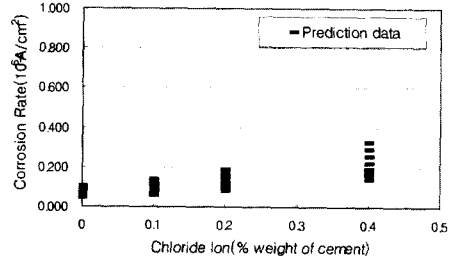


Fig. 20 Data by prediction equation

5.2.2 상대습도 60% 미만인 경우의 부식속도  
상대습도 50% 밖에 자료가 없으므로 습도변수를 따로 고려하지 않았으며 피복두께에 대한 T검정 통계량의 유의수준이 40%를 넘어서므로 염화이온에 대해서만 회귀분석하였다.

여기서  $CI$ 은 시멘트에 대한 염화이온의 중량%(0~0.8%)를 나타내며 Fig. 21은 상대습도 50%에 대한 부식시험 데이터와 회귀분석식을 나타낸다.

$$I_{corr} = 0.0692e^{1.69848CI} \mu A/cm^2 \quad (9)$$

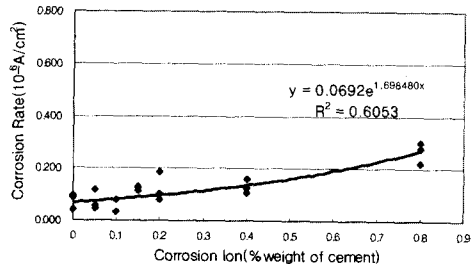


Fig. 21 Result data of corrosion test and regression graph (below relative humidity 60%)

### 5.2.3 부식량 산정과 수명예측

부식속도식을 시간에 대하여 적분하면 시간에 대한 부식량의 함수로 나타낼 수 있다. 부식에 의한 질량감소는 녹으로서 나타난다. 실제 철의 질량은 녹으로 변환시 2~6배의 부피를 가지며 보통 3배의 부피팽창을 사용하며 이는  $1 \mu \text{Acm}^{-2} = 11.5 \mu \text{m yr}^{-1}$  단면손실 =  $34 \mu \text{m yr}^{-1}$  녹 발생의 결과를 가져온다. 콘크리트가 균열을 일으키는 시점의 단면손실은 콘크리트의 배근 간격, 철근 크기 및 기하학적 위치에 따른 구속조건에 따라 다르다. Rodriguez의 경우 0.015~0.04 mm를 제시했으며 Browne의 경우 0.1 mm의 단면손실을 제시했다.<sup>(6)</sup> 부식량은 식 (10)에서 (13)으로 표현될 수 있으며 이 값이 콘크리트 균열을 일으키는 부식량과 같게 되면 부식에 의한 수명은 다한 것으로 간주한다.

#### ① 상대습도 60 % 이상

$$Q_{corr} = 0.1344t \times e^{2.890Cl - 0.012De + 0.027Hu} \quad \mu \text{ m/yr} \quad \text{단면손실 (10)}$$

$$Q_{corr} = 0.3975t \times e^{2.890Cl - 0.012De + 0.027Hu} \quad \mu \text{ m/yr} \quad \text{녹발생 (11)}$$

#### ② 상대습도 50 %

$$Q_{corr} = 0.7958t \times e^{1.699Cl} \quad \mu \text{ m/yr} \quad \text{단면손실 (12)}$$

$$Q_{corr} = 2.352t \times e^{1.699Cl} \quad \mu \text{ m/yr} \quad \text{녹발생 (13)}$$

### 5.3 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. Fig. 22는 시간에 따른 콘크리트 표면의

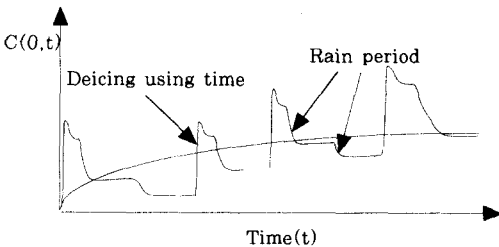


Fig. 22 Chloride ion distribution according to deicing use at concrete surface

염화이온양을 모사한 것이며 이를  $C(0,t)$ 라는 특정함수로 가정한 것이다.

염화이온에 의한 부식발생시점은 엄밀히 말해  $Cl/OH$ 의 비에 의하여 결정되어지나  $OH$ 의 값에 큰 차이가 없다는 가정하에 각국의 기준은  $Cl$ 의 양으로 규정되어 있다. 식(14)는 Fick의 법칙의 일반해를 나타내며 콘크리트 표면의 농도를  $C(0,t) = kt^{1/2}$ 로 가정하면 식(14)는 식(15)와 같이 변환된다.<sup>(13,15)</sup> 상수  $k$ 값은 콘크리트 표면에서 측정된 염화이온 값과 재령을 대입하여 결정한다. 식(15)에 의하여 철근주변의  $Cl$ 양과 허용기준이 같게 되는 시점을 수명으로 예측한다.

$$C(x,t) = C_0 [1 - \text{erf}(x / (2 (D_{eff} t)^{1/2}))] \quad (14)$$

$$C(x,t) = k\sqrt{t} \left\{ e^{-x^2 / (4D_{eff}t)} - \left[ \frac{x\sqrt{\pi}}{2\sqrt{D_{eff}t}} \text{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4D_{eff}t}}\right) \right] \right\} \quad (15)$$

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) 여러 가지 조건에 대한 부식특성 시험은 정성적 평가인 반전지전위법보다 정량적 평가인 분극저항법이 보다 명확한 결과를 보여주었다. 하지만 분극저항법이 반전지전위법보다 복잡하고 고가의 장비를 요구하므로 현장 적용시에는 두가지 방법을 적절히 병행하는 것이 바람직하다.
- 2) 콘크리트 내부의 철근부식은 초기재령시에는 수화반응 및 내부의 잔여수분으로 인해 부식상태가 불안정하므로 부식특성을 전기화학적인 시험으로 해석하고자하면 표준상태(상대습도 50%, 온도  $20 \pm 2^\circ \text{C}$ )의 경우 약 150일 정도가 지나서 시행하는 것이 바람직하다.
- 3) 표준용 시료의 경우 분극저항과 부식전류와의 관계를 나타내는 변환계수는 실제질량감소량에 의한 시험에 의해서 0.0438V로 분석되었다.
- 4) 페놀프탈레인에 의한 중성화 측정은 pH 8.3~9.5를 나타내나 염화이온이 함유되지 않

은 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 5~10mm정도로 나타났다. 이는 중성화에 의한 수명예측을 10년이상 차이나게 할 수 있다.

- 5) 상대습도가 낮은 경우에는 중성화가 발생하여도 부식속도가 작게 측정되었으며 피복두께와의 상관성도 떨어지게 나왔다. 하지만 염화이온이 많은 경우에는 다른 조건에 관계없이 부식이 빨리 일어났다.
- 6) 염화이온, 상대습도, 피복두께를 고려한 재령에 대한 부식속도 및 부식량 산정식을 유도하였다.
- 7) 육지 콘크리트의 잔존수명예측을 기존의 연구의 종합과 본 연구의 시험을 통해 중성화에 의한, 해사에 의한, 해빙제에 의한 철근부식으로 제시하였다.

### 참고문헌

1. 오병환외, "전위차 부식속진법을 이용한 철근 콘크리트의 내부식성 예측을 위한 실험 연구." 한국콘크리트학회 1996년도 봄 학술발표회 논문집, 제 8권 1호(통권 제 14집), pp. 71~76.
2. 김은겸, 신치겸외, "콘크리트내부의 철근부식에 관한 전기화학적 연구," 한국콘크리트학회 1996년도 가을 학술발표회 논문집, 제 8권 2호(통권 제 15집), pp. 213~217.
3. 문한영외, "해양환경하에 방치한 콘크리트중의 철근의 부식추정에 대한 연구," 콘크리트학회지, 제6권 2호, 1994.4, pp. 129~137.
4. 김무한외, "중성화 및 철근 부식을 고려한 콘크리트

- 트 구조물에 관한 수명예측기법의 활용기술개발," 한국콘크리트학회 1996년도 가을 학술발표회 논문집, 제 8권 2호(통권 제 15집), pp. 218~224.
5. P. Schiessl, "Corrosion of Steel in Concrete," Report of the Technical Committee 60-CSC RILEM, Chapman and Hall, 1988, pp.5 1~53, pp. 56~57.
6. John P. Broomfield, "Corrosion of Steel in Concrete," E&FN SPON, 1997, pp. 52~72.
7. J.Kropp and H.K. Hilsdorf, "Performance Criteria for Concrete Durability," RILEM Report 12, E&FN SPON, 1995, ch. 3~4.
8. Weyers, R.E. "Service Life Estimates (SHRP-S-668),"Strategic Highway Research Program, National Research Council, 1993.
9. A. Bentur, S. Diamond and N.S. Berke, "Steel Corrosion in Concrete," E&FN SPON,1997, pp. 158.
10. J. Files, "Electrochemical Measurements on Concrete Bridge for Evaluation of Reinforcement Corrosion Rates," Corrosion, Vol. 49, No.7, pp.601~613.
11. Denny A. Jones, "Principle and Prevention of Corrosion," 2th, Prentice Hall, 1996, pp. 158~159.
12. James R. Clifton, "Predicting the Remaining Service Life of Concrete," NISTIR 4712, National Institute of Standards and Technology, Nov. 1991, pp. 24.
13. 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)
14. 염합유 콘크리트 철근의 부식예측 및 방지대책연구. 한국과학기술연구원, 1998.12. pp. 20~27.
15. Stephen L. Amey, "Predicting the Service Life of Concrete Marine Structures," ACI Structural Journal No. 2, Vol.95, March-April 1998, pp. 205~214.

### 요 약

신도시 건설, 건설대형참사, 내구성 설계의 도입 등으로 인하여 콘크리트의 수명예측에 대한 관심이 높아지고 있으며 이로 인해 해안 구조물에 대한 철근부식에 의한 수명예측은 많은 발전을 가져왔다. 본 연구에서는 아직까지 연구성 과가 미흡한 육지콘크리트에 대한 수명 예측을 세 가지 방법으로 구분하여 예측하였다. 첫 번째는 중성화에 의한 철근 부식예측으로 임계부식pH와 유효중성화깊이 및 통계적 분포를 고려하였다. 두 번째는 해사를 사용한 경우에 대한 수명 예측으로 염화이온량, 피복두께, 상대습도 등을 달리하여 분극저항법에 의하여 부식속도를 측정하였으며 실제질량감소 량과 비교하여 다중회귀분석을 시행하였다. 세 번째는 해빙제에 의한 수명예측으로 콘크리트 표면의 시간에 따른 염화 이온량을 임의로 가정하여 Fick의 두 번째 법칙을 전개하였다. 본 연구는 육지 콘크리트의 수명을 제한적인 범위에서 예측하였으나 실제 구조물의 적용과 앞으로의 계속된 연구에 도움이 되리라고 사료된다.

(접수일자 : 2000. 6. 2.)