

철근콘크리트 구조물에서 철근의 부식을 측정을 위한 전기화학적 방법의 이용과 전망

Use of Electrochemical Techniques for Assessing of Corrosion Rate
of Reinforcing Steel in Concrete Structures

소형석 | 서남대학교 건축공학과 교수, 공학박사

오종식 | 한국시설안전공단 기획예산팀 과장, 공학박사

송동엽 | 한국시설안전공단 건축실 팀장, 공학박사

철근콘크리트 구조물에서 철근의 부식율 측정을 위한 전기화학적 방법의 이용과 전망

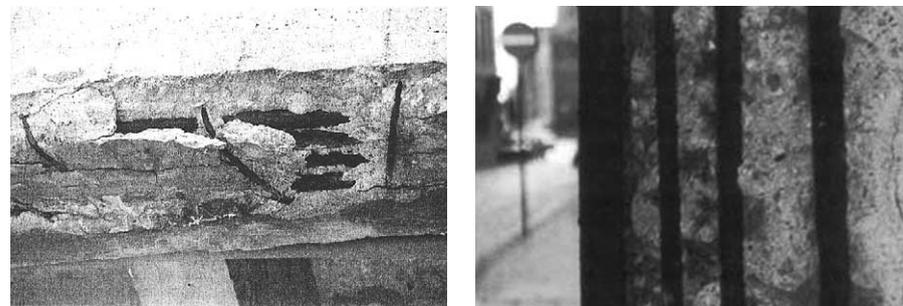
Use of Electrochemical Techniques for Assessing of Corrosion Rate
of Reinforcing Steel in Concrete Structures

소형석 | 서남대학교 건축공학과 교수, 공학박사
오종식 | 한국시설안전공단 기획예산팀 과장, 공학박사
송동엽 | 한국시설안전공단 건축실 팀장, 공학박사

1. 서론

최근 악화된 환경오염이나 불량시공 등 사용조건이 가혹화로 인해 철근콘크리트구조물의 조기 성능저하 사례들이 급증하고 있으며, 이에 따라 산업기반시설물의 유지관리 비용으로 해마다 막대한 비용이 지출되고 있다. (그림 1 참조)

철근콘크리트구조물에서 내부철근의 부식은 철근콘크리트구조물의 내구연한을 조절하는 주요변수이다. 일반적으로 철근의 부식은 콘크리트 내부에서 보이지 않게 시작되어 은밀하게 진행되기 때문에 부식 발생 초기에 이를 시각적으로 파악하기는 매우 어렵다. 만일 부식이 균열이나 녹 발생과 같이 시각적으로 나타났다면, 이를 위한 보수 및 보강조치는 훨씬 많은 비용을 필요로 할 것이며 매우 비효율적일 것이다. 반면, 보다 초기단계에서 내부철근의 부식을 정확하게 그리고 정량적으로 파악할 수 있다면, 관리자는 가장 경제적이고 효율적인 보수 및 보강전략을 수립해 줄 수 있을 것이다.



〈그림 1 Corrosion of reinforced concrete structures〉

지난 25년 동안 철근콘크리트구조물에서 철근의 부식 및 부식율(혹은 부식속도)을 정확하게 측정할 수 있는 신뢰할만한 기술을 고안해 내기 위해 각 분야에서 많은 연구와 노력, 막대한 투자가 이루어져 왔지만, 아직까지 만족할 만한 측정기술은 없는 실정이다.

최근 전기화학적 방법(electrochemical method)을 이용한 부식측정 기술은 비교적 정확할 뿐 아니라 적은 부식양도 짧은 시간 내에 측정이 가능한 비파괴 기술로서 크게 주목받고 있다. 현재 가장 널리 이용되고 있는 전기화학적 기술은 콘크리트 표면에서 보강철근의 부식전위(corrosion potential)를 측정하는 자연전위법¹⁾(half-cell mapping)이다. 이 기술은 현장에서 간단한 측정 장비와 방법으로 콘크리트 내 철근의 부식가능성을 빠르고 쉽게 조사 및 평가할 수 있는 유용한 방법이다. 자연전위법에서 철근의 부식가능성(possibility)을 나타내는 부식전위 값은 미국 내 염해를 입은 콘크리트 교각을 대상으로 조사된 연구 결과에 기초하여 이루어졌다. 이들 철근의 부식전위 값과 부식 가능성 사이의 관계는 ASTM C-876²⁾에 잘 나타나 있다. 그러나 자연전위법은 단지 부식발생 가능성만을 나타내는 정성적인 평가일 뿐 부식율과 같이 부식문제의 심각성을 정량적으로 나타내지 못한다는 단점이 있다. 즉 “높은 부식가능성”으로 조사된 측정부위가 향후 빠른 속도로 부식되어 균열이나 녹발생의 수준까지 발전할지 혹은 서서히 진행될지 등 구체적인 내용을 파악하기 어렵다.

일부 연구자들은 콘크리트 비저항법(concrete resistivity)³⁾을 자연전위법과 연계하여 사용함으로써 내부철근의 부식을 보다 구체적으로 평가하고자 시도하였다. 즉, 자연전위법에 의해 “높은 부식가능성”으로 조사된 측정부위를 대상으로 콘크리트 전기저항을 측정하여 내부철근의 부식율을 예측하는 것이다. 그러나 이 방법도 역시 내부철근의 부식을 상대적으로 나타내는 간접적인 평가의 한계를 벗어나지 못했다.

콘크리트 내 철근의 부식율을 정량적으로 예측한다는 것은 간접적인(정성적인) 방법들에 의해 내부철근의 부식이 모호하게 조사되었을 때 이를 해결할 수 있는 방안으로서, 또는 잔존 내구연한의 예측 및 내구설계, 효율적이고 경제적인 보수·보강전략의 수립을 위한 기술적 자료 제공 측면에서 특히 중요한 의미를 갖는다.

현재 철근의 부식율을 정량적으로 예측할 수 있는 전기화학적 방법에는 선형분극저항법(linear polarization resistance)⁴⁾, 교류 임피던스법(AC impedance)⁵⁾, 정전류/정전위 펄스법(galvanostatic/potentiostatic pulse transient response)⁶⁾ 등이 주로 이용되고 있다.

본 원고에서는 철근콘크리트구조물에서 내부철근의 부식율을 정량적으로 측정할 수 있는 이들 전기화

학적 기술들의 부식측정 기법에 대해 상세히 살펴보고, 그 결과의 신뢰성 문제 그리고 환경적 변수(온도 및 습도, 강수량 등)의 영향 등을 종합적으로 고찰해 봄으로써 철근의 부식을 측정을 위한 전기화학적 방법의 이용과 전망에 대해 보다 깊이 이해하고자 한다.

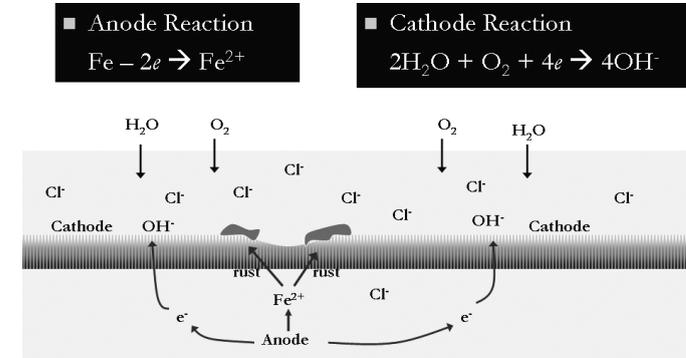
2. 콘크리트 내 철근의 부식메커니즘

1) 부식발생 원인과 그 특성

콘크리트 내의 철근은 피복 콘크리트의 강알칼리(pH 12.5 이상) 환경에서 철근표면에 형성된 부동태피막(passive oxide layer)에 의해 부식으로부터 보호된다. 그러나 대기 중의 탄산가스에 의한 콘크리트의 중성화나 해사 및 동결기 제설제 등의 사용으로 유입되는 염화물이온(Cl-)에 의해 철근의 부동태피막은 파괴되고 부식이 시작되며, 결국 피복 콘크리트의 박리 및 탈락현상으로 진행하여 철근콘크리트구조물의 성능을 크게 저하 혹은 붕괴시킨다. 일반적으로 콘크리트의 중성화에 의한 내부철근의 부식은 철근 표면 전반에 걸쳐 넓게 발생하며, 염화물이온(Cl-)에 의한 부식은 염화물이온의 공격을 받는 부위를 중심으로 국부적으로 발생하는 특성이 있다. 콘크리트 내부로의 염화물이온 유입경로는 다음과 같이 크게 두 가지의 경우로 구분될 수 있다. 먼저, 콘크리트 배합시 충분히 제염되지 않은 해사의 사용으로 인해 콘크리트 내부에 염화물이온이 함유되는 경우, 두 번째, 해안지역이나 겨울철 제설제(CaCl2)로부터 비산(飛散)하는 염분입자가 콘크리트 외부에서 내부로 침투되는 경우이다.

2) 전기화학적 과정으로서 부식메커니즘

콘크리트 내부로 유입된 염화물이온이나 콘크리트의 중성화에 의해 내부철근 표면의 부동태피막이 파괴되면 염화물과 알칼리 농도의 차, 철근표면의 화학적 불균일성으로부터 철근표면의 전위(potential)는 매크로적으로 불균일하게 되어 <그림 2>와 같이 국부전지(macro cell)를 형성하고 부식이 발생한다⁷⁾. 즉 철근표면의 부동태피막이 파괴되고 철근이 활성상태에 들어가면, 철근은 물과 용존산소의 작용으로 부식을 일으키면서 전류의 흐름에 따라 철근 표면에서 철이 이온화되는 양극반응(산화반응)과 산소가 환원하는 음극반응(환원반응)이 발생하며 부식전지(corrosion cell)를 형성한다.



<그림2> Corrosion as an electrochemical process⁷⁾

3) 부식의 영향 인자

<그림 2>의 부식메커니즘에서 알 수 있듯이 부식의 직접적인 영향인자는 부식발생 장소에서의 충분한 산소(O₂)와 물(H₂O)의 존재, 그리고 철근표면의 부동태피막 파괴를 야기하는 콘크리트의 중성화(pH의 저하)와 염화물이온(Cl-)의 존재이며, 그 이외 콘크리트의 품질, 피복두께, 균열 등 많은 영향인자들이 관련하고 있다.

4) 부식의 측정방법

콘크리트 내 철근의 부식 측정방법은 표 1과 같이 다양하며 전기화학적 방법과 비전기화학적 방법으로 크게 분류할 수 있다. 무게감량법(금속을 부식매체 속에 일정시간 동안 방치한 후 그 금속의 무게감량을 측정)이나 용액분석법(부식매체 속으로 용출된 금속이온의 양을 화학적으로 정량화) 등의 비전기화학적 방법들은 부식공학측면에서 널리 사용되고 있으나, 다소 부정확할 뿐 아니라 부식측정에 오랜 시간이 걸린다는 단점이 있어 그 응용에 한계가 있다. 반면, 전기화학적 방법은 비교적 정확할 뿐 아니라 부식율이 작은 경우에도 짧은 시간 내에 측정이 가능한 비파괴방법으로서 최근 크게 주목되고 있다.

〈표1〉 Measurement methods of corrosion rate⁷⁾

측정방법	부식지표	적용성		
		실험실	현장	
비전기화학적 방법	무게감량법	정량적	낮음	불가능
	용액분석법	정량적	높음	높음
전기화학적 방법	자연전위법	정성적	높음	높음
	콘크리트 비저항법	정성적	중간	낮음
	선형분극저항법	정량적	중간	낮음
	교류 임피던스법	정량적	낮음	극히 낮음
	정전류/정전위 펄스법	정량적	중간	낮음

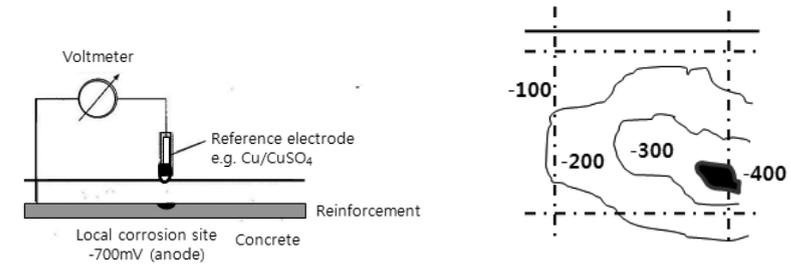
3. 전기화학적 방법을 이용한 콘크리트 내 철근의 부식 평가

3.1 자연전위법 (Half-cell mapping)

자연전위법(half-cell mapping)^{1),2)}은 그림 3에 나타난 바와 같이 콘크리트 표면에서 불활성전극(half-cell)을 이용하여 내부철근의 부식전위(corrosion potential)를 측정하는 방법으로 가장 잘 확립되어 있다. 이 방법은 〈표 2〉 및 〈그림 3〉에서 알 수 있듯이 간단한 측정 장비와 방법으로 철근의 부식가능성과 그 부위를 현장에서 빠르고 간단하게 조사 및 평가할 수 있는 유용한 방법으로 가장 널리 이용되고 있다. 이 방법에서 철근의 부식 가능성(possibility)을 나타내는 부식전위의 범위는 미국 내 염해를 입은 콘크리트교 상판을 대상으로 조사된 Stratful8)의 연구결과에 기초하여 이루어졌으며, 이들 철근의 부식전위 값과 부식 가능성 사이의 관계는 ASTM C-8762)에 잘 나타나 있다. 그러나 최근 다양한 환경에 놓여 있는 철근콘크리트구조물에 대한 자연전위의 측정결과에서 부식가능성을 나타내는 내부철근의 자연전위 값이 각 환경에 따라 상이한 결과로 나타날 수 있음이 보고되고 있으며, 더욱이 이 방법은 단지 부식발생의 가능성만을 나타내는 정성적인 평가일 뿐, 부식율과 같이 부식의 심각성을 정량적으로 나타낼 수 없다는 단점이 있다.

〈표2〉 Risk of corrosion by half-cell mapping measurements (ASTM C876-91)²⁾

자연전위 (Cu/CuSO4 half-cell)	부식가능성
> -200 mV	낮음 (<10%)
-200 mV ~ -350 mV	불확실
< -350 mV	높음 (>90%)



〈그림3〉 Schematic set-up for potential mapping and half-cell potential map

3.2 콘크리트의 비저항법 (concrete resistivity)

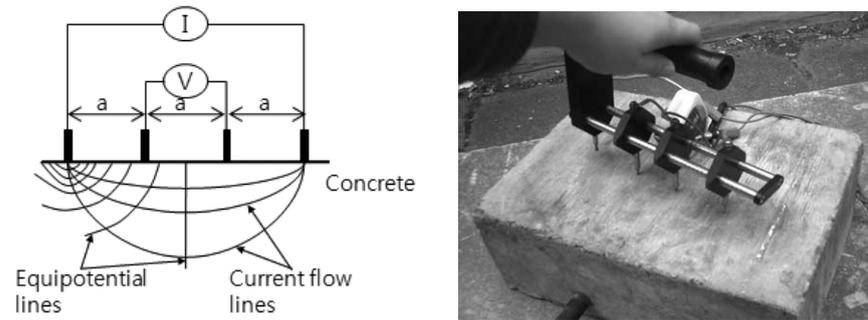
콘크리트의 비저항법(concrete resistivity)³⁾은 〈그림 4〉에 나타난 바와 같이 내부철근과의 전기적 접촉(연결) 없이 콘크리트 표면으로부터 간단하게 측정될 수 있어 현장 측정기술로서 매우 유용한 기술이다. Wenner 기술(4전극방식)을 이용한 콘크리트 비저항 측정법에서, 작은 교류(보통 50Hz의 AC current)전류, I는 바깥쪽에 설치된 두 전극사이에 인가되고 이로 인해 야기된 안쪽 두 전극사이의 전위(potential)차, V는 측정된다. 따라서 콘크리트의 전기저항(ρ_{con})은 식(1)에 의해 결정될 수 있으며, 콘크리트의 전기저항과 부식율과의 관계는 〈표 3〉과 같다.

$$\rho_{con} = 2\pi a \frac{V}{I} \quad (1)$$

여기에서, ρ_{con} 콘크리트의 전기저항(k Ω · cm), a=전극사이의 간격(cm)이다.

그러나 이 방법도 내부철근의 부식을 상대적으로 나타내는 간접적인 평가로서 철근의 부식율(즉, 부식율)을 정량적으로 측정할 수 없다는 한계가 있다.

철근콘크리트구조물에서 내부철근의 부식율을 직접 정량적으로 측정한다는 것은 정성적인 측정기술에 의해 내부철근의 부식이 모호하게 조사되었을 때, 이를 해결할 수 있는 방안으로써 특히 중요한 의미를 가지며, 철근콘크리트구조물의 내구설계 및 내구연한 예측, 보수 및 보강전략 등 다양한 분야의 기술적 자료로서 매우 유용하다.



〈그림4〉 Concrete resistivity measurements (Wenner technique)

〈표3〉 Concrete resistivity and corrosion rate of reinforcing steel

전기저항, ρ_c (k Ω cm)	부식가능성
< 5	매우 높음
5 ~ 10	높음
10 ~ 20	중간 / 낮음
> 20	낮음

3.3 선형분극저항법 (Linear polarization resistance method)

콘크리트 내에서 발생하는 내부철근의 부식은 전기화학적 과정이다. 만일, 내부철근에 전기화학적 부식이 발생된다면, 〈그림 2〉에 나타난 바와 같이 그 부위에 부식전지가 형성되며 양극과 음극 사이에 흐르는 전류로 인하여 전극전위의 변화가 발생된다. 이러한 전극전위의 변화를 분극(polarization)이라하며, 분극은 부식율에 영향을 준다. 내부철근의 부식전위(E_{corr} : corrosion potential)와 이에 따른 부식전류(I_{corr} : corrosion current)는 몇 가지 방법에 의해 측정되어질 수

있다. (표 1 참조) 만일 부식전류가 측정된다면, 패러데이(Faraday's)법칙을 이용하여 식(2) 및 식(3)에 의해 내부철근의 부식율을 계산할 수 있으며, 직접 철근의 무게감량 값으로 환산할 수도 있다.

(표 4 참조)

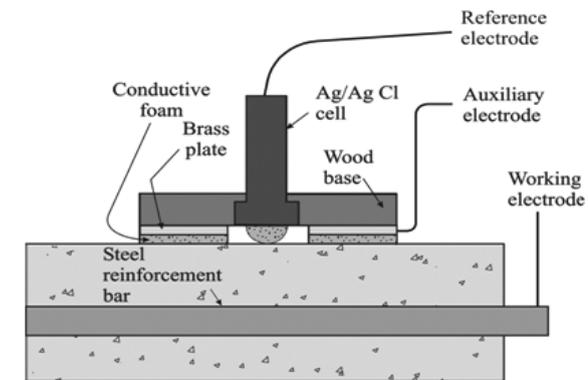
$$CR = \frac{Mi_{corr}t}{\rho zF} \approx 11.6 \times i_{corr} \quad (2)$$

여기에서, CR(corrosion rate)=부식율($\mu\text{m}/\text{year}$), M=철분자의 중량(55.85g/mol), i_{corr} =부식전류밀도($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), t=시간(s), ρ =철의 밀도(7.85g/cm³), z=분자당 이동된 전자의 수($\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2e^-$ 에서 2), F=패러데이 상수(96,500 C/mol)이다.

$$i_{corr} = \frac{I_{corr}}{A} \quad (3)$$

여기에서, i_{corr} =부식전류밀도($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), I_{corr} =부식전류(μA), A=전류(혹은 전위)가 인가된 내부철근의 표면적(cm^2)이다.

그러나 부식전류는 내부철근 표면사이에 수없이 퍼져있는 작은 양극면과 음극면 사이를 흐르는 전류이므로 이를 직접 측정하기는 매우 어렵다. 때문에 일반적으로 부식전류는 〈그림 5〉에 나타난 바와 같이 콘크리트 표면에서 불활성전극(Half-cell)과 외부 전기회로를 이용하여 내부철근에 음극 또는 양극반응을 일으켜(전류 혹은 전위의 인가) 간접적으로 측정된다. 이러한 방법에는 선형분극저항법(Linear polarization resistance), 교류 임피던스법(AC impedance), 정전류 펄스법(Galvanostatic pulse transient) 등이 있으며, 이중 가장 대표적인 방법이 선형분극저항법(LPR method)이다.



〈그림5〉 Three-electrode system for measuring reinforcement corrosion rate

선형분극저항법(LPR method)은 철근콘크리트구조물에서 내부철근의 순간 부식율(instantaneous corrosion rate)을 직접 측정할 수 있는 가장 간단한 방법으로 현재 실험실에서 가장 많이 사용되고 있다. 전기화학적 과정으로서, 콘크리트 내 철근의 부식은 옴 법칙(Ohm's Law, $V=IR$)에 지배되지 않는다.^{4),9)} 그러나 Stern-Geary⁹⁾는 만일 부식경계면에서의 분극(polarization)이 $\pm 30\text{mV}$ 범위 내에 있다면, 옴(ohm)법칙이 성립된다는 것을 이론적으로 보여주었다. 따라서 만일 $\pm 30\text{mV}$ 이내의 미소전위 ΔE 를 내부철근에 인가한다면, 이로 인해 야기된 전류의 변화 ΔI 는 식(4)과 같이 내부철근과 콘크리트 경계면에서의 저항, 즉 분극저항 R_p 를 산출하는데 이용될 수 있다.(그림 6 참조) 그리고 R_p 로부터 내부철근의 부식전류(I_{corr})는 Stern-Geary이론⁹⁾에 기초하여 식(5)에 의해 결정될 수 있으며, 부식전류는 식(2)과 식(3)에 의해 부식전류밀도(i_{corr})와 부식율(혹은 부식속도) CR(corrosion rate, $\mu\text{m}/\text{year}$)로 나타낼 수 있다. 분극저항 R_p 와 부식전류밀도 i_{corr} , 그리고 부식율 CR과의 관계는 <표 4>와 같다.

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I} \quad (4)$$

여기에서, R_p =분극저항($k\Omega \cdot \text{cm}^2$), ΔE =인가된 전위(V), ΔI =인가된 전위에 대한 전류응답(A)이다.

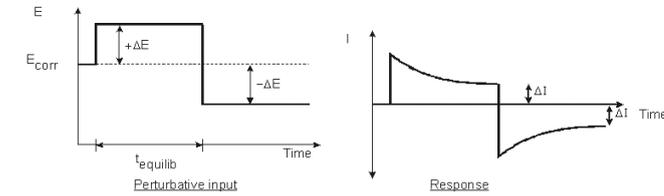
$$I_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (5)$$

여기에서, I_{corr} =부식전류(μA), B =Stern-Geary상수로서 부식철근(active corrosion)의 경우 25mV , 부동태철근(passivity)의 경우 50mV 의 값이 일반적으로 적용 된다.¹⁰⁾

<표4> Correlation between corrosion rate, corrosion current density and polarization resistance¹⁰⁾

분극저항 R_p , ($k\Omega \cdot \text{cm}^2$)	부식전류밀도 i_{corr} , ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	부식율 CR*, ($\mu\text{m}/\text{year}$)	부식상태
250 이상	0.1 이하	1 이하	부동태
250 ~ 25	0.1 ~ 1	1 ~ 10	낮음/중간
25 ~ 2.5	1 ~ 10	10~100	높음
2.5 ~ 0.25	10~100	100~1000	매우 높음

* 페러데이 법칙(Faraday's law)으로부터 내부철근 단면의 감소 $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ 로 가정함.



<그림6> Potentiostatic LPR measurements

그러나 철근콘크리트구조물에서 내부철근의 부식율 측정을 위한 선형분극저항법의 이용에는 다음과 같은 몇 가지 실질적인 어려움이 있다.

- 1) 분극저항 R_p 는 부식전위(E_{corr})의 안정화를 위해 필요한 적절한 시간(t ; delay time)으로 측정되어야 한다. 즉 부적절한 측정시간의 선택과 적용은 부정확한 결과를 야기한다. 일반적으로 부식전위의 안정화를 위해 필요한 시간(t)은 철근의 부식상태에 크게 의존한다. 만일 내부철근의 부식이 빠르게 부식되고 있다면, 부식전위의 안정화를 위해 필요한 시간은 불과 수초일 것이다. 그러나 부식비율이 낮거나 부동태일 경우 부식전위의 안정화를 위해 필요한 시간은 수분 이상 걸릴 것이다. 때문에 현장 철근콘크리트구조물에서 부식철근 및 부동태철근 모두에 대해 적절한 측정시간을 선택 및 적용한다는 것은 매우 어려운 문제이다.
- 2) 또 하나의 실질적인 어려움은 전위(ΔE)가 인가된 내부철근의 표면적(A)을 정량화하기가 어렵다는 것이다. 때문에 보조전극에 의해 인가된 철근의 표면적 A는 비록 그 표면적만이 효과적으로 분극될 지라도 보조전극 밑의 "수직 투영면적"으로 보통 가정된다. 일부 연구자들은 원형의 가드링(guard ring) 장치¹¹⁾를 이용하여 콘크리트 표면에서 보조전극에 의해 내부철근에 인가되는 전위를 보조전극의 수직 투영면적 범위내로 제한하고자 하였다. 그러나 이 시도는 아직까지 만족할 만한 결과를 보이지 못하고 있다. 이러한 실질적인 어려움들은 분극저항법의 현장 적용을 어렵게 하는 주요 원인이 되고 있다.

3.4 교류 임피던스법(AC impedance)

교류 임피던스법(AC impedance)은 선형분극저항법의 직류(DC)분극 대신 $10 \text{ kHz} \sim 10 \text{ mHz}$ 범위의 교류(AC)전압을 인가하여 분극되어진다. 교류전압의 인가에 대한 응답은 하나의 복잡한 임피

턴스로서, <그림 7>에서 보는 바와 같이 “저항”을 나타내는 실수부분(Z')과 “전하량(capacitive)” 혹은 “인덕티브(inductive)”를 나타내는 허수부분(Z'')으로 구성된다. 그리고 주파수에 따른 임피던스의 변화를 분석함으로써 내부철근의 부식경계면에 형성된 <그림 8>의 등가 전기회로(equivalent electrical circuit)¹²⁾를 결정할 수 있다. 일반적으로 등가의 전기회로는 분극저항 R_p 와 병렬의 커패시턴스 C_{dl} , 그리고 직렬로 연결된 피복콘크리트의 저항(R_s) 성분으로 구성된다. 따라서 임피던스 값은 식(6)에 의해 결정될 수 있다.

$$Z = \frac{1}{R_p} + j\omega C_{dl} \quad (6)$$

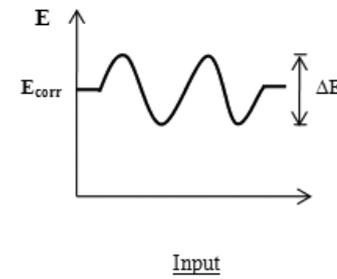
여기에서, Z =임피던스(Ω), R_p =분극저항(Ω), $\omega=2\pi f$ (rad/s)로 각(角) 속도, f =주파수(Hz), C_{dl} =커패시턴스($\mu F/cm^2$)이다.

<그림 8>에 나타난 바와 같이 Z' 에 따라 Z'' 을 작도하면, 분극저항 R_p 를 지름으로 하는 반원(semicircle)이 주어진다. 그리고 반원(semicircle)은 측정된 기준전극과 내부철근 사이의 피복콘크리트의 저항, R_s 에 의해 차감된다. 반원(semicircle)의 꼭지점에서의 주파수 f 는 측정되며, 커패시턴스 값은 식(7)으로부터 산출될 수 있다.

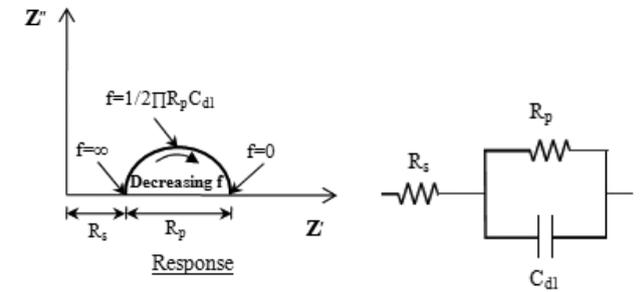
$$C_{dl} = \frac{1}{2\pi R_p f} \quad (7)$$

실질적으로, 교류임피던스의 응답은 내부철근 표면의 필름효과나 콘크리트 내 이온의 확산효과 등으로부터 기인될 수 있는 각기 다른 병렬의 저항(R)과 커패시턴스(C) 성분에 의해 여러 개의 반원(semicircle)으로 조합되어질 것이다. 그리고 커패시턴스(C) 값은 교류(AC) 응답의 어느 부분이 부식에 기인된 것인지 분별하는데 유용하게 이용될 수 있다. 일반적으로 1~100 $\mu F/cm^2$ 의 커패시턴스와 관련된 저항은 분극저항 R_p 로서 전술한 식(2)~(5)에 의해 철근의 부식율을 산출하는데 이용될 것이다^{6),12)}.

이상에서 살펴본 바와 같이 교류 임피던스법은 직류(DC)신호에 의한 분석이 곤란한 경우에도 적용가능한 방법으로 분극저항 뿐 아니라 전해질(피복콘크리트)의 저항이 동시에 측정되어 부식에 대한 구체적인 정보를 제공해 줄 수 있는 유용한 방법이다. 그러나 이 방법은 측정결과를 얻는데 장시간(수 분에서 수 시간까지)이 소요되며, 측정결과와 평가와 해석 등이 매우 어렵기(특히 부동태 철근에서) 때문에 주로 실험실내로 그 이용이 제한되고 있다.



<그림7> AC impedance measurement



<그림8> Simple Randles circuit¹²⁾

3.5 정전류 펄스법(Galvanostatic pulse transient method)

정전류 펄스법은 부식경계면(콘크리트와 내부철근 표면 사이)에 인가된 전류에 대한 부식전위의 동적 응답을 연구하기 위해 비교적 최근에 개발된 방법이다. 이 방법은 1mA 이하의 정전류(galvanostatic pulse, I_{app})를 그림 9에 나타난 바와 같이 콘크리트 표면으로부터 내부철근에 인가하고, 이로 인해 야기된 부식전위의 변화(transient response, V_t)를 시간에 따라 측정한다. <그림 10>과 같이 시간의 함수로 나타내어진 부식전위의 변화곡선은 콘크리트 내 철근의 전기화학적 부식메커니즘에 기초하여 부식율 평가를 위한 일련의 저항/커패시턴스(resistance / capacitance) 모델을 얻기 위하여 분석된다. (그림 11 참조)

인가전류, I_{app} 가 내부철근에 인가되었을 때, 주어진 시간 t 에서 철근의 분극 전위 V_t 는 등가 전기회로에 기초하여 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_t = I_{app} R_s + I_{app} R_p [1 - \exp(-\frac{t}{R_p C_{dl}})] \quad (8)$$

그리고 적절한 시간(delay time) 후 응답전위는 최종 안정된 상태 V_{max} 에 도달할 것이고 피복콘크리트의 저항 R_s 로부터 분리된 R_p 와 C_{dl} 을 얻기 위해 식(8)을 식(9)과 같이 선형관계로 변환시킬 수 있다.

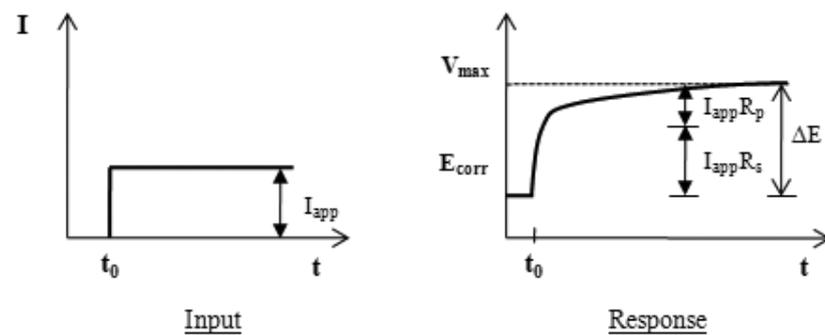
$$\ln(V_{max} - V_t) = \ln(I_{app} R_p) - (\frac{t}{R_p C_{dl}}) \quad (9)$$

즉, <그림 10>에서와 같이 시간 t 에 따른 $\ln(V_{max} - V_t)$ 는 y 축의 값이 $\ln(I_{app} R_p)$ 이고 기울기가 $1/R_p C_{dl}$ 인 선형그래프로서 R_p 와 C_{dl} 를 산출할 수 있다. 시간 t 에 따른 $\ln(V_{max} - V_t)$ 그래프의

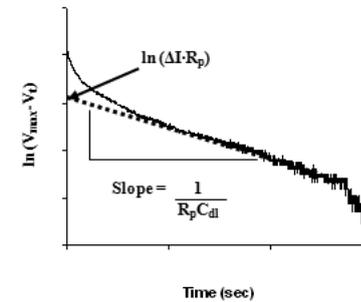
선형영역은 시간 t 에서의 저항 R 과 커패시턴스 C 성분을 구하는데 이용될 수 있다. 그리고 저항과 커패시턴스의 결과물인 각 성분의 시상수(time constant)는 R 과 C 로부터 또한 계산($t=R \times C$)될 수 있다.

한편, 콘크리트 내 철근의 부식은 <그림 8>에 나타난 하나의 저항/커패시턴스(resistance/capacitance)를 갖는 단순한 모델보다는 <그림 11>과 같이 복잡한 등가회로 모델을 적용하는 것이 더욱 실질적일 것이다. 그러나 정전류 펄스결과로부터 그림 11의 모델에 기초하여 분리된 각 저항성분들은 철근콘크리트 내에서 일어나는 여러 가지 현상들, 즉 부식과정뿐 아니라 콘크리트내 이온의 확산효과나 철근표면의 필름(dielectric film) 효과와 같은 부식과 관계없는 성분들도 함께 포함되어 있음에 주의해야 한다. 때문에 내부철근의 부식율을 보다 정확히 평가하기 위해서는 분리된 각 성분들로부터 부식에 관계없는 성분들을 구별하여 부식과정과 관련된 저항성분들만으로 분극저항 R_p 를 평가해야할 것이다. 일반적으로 측정된 커패시턴스의 값은 교류 임피던스법에서와 같이 부식에 관련된 저항성분들을 구별하는데 이용된다.

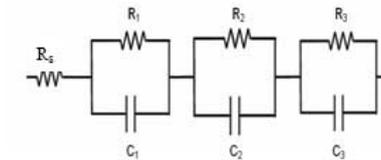
따라서 내부철근의 분극저항 R_p 는 피복콘크리트의 저항 R_s 를 제거하고 부식전위 변화곡선으로부터 분석 및 추출된 부식에 관련된 저항성분들만(R_1, R_2, \dots etc)을 합산하여 산출되며, 철근의 부식율(CR)는 선형분극저항법에서와 같이 분극저항 R_p 로부터 식(2)~(5)에 의해 결정된다.



<그림9> Galvanostatic pulse measurements



<그림10> Plot of $\ln(V_{max}-V_t)$ against time



<그림11> Complex equivalent circuit

그러나 선형분극저항법에서와 같이 정전류 펄스법에서도 V_{max} 이 최종 안정된 상태에 도달되는 데 필요한 적절한 시간(t : delay time)에서 측정되어야 정확한 결과를 얻을 수 있다. 만일, V_{max} 이 안정된 상태에 도달되기 전에 측정된다면, R_p 와 C_{dl} 의 평가에 심각한 오차를 야기할 것이다.

4. 전기화학적 방법을 이용한 철근 부식율의 정량적 평가와 신뢰성

4.1 3종류의 전기화학적 방법에 의한 철근 부식율의 정량적 평가

1) 실험

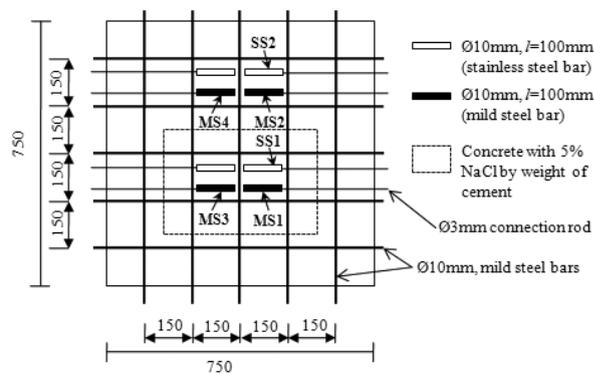
3종류의 전기화학적 방법(분극저항법, 교류 임피던스법 및 정전류 펄스법)을 이용한 콘크리트 내 철근의 부식율 측정은 해양환경에 약 7년간 폭로된 $750 \times 750 \times 100$ mm의 철근콘크리트 슬래브를 대상으로 수행되었으며, 그 상세는 그림 12과 같다. 본 연구에서는 전기화학적 수법에 의한 내부철근의 부식율 측정에서 공통적인 어려움 중 하나인 전류가 인가된 보강철근 표면적의 정확한 계산을 위해 다른 철근들로부터 전기적으로 독립 배근된 지름 10mm, 길이 100mm인 보강철근을 대상으로 측정하였다. 이때 측정된 보강철근의 표면적은 모두 31.42cm^2 였으며 그림 12에 나타난 바와 같이 MS₁~MS₄, 그리고 SS₁, SS₂로 각각 명명되었다. 콘크리트의 배합강도는 40 N/mm^2 였고, 피복두께는 25mm였다. 콘크리트의 배합은 표 5에 나타내었다. 측정된 철근에서 MS₁, MS₃ 그리고 SS₁은 콘크리트 배합시 5%의 NaCl(사용 시멘트의 중량비)을 첨가하여 부식 촉진되었다. 사용된 시멘트는 보통 포틀랜드시멘트였다.

〈표5〉 Mix of concrete³⁾

W/C	s/a (%)	단위중량 (kg/m ³)				AE제 (C×weight%)
		W	C	S	G	
0.55	45	194	353	762	956	0.65

철근콘크리트 슬래브 내 철근의 부식율은 그림 5에 나타난 3전극 방법을 이용하여 측정되었다. 그림 5와 같이 직류(DC) 또는 교류(AC) 전류는 콘크리트 표면에 설치된 보조전극(150×100mm)을 통해 내부철근(작용전극)에 인가되고 이에 따라 야기된 철근의 전위변화(response)는 보조전극의 중앙에 장치된 기준전극(Ag/AgCl cell)에 의해 측정된다. 각 측정기술들의 상세한 방법은 제3장에 나타난 바와 같다. 다만, 선형분극저항법에서 분극저항 R_p 는 $\pm 10mV$ 의 전위(ΔE)를 30초간 인가한 후 응답된 전류, ΔI 를 측정하여 결정되었고, 교류임피던스법에서 10 kHz~10 mHz 범위의 교류(AC)전압이 사용되었다. 또한 정전류 펄스법에서 0.01mA의 전류(I_{app})는 보강철근에 인가되고 그 전위응답(V_t)은 16비트 데이터 에퀴지션(acquisition) 장비를 이용하여 측정되었다. 측정시간은 5초에서 180초(부동태철근의 경우 300초)까지 변화되었으며 시간에 따라 변화되는 일시적인 응답전위는 1 kHz의 샘플링 비율로 얻어졌다. 기존연구^{6),14)}에 따르면, 이 샘플링 비율은 작은 시상수(time constant)를 갖는 성분의 분석도 가능한 것으로 보고되어 있다.

이상의 전기화학적 방법으로부터 측정된 분극저항, R_p 는 식(2)~(5)에 의해 부식전류밀도(i_{corr})와 부식율(CR)로 각각 나타내어졌다.



〈그림12〉 Details of the test¹³⁾

2) 철근의 부식율 측정 결과

일반적으로 콘크리트 내에서 발생하는 철근의 부식은 전기화학적 과정이다. 만일, 내부철근에 전기화학 부식이 발생된다면, 그 부위에 부식전지(corrosion cell)가 형성되며 양극(anode)과 음극(cathode)사이에서 흐르는 전류로 인하여 전극전위(potential)의 변화가 발생된다. 이러한 변화를 분극(polarization)이라하며, 분극은 부식율에 큰 영향을 준다. 만일, 분극저항(R_p)을 알고 있다면, 식(2)~(5)에 나타난 바와 같이 부식전류(I_{corr})나 부식전류밀도(i_{corr})를 계산할 수 있으며, 또한 패러데이(Faraday's)법칙을 이용하여 식(2)을 이용하여 부식율로 나타낼 수 있다. (표 4 참조) 그러나 전기화학 부식과정에서 부식전류(corrosion current)는 내부철근 표면에 수없이 퍼져있는 작은 양극과 음극사이를 흐르는 전류이므로 이를 직접 측정하기는 매우 어렵다. 때문에 3장에 기술한 바와 같이 부식전류(I_{corr})는 콘크리트 표면에서 불활성전극(Half-cell)과 외부 전기회로를 이용하여 내부철근에 음극 또는 양극반응을 부과(전류나 전위의 인가)하여 분극저항(polarization resistance)을 측정함으로써 산출한다.

〈표 6~8〉에서 보는 바와 같이 선형분극저항법으로 측정된 내부철근의 분극저항(R_p)은 특히 부식철근 MS1~MS4에서 교류 임피던스법이나 정전류 펄스법에 비해 약 2배 정도 높게 평가되었다. 이는 선형분극저항법에 의해 측정된 분극저항(R_p) 값에 부식과 관계없는 저항성분들이 포함됨으로서 나타난 결과로 판단되어졌다. 비록 분극저항, R_p 가 피복콘크리트의 저항, R_s 를 공제하여 결정되었다 하더라도, 〈표 9〉의 결과는 부식경계면에서 측정된 분극저항 값에 부식에 관련된 저항뿐 아니라 콘크리트 내 이온의 확산저항이나 철근표면의 필름효과(dielectric film) 등 부식과 관계없는 저항성분들도 함께 포함될 수 있음을 잘 보여준다. 〈표 9〉는 측정된 분극저항 R_p 에서 부식에 관계없는 저항성분들을 구별하기 위해 콘크리트 표면에 장치한 기준전극(보조전극 중앙에 설치됨)과 내부철근사이의 측면이격거리를 증가시키면서 실시된 정전류 펄스실험 결과를 나타낸 것이다. 만일, 내부철근으로부터의 측면이격거리가 증가되면, 기준전극과 내부철근사이의 콘크리트양이 많아지기 때문에 콘크리트내의 부식에 관계없는 저항성분은 측면이격거리의 증가에 따라 증가될 것이고, 반면 부식과 관련된 성분들은 상대적으로 일정하게 남을 것이다. 〈표 9〉에서 알 수 있듯이 부식철근 MS1의 저항 R_1 성분은 측면이격거리가 증가함에 따라 증가되고 있는 반면 R_2 , R_3 및 R_4 는 측면이격거리 관계없이 상대적으로 변화가 없었다. 이는 R_1 성분이 부식과 관계없는 저항성분(콘크리트 내 이온의

확산저항 등)임을 나타내며, 분극저항 R_p 로부터 반드시 공제되어야 할 것으로 판단된다. 그리고 이들 R_i 성분의 커패시턴스 값은 모두 $1,000 \mu F/cm^2$ 이상으로 높게 나타났다. 실질적으로 표 8에서 알 수 있듯이 MS1과 MS3에서 $R_1 \sim R_4$ 성분 모두를 분극저항 R_p 의 값에 합산 한다면, $22.5 k\Omega \cdot cm^2$ (MS1)와 $27.5 k\Omega \cdot cm^2$ (MS3)로서 표 6의 선형분극저항법에 의해 측정된 R_p 의 값과 유사했다.

교류 임피던스법과 정전류 펄스법은 <표 7, 8>에서 볼 수 있듯이 내부철근의 분극저항을 개별 성분으로 분리할 수 있으며, 그림 13 및 14과 같이 등가의 전기회로 모델에 기초하여 각 성분을 나타낼 수 있다. 표 7에서 $1 \sim 100 \mu F/cm^2$ 의 커패시턴스(C) 값은 교류(AC)임피던스의 응답으로부터 부식에 기인된 저항성분을 구별하는데 이용되었으며, 분극저항 측정결과는 정전류 펄스법에 의한 결과와 유사하거나 약간 높게 나타났다. 그러나 <그림 13-b>에서 볼 수 있듯이 부식율이 낮거나 부동태 철근의 경우 완전한 $Z'-Z''$ 그래프를 얻는데 수 시간이 소요되었으며, 특히 $Z'-Z''$ 그래프를 분석하기가 어렵거나 거의 불가능했다.

<표 8>과 <그림 14>는 정전류 펄스법에 의해 측정된 각 내부철근의 분극저항 결과로서, $0.01mA$ 의 전류(I_{app})를 30초 동안 인가하여 응답된 전위(V_t)의 분석으로부터 분극저항, R_p 는 개별 성분으로 각각 분리되었다. <표 8>에서 $1 \sim 1,000 \mu F/cm^2$ 의 커패시턴스(C) 값은 부식에 기인된 저항성분을 구별하는데 이용되었다. 즉 분극저항 R_p 는 $1 \sim 1,000 \mu F/cm^2$ 의 커패시턴스를 갖는 각 저항성분들의 합산에 의해 산출되었다.

<표6> Results of corrosion measurement using LPR method (30s pulse)¹³⁾

구 분	R_s ($k\Omega \cdot cm^2$)	$R_p / R_{p-uncom}^*$ ($k\Omega \cdot cm^2$)	i_{corr} , ($\mu A/cm^2$)
MS1	22.8	27.1 / 49.9	0.92
MS2	59.5	97.8 / 157.3	0.26
MS3	23.1	28.8 / 51.9	0.87
MS4	60.8	106 / 166.8	0.24
SS1	22.8	2292 / 2315	0.011
SS2	64.3	3225 / 3289	0.008

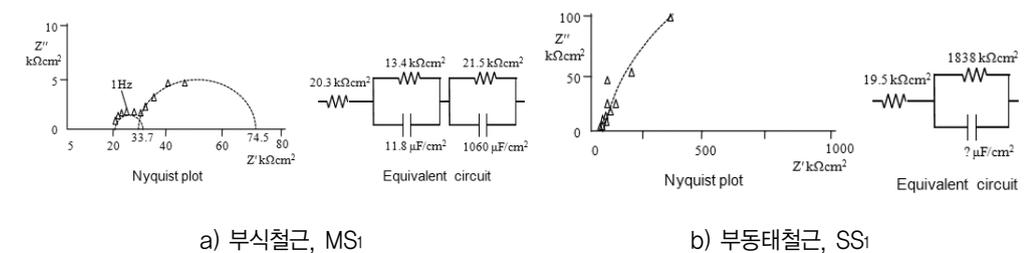
* $R_{p-uncom}$: R_p 에서 피복콘크리트의 저항 R_s 를 공제하지 않은 값

<표7> Results of corrosion measurement using AC impedance¹³⁾

구 분	R_s ($k\Omega \cdot cm^2$)	R_p , $k\Omega \cdot cm^2$ (Cdl, $\mu F/cm^2$)		i_{corr}^{**} ($\mu A/cm^2$)
		$R_1(C_1)$	$R_2(C_2)$	
MS1	20.3	13.4(11.8)	21.5(1060)	1.86
MS2	45.4	56.0(50.3)	93.8(632)	0.44
MS3	20.3	13.7(9.2)	23.8(1330)	1.83
MS4	50.0	48.5(62.1)	134(585)	0.51
SS1	19.5	1838(C=?)	-	0.014
SS2	38.3	3329(C=?)	-	0.008

* Resistances in bold is thought to be directly associated with corrosion

** i_{corr} : 부식에 관련된 저항성분, ΔR_p 로부터 계산된 부식전류밀도



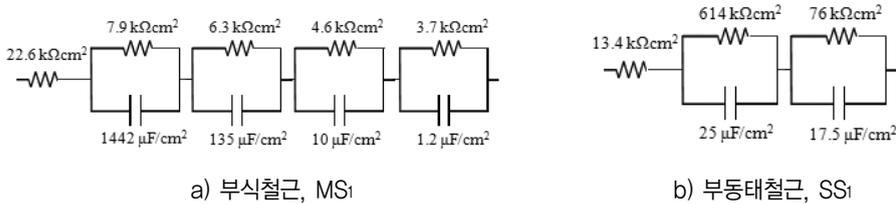
<그림13> AC impedance results and equivalent electrical circuit¹³⁾

〈표8〉 Results of corrosion measurement using Galvanostatic pulse transient technique (30s pulse, 0.01mA)¹³⁾

구분	Rs (%)	Rp, kΩ · cm ² (Cdl, μF/cm ²)				icorr** (C×weight%)
		W	C	S	G	
MS1	22.6	7.9 (1442)	6.3 (135)	4.6 (10)	3.7 (1.2)	1.71
MS2	39.6	30 (842)	19.6 (317)	6.9 (24)	6.2 (3.3)	0.40
MS3	14.8	12.3 (1010)	7.2 (346)	6.0 (36)	2.0 (12)	1.64
MS4	48.4	23.6 (554)	7.5 (210)	7.2 (18)	6.2 (3.0)	0.56
SS1	13.4	614 (25)	76 (17.5)	-	-	0.036
SS2	47.9	771 (20)	146 (15.3)	-	-	0.027

* Resistances in bold is thought to be directly associated with corrosion

** icorr: 부식에 관련된 저항성분, 1/Rp로부터 계산된 부식전류밀도



〈그림14〉 Galvanostatic pulse transient results results and equivalent electrical circuit¹³⁾

〈표9〉 Galvanostatic pulse transient results at different lateral distances (90s pulse, 0.01mA)¹³⁾

a) 부식철근, MS1

저항, kΩ · cm ²	측면이격거리 (mm)			
	0	100	200	400
Rs	22.3	30.8	31.8	34.6
R1 (C1, μF/cm ²)	14.5(2080)	16.7(1844)	17.8(1778)	18.1(1738)
R2 (C2, μF/cm ²)	9.3(576)	8.5(776)	7.0(1081)	7.0(943)
R3 (C3, μF/cm ²)	3.5(148)	4.1(129)	3.8(160)	3.3(197)
R4 (C4, μF/cm ²)	3.9(20)	3.6(16)	3.3(14)	4.0(16)

* Resistances in bold is thought to be directly associated with corrosion

b) 부동태철근, SS1

저항, kΩ · cm ²	측면이격거리 (mm)			
	0	100	200	400
Rs	10.5	15.3	20.8	35.2
R1 (C1, μF/cm ²)	694(22)	717(20)	635(25)	652(30)
R2 (C2, μF/cm ²)	128(37)	88(40)	107(28)	62(48)
R3 (C3, μF/cm ²)	-	27(11)	-	38(15)

* Resistances in bold is thought to be directly associated with corrosion

3) 3종류의 전기화학적 방법에 의해 평가된 철근의 부식율 측정결과의 비교

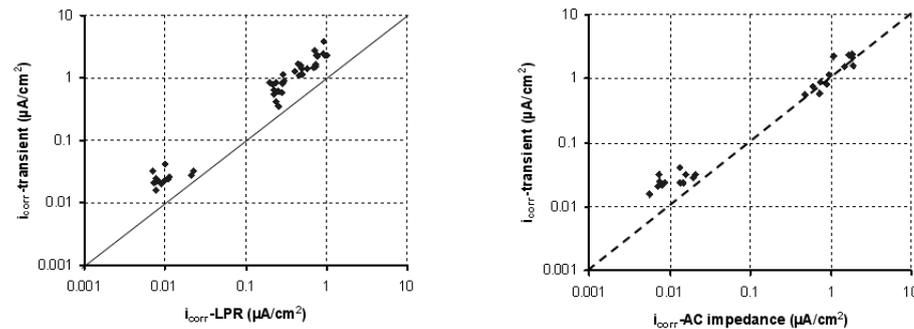
〈표 10〉과 〈그림 15〉는 해양환경에 폭로된 철근콘크리트 슬래브의 내부철근을 대상으로 선형분극저항법(LPR), 교류 임피던스법(AC impedance), 정전류 펄스법(transient)에 의해 측정된 부식율 평가결과를 비교하여 나타낸 것이다¹³⁾. 〈표 10〉과 〈그림 15〉에서 알 수 있듯이 교류 임피던스법과 정전류 펄스법의 측정결과는 매우 유사하게 나타났으며, 이들 방법들에 비해 선형분극저항법에 의한 결과는 약간 과소평가 되었지만, 각종 측정기술에 따른 평가결과의 편차는 2.0배 이내로서 크지 않았다.

정전류 펄스법은 선형분극저항법과는 달리 분극저항 Rp를 개별 성분으로 분리할 수 있어 결과의 정확성을 향상시킬 수 있다는 장점을 갖고 있으며 특히 결과를 얻는데 40분 이상(부식철근의 경우) 장시간이 소모되는 교류 임피던스법과는 달리 부식상태에 관계없이 30초 이내에 측정이 가능한 것으로 평가됨에 따라 현장 측정기술로서 크게 주목되어 진다.

한편, 이들 철근 부식율의 정량적 측정결과는 철근콘크리트구조물의 내구연한 예측, 내구설계, 효과적인 보수 및 보강전략 수립 등을 위한 기술적 자료로서 매우 유용하게 활용될 것이다.

〈표10〉 Comparison corrosion rates caculated from three different techniques¹³⁾

구분	부식율 (CR; corrosion rate), $\mu\text{m} / \text{year}$			부식상태
	선형분극저항법	교류임피던스법	정전류 펄스법	
MS1	10.7	21.6	19.8	높음
MS2	3.0	8.5	4.6	낮음/중간
MS3	10.1	21.2	19.0	높음
MS4	2.8	8.5	6.5	낮음/중간
SS1	0.13	0.16	0.42	부동태
SS2	0.09	0.09	0.31	부동태



〈그림15〉 Comparison of corrosion rate (i_{corr}) by means of LPR, AC impedance and Galvanostatic pulse (transient) measurements¹³⁾

4) 측정시간(measurement time)이 내부철근의 부식율 측정에 미치는 영향

내부철근의 부식평가를 위한 많은 전기화학적 방법에서 부식전위(E_{corr})의 안정화를 위해 필요한 적절한 측정시간(measurement time)의 선택과 적용은 실질적인 어려움 중 하나이다. 일반적으로 부식전위의 안정화를 위해 필요한 시간(t)은 철근의 부식상태에 크게 의존한다.

〈표 11〉은 부식철근 MS₁과 부동태철근 SS₁을 대상으로 측정시간을 달리하여 측정된 정전류 펄스 실험결과를 나타낸 것이다¹³⁾. 〈표 11〉에서 알 수 있는 바와 같이 부식철근 MS₁의 분극저항 ΣR_p 는 측정시간의 증가에 따라 큰 변화가 없었다. 이는 부식과정에서 빠른 시상수(time constant)를 갖는, 즉 수초 내에 부식전위의 안정화가 이루어지는 부식철근의 경우, 측정시간이 부식율 평가에 미치는

영향이 크지 않음을 보여준다. 그러나 부식철근(corroding steel)의 경우, 측정시간이 30초 이상으로 길어짐에 따라 1,000 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ 이상의 높은 커패시턴스를 갖는 저항성분이 포함됨에 유의할 필요가 있다.

〈표11〉 Influences of measurement time for the evaluation of corrosion rate(0.01mA).¹³⁾

a) 부식철근, MS₁

측정시간	$R_s, \text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$	$R_p, \text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ (Cdl, $\mu\text{F}/\text{cm}^2$)				$\Sigma R_p^{**}, \text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$
		R1 (C1)	R2 (C2)	R3 (C3)	R4 (C4)	
5s	14.9	9.1 (224)	6.2 (35)	2.4 (6.3)	—	17.7
10s	14.9	10.8 (372)	5.8 (78)	3.6 (12.7)	—	20.2
30s	14.9	13.4 (1120)	6.3 (258)	4.8 (34.1)	2.5 (6.5)	13.6
60s	14.9	15.4 (1418)	6.3 (497)	5.0 (61.9)	3.2 (14.1)	14.5
90s	14.9	15.4 (2113)	7.8 (587)	5.1 (80.7)	3.8 (3.9)	16.7
180s	14.9	23.0 (3975)	11.8 (790)	5.6 (100)	4.3 (14.5)	21.7

* Resistances in bold is thought to be directly associated with corrosion

** ΣR_p : 부식에 관련된 저항성분으로 고려된, 즉 커패시턴스의 값 1~1,000 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ 를 갖는 저항성분들의 합산 값

b) 부동태철근, SS₁

측정시간	$R_s, \text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$	$R_p, \text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ (Cdl, $\mu\text{F}/\text{cm}^2$)				$\Sigma R_p^{**}, \text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$
		R1 (C1)	R2 (C2)	R3 (C3)	R4 (C4)	
5s	11.7	159 (18)	41 (12)	—	—	200
10s	11.7	259 (23)	63 (24)	—	—	322
30s	11.7	544 (31)	115 (38)	—	—	659
60s	11.7	786 (36)	122 (60)	—	—	908
90s	11.7	897 (38)	89 (96)	—	—	986
180s	11.7	991 (39)	30 (70)	18 (28)	9 (8.1)	1048
300s	11.7	1016 (40)	—	39 (17)	14 (2.9)	1069

* Resistances in bold is thought to be directly associated with corrosion

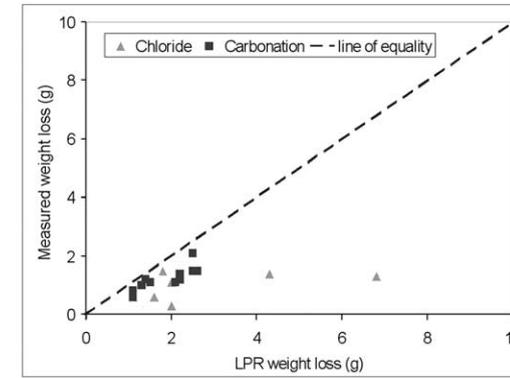
** ΣR_p : 부식에 관련된 저항성분으로 고려된, 즉 커패시턴스의 값 1~1,000 $\mu A/cm^2$ 를 갖는 저항성분들의 합산 값

〈표 11-a〉에서도 알 수 있듯이 이 저항성분은 부식에 관련된 성분이기보다는 피복 콘크리트 내 이온의 확산저항에 기인된 성분(보통 낮은 시상수를 갖음)으로서 부식율 평가의 정확성을 위해 ΣR_p 에서 반드시 공제되어야 한다. 일반적으로 선형분극저항법(LPR method)에서 30초의 측정시간은 종종 선택 및 적용되어진다. 따라서 선형분극저항법을 이용한 철근의 부식율 평가시 측정된 분극저항 값에 부식과 관계없는 저항성분들이 포함되어질 수 있음에 주의할 필요가 있다.

한편, 부동태철근 SSi은 부식철근과는 다른 양상으로 나타났다. 〈표 11〉에서 보는 바와 같이 부동태철근 SSi의 분극저항 ΣR_p 값은 측정시간의 증가에 따라 크게 증가하고 있으며, 측정시간에 따른 ΣR_p 값의 변화를 살펴보면, 30초의 ΣR_p 값(부식전위가 안정화에 도달되었을 것으로 기대됨)을 기준으로 30초에서 61%, 60초에서 85%, 90초에서 92%, 180초에서 98%의 ΣR_p 값을 각각 나타내었다. 이로부터 낮은 시상수를 갖는 낮은 부식율 혹은 부동태철근의 경우, 측정시간이 부식율 측정에 미치는 영향이 매우 큼을 알 수 있었다. 또한 측정시간에 따른 ΣR_p 값의 변화에 기초해 볼 때, 부동태철근의 부식율을 보다 정확히 평가하기 위해서는 부식상태에 의존하지만, 60s 혹은 그 이상의 측정시간이 필요함을 알 수 있었다. 그러나 선형분극저항법과 정전류 펄스법을 이용한 내부철근의 부식율 측정에서 부식철근과 부동태철근으로부터 기대되는 시상수의 가능한 모든 범위를 고려해 볼 때, 최적의 측정시간은 30초인 것으로 고려된다.

4.2 선형분극저항법(LPR method)에 의한 부식율 측정결과의 정확성

〈그림 16〉은 부식발생 원인을 달리하여, 즉 염화물이온과 콘크리트의 중성화에 의해 각각 부식측진 실험된 시편을 대상으로 선형분극저항법(LPR method)과 무게감량법(gravimetric method)에 의해 내부철근의 부식율을 측정된 결과이다.¹⁴⁾



〈그림16〉 Ratio of measured to LPR weight loss¹⁴⁾

〈그림 16〉에서 볼 수 있듯이 선형분극저항법에 의한 부식율 측정결과는 염화물이온에 의한 부식의 경우 보다 콘크리트의 중성화에 의한 부식의 경우 더욱 정확했으며, 전반적으로 실제 측정된 무게감소량(무게감량법)에 비해 다소 과대평가되는 것으로 나타났다. 그러나 염화물이온에 의한 부식의 경우, 선형분극저항법에 의해 측정된 결과는 실제 측정된 중량감소량에 비해 1.8배에서 7배까지 과대평가되었으며, 이는 중성화에 기인된 부식과는 달리 국부적으로 발생하는 염화물이온에 의한 부식특성에서 그 원인을 찾아볼 수 있다.

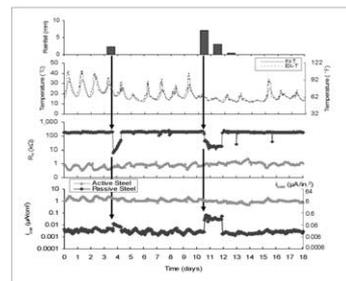
4.3 환경적 변수들이 철근의 부식율 평가에 미치는 영향

콘크리트 내 철근의 부식은 철근 주변의 다양한 환경적 요소들에 의해 영향을 받는 동적(dynamic)인 과정이다. 때문에 철근콘크리트구조물에서 전기화학적 방법에 의한 내부철근의 부식율 측정은 측정당시의 여러 환경적 인자들에 의해 크게 영향을 받을 것이다. 〈그림 17, 18〉은 해양환경에 약 12년간 폭로된 철근콘크리트 슬래브 내 철근의 부식율을 선형분극저항법에 의해 6개월간 매 1시간 간격으로 측정된 결과이며, 동시에 측정된 온도 및 상대습도, 강우량 등의 주변 환경인자의 측정결과와 함께 비교하여 나타낸 것이다.¹⁵⁾

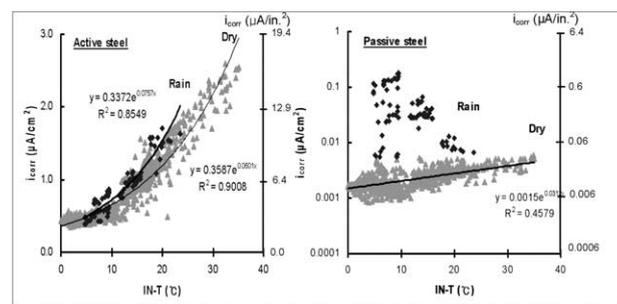
〈그림 17〉로부터 철근의 부식율(icorr)은 콘크리트의 저항(R_s)과 반비례관계로서 강우량(rainfall)에 의해 크게 영향을 받을 수 있으며, 그 영향은 부식철근보다 부동태 철근에서 큼을 알 수 있다. 콘크리트 내 습기의 함량은 내부철근의 부식율, icorr을 조절하는 주요 인자이며, 습기의 함량은 강

수량과 온도의 변화에 의해 조절될 것이다.

〈그림 18〉은 내부철근 주변의 온도가 내부철근의 부식율(i_{corr})에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 콘크리트 내부 온도 T 에 따른 내부철근 부식율의 관계는 온도의 증가에 따라 지수곡선으로 증가되고 있으며, 부동태 철근 보다 부식철근에서 더욱 명확한 관련성을 나타내었다. 내부철근의 부식율은 부식철근의 경우 계절의 변화에 따른 온도의 증가($-1^{\circ}\text{C}\sim 38^{\circ}\text{C}$)에 따라 약 5~6배까지 증가되었다. 또한 강우량(rainfall)은 내부철근의 부식율을 부가적으로 증가시키는 변수였다. 이는 전기화학적 방법에 의한 현장 철근콘크리트 구조물의 부식 측정결과가 주변 환경적 변수(온도나 강우량(rainfall) 등)에 의해 크게 과대 혹은 저평가될 수 있음을 잘 보여준다.



〈그림17〉 Influence of rainfall on R_s and corrosion rate. (LPR measurements)¹⁵⁾



〈그림18〉 Influence of temperature and rainfall on corrosion rate. (LPR Measurements)¹⁵⁾

5. 결론

철근콘크리트구조물 내부에서 보이지 않게 일어나는 내부철근의 부식을 보다 초기단계에서 정확하게

정량적으로 파악할 수 있다면, 관리자는 가장 경제적이고 효율적인 보수 및 보강전략을 수립할 수 있으며, 유지관리비용을 크게 절약할 수 있을 것이다.

이상에서 살펴본 바와 같이 전기화학적 방법은 철근콘크리트구조물 내 철근의 부식상태나 부식율을 정량적으로 평가할 수 있는 비파괴 방법으로서, 적은 부식양도 비교적 정확하게 파악할 수 있는 매우 유용한 기술임을 알 수 있다. 그러나 이들 전기화학적 방법들을 보다 적극적으로 이용하기 위해서는 결과의 해석이나 환경적 영향, 측정방법 자체의 문제점 등과 같은 많은 어려움과 문제들이 해결되어야 하는 것 또한 사실이다.

현재 많은 전기화학적 방법들이 이용 및 개발되고 있지만, 현장 실무자들의 이해 부족이나 제약사항 등으로부터 아직까지 대부분 현장 측정기술로써 확대 적용되지 못하고 있는 실정이다. 본 원고가 관련분야의 연구자나 현장 실무자들에게 전기화학적 방법을 보다 이해시키는데 조금이나마 도움이 되기를 바란다.

6. 참고문헌

- 1) Elsener, B. and Bohni, H., "Potential mapping and corrosion of steel in concrete," ASTM SP 1065, N.S. Berke et al., ed., ASTM: Philadelphia, pp.143-156,1990.
- 2) American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete": C876-91, ASTM: Philadelphia, PA,1991.
- 3) Gowers, K.R and Millard, S.G., "Measurement of Concrete Resistivity for Assessment of Corrosion Severity of Steel Using Wenner Technique", ACI Materials Journal, V. 96, N. 5, 1999, pp.536-541.
- 4) Law D.L, Cairns J, Millard S.G & Bungey J.H, "Measurement of loss of steel from reinforcing bars in concrete using linear polarization resistance measurements", NDT & E International, 2004, V.37, pp.381-388.
- 5) Gowers KR & Millard SG, Electrochemical techniques for corrosion assessment of reinforced concrete structures, Proc. Inst. Civil Engineers, Structs & Bldgs, 1999, V.134, p.129-137.

- 6) Newton, C. J., and Sykes, J. M., "A galvanostatic pulse technique for investigation of steel corrosion in concrete," *Corrosion Science*, 1988, V.28, N.11, pp.1051-1073.
- 7) Hans Bohni, "Corrosion in reinforced concrete structures", Woodhead publishing limited, Cambridge England, 2005, pp.4-5.
- 8) Stratful, R. L., "Highway research record," V.433, p.12, 1973.
- 9) Stern M and Geary A.L, Electrochemical polarization: I. Theoretical analysis of the shape of polarization curves, *Journal Electrochemical Society*, 1957, V.104, N.1, 56-63.
- 10) Building Research Establishment, "Corrosion of steel in concrete: Investigation and assessment", Digest 444, Part 2, BRE, Garston, 2001.
- 11) Law D.L, Millard S.G and Bungey J.H, "Linear polarization resistance measurements using a potentiostatically controlled guard-ring", *NDT & E International*, V.33, pp.15-21, 2000.
- 12) Randles JEB, "Kinetics of rapid electrode reactions", *Discussion of the Faraday Society*, 1947, V.1, N.1, pp.11-19.
- 13) 소형석, "보강철근의 부식율 측정을 위한 전기화학적 방법의 이용," 대한건축학회 논문집 구조계, V.24, N.3, pp.111-118, 2008.
- 14) Law D.L, Cairns J, Millard S.G & Bungey J.H, "Measurement of loss of steel from reinforcing bars in concrete using linear polarization resistance measurements", *NDT & E International*, 2004, V.37, pp.381-388.
- 15) So H.S, Millard S.G, "On-site measurements on corrosion rate of steel in reinforced concrete", *ACI Materials Journal*, V.104, N.6, pp.638-642. 