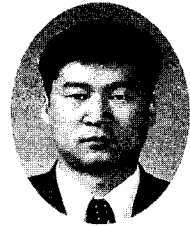


# 특 집

유지 관리 모니터링 최신 기술

## 콘크리트 구조물의 철근 부식 모니터링 기술

- Monitoring Technologies for Corrosion of Reinforcing bar in Concrete Structures -



김성수\*

### 1. 서 론

일반적으로 콘크리트의 공극 중 수분은 포화 수산화칼슘 용액과 이것에 약간의 수산화나트륨과 수산화칼륨을 포함하는 용액으로서 존재하고 있으며, 세공 용액의 pH는 12~13.5 정도이다. 이러한 강한 알칼리성 환경 하에서는 철은 그 표면에 부동태 피막이라고 불리는 두께 20~60 Å의 얇은 산화 피막( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ )을 형성하여 부동태화하고 있기 때문에 철은 부식 작용으로부터 보호되고 있다.<sup>1)</sup>

그러나, 콘크리트 속의 철근 표면에 존재하는 부동태 피막은 덮개 콘크리트의 중성화의 진행, 염화물의 침투 확산, 알칼리 골재 반응 및 콘크리트의 화학적 침식 등에 의하여 파괴되고 철근은 활성태로 되어 부식하기 쉽게 된다. 철근의 부식이 시작되면 철근 표면에 산화철이 형성되며, 부식의 산물인 녹은 철 부피의 2.5배 정도가 된다<sup>2)</sup>고 알려져 있다. 그러나, 이러한

부식 반응은 철근의 표면에서 진행되므로 육안으로는 관찰이 불가능하고 부식이 상당히 진행하여 부식 생성물의 부피 증가로 인하여 발생된 인장 응력에 기인한 균열이 발생한 후에야 인지가 가능하다. 따라서, 콘크리트의 균열, 표층의 박리, 녹물 등이 확인될 경우에는 철근의 부식이 상당히 진행된 상태를 의미한다. 이미 철근의 부식이 진행된 경우는 보수나 보강이 쉽지가 않으므로 철근 콘크리트 구조물의 유지 관리를 수행함에 있어 초기에 철근 부식의 징후를 감지하여 대책을 수립하는 것이 무엇보다도 중요하다고 할 수 있다.

한편, 철근 콘크리트 구조물 중의 철근 부식을 확인하는 방법은 덮개 콘크리트를 제거하여 철근을 노출시켜 직접 육안으로 관찰하는 쏘아내기 조사와 콘크리트의 균열, 표면층의 박리를 검출하는 물리적 방법으로 타진법, 반발법, 적외선 시험, 초음파 탐상 시험, 방사선 투과 시험 등이 있으며, 이외에 철근의 부식이 전기화학적인 반응인 점에 착안하여 개발된 전기화학적 기법 등이 있다.

본고에서는 콘크리트 구조물 중의 철근 부식 모니

\* 대전대학교 토목공학과 교수

터링 기술에 관하여 국내외에 적용되고 있는 전기화학적 기법 등을 중심으로 측정 원리와 적용 사례를 소개하여 콘크리트 구조물의 유지 관리를 담당하는 엔지니어와 관련 분야 종사자들의 이해를 돕고자 하였다

## 2. 철근의 전기화학적 부식 메커니즘

부식의 전기화학적 정의(electrochemical definition)는 금속이 전기화학 반응에 의하여 전자를 잃고 양이온으로 되는 현상이다. 이러한 전기화학 반응은 산화 반응(anodic reaction)과 환원 반응(cathodic reaction)으로 구성된다. 금속의 산화 반응은 보통 식 (1)과 같은 일반적인 형태를 취하며 전자를 생산하는 일을 한다. 한편, 환원 반응은 전자를 소비하는 일을 한다. 이들 반응은 양극에서 산화 반응이 일어나면서 금속 이온이 분해되어 용액 속으로 녹아나며 음극에서는 전자를 소비하면서 양극의 산화 반응을 돕게 되며, 산화와 환원 반응은 항상 동시에 일어나게 된다.<sup>3)</sup>

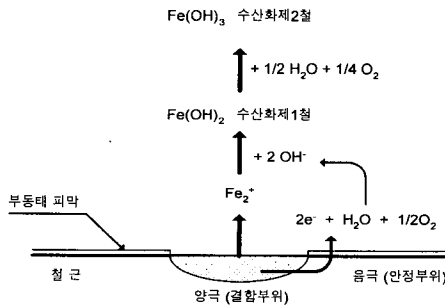


그림 1. 철근의 부식 반응 메커니즘

콘크리트 중의 철근 부식 역시 전기화학적 반응에 의해서 일어나며, 콘크리트에 묻힌 철근의 부식계는 전기화학적 산화(oxidation)가 일어나는 양극(anode :  $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ )과 전기화학적 환원(deoxidation)이 일어나는 음극(cathode :  $2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$ ), 전기전도체, 그리고 전해질로써 콘

크리트 중의 시멘트 페이스트 공극 용액으로 구성된다.<sup>4)</sup>

양극(anode)에서 방출된 전자들은 철근을 통해 음극(cathode) 지역으로 (그림 1)과 같이 이동하고 그곳에서 음극 반응에 의해 소비된다. 철근의 부식 반응은 양극과 음극의 반응을 조합한 반응으로 수산화 제1철( $\text{Fe(OH)}_2$ )이 철근 표면에 생성된다.

## 3. 철근 부식 모니터링을 위한 전기화학적 기법의 종류와 특징

콘크리트 중의 철근 부식 상태를 확인하는 방법으로는 서론에서 언급한 바와 같이 육안 관찰과 물리적 방법 등은 철근의 부식이 어느 정도 진행된 상태에서 효과적이지만 전기화학적 기법은 비교적 초기 단계에서 부식 여부를 판정할 수 있는 이점이 있다.

주로 사용되는 방법으로는 전위측정법, 전기저항법, 분극저항법, AC임피던스법 등이 있으나 지금까지의 연구 성과로는 각각의 기법들이 장단점을 지니고 있으며, 간단하고 정밀도가 높은 방법은 확립되어 있지 않다고 한다. <표 1>에 철근 부식 평가와 관련된 전기화학적 측정 기법을 정리<sup>5)</sup>하여 나타내었다.

### 3.1 전위측정법

자연 전위란 금속이 존재하는 환경 속에서 유지하고 있는 전위를 말하며, 부식의 양극 및 음극 반응에 의한 전위의 분극으로부터 결정된다. 자연 전위는 환경이나 철근의 상황에 따라 변화하며, 전위측정법은 기본적으로 이러한 전위의 변화로부터 철근의 부식 여

표 1. 전기화학적 측정 기법의 종류와 특징

구 분	측 정 내 용	적용성*		비 고
		실 내	현 장	
전위 측정법	자연전위법	◎	◎	정성적
	표면전위차법	◎	◎	정성적
비저항법	콘크리트의 비저항 측정으로 콘크리트의 부식성 환경을 평가	○	◎	반정량적
분극저항법	미소 직류를 인가하여 분극 저항을 측정	◎	○	정량적
AC임피던스법	주파수가 다른 미소 교류를 인가하여 임피던스 특성을 평가	○	△	정량적
전기화학적 노이즈법	전위 변동 스펙트럼 해석		×	반정량적
마이크로셀전류측정법	부식 전류의 직접 측정	◎	◎	정량적

\* 적용성의 평가 : 높다(◎), 중간(○), 낮다(△), 매우 낮다(×)

표 2 각종 조합 전극

조합 전극	전해액	전위(V. SHE, 25°C)	CSE 기준으로 환산(V)
포화황산구리(CSE)	포화 CuSO <sub>4</sub>	+0.316	-
포화카로멜(SCE)	포화 KCl	+0.242	-0.074
포화염화은(SSCE)	포화 KCl	+0.196	-0.120
납	Ca(OH) <sub>2</sub> + CaSO <sub>4</sub> (고체)	-0.483	+0.799

부를 판정하는 방법으로 자연전위측정법과 표면전위차 측정법 2가지가 있다. 콘크리트 중의 철근 부식을 판정하기 위한 전위측정법 가운데 자연전위측정법은 그 원리가 단순하고 측정도 간단하여 특수한 측정 기구가 필요치 않아 가장 많이 이용되고 있으며 1977년 ASTM(미국재료시험협회)에서 규격화(C 876-77)되었다. 일반적으로 철근의 전위 측정은 기준 전극(또는 조합 전극이라 함)과 입력 저항이 10 MΩ 이상의 고 입력 저항 전위차계를 사용하며, <표 2>에 콘크리트 용으로 사용되는 각종 조합 전극을 정리<sup>6)</sup>하였다.

(1) 자연전위측정법

콘크리트 중의 자연 전위 측정은 <그림 2>와 같이 철근으로부터의 리드선을 전위차계의 플러스 단자에, 조합 전극을 마이너스 단자에 접속한다. 이때 조합 전극의 끝을 물에 담궈 충분히 적셔 측정점에 가볍게 눌러 유지하면서 지시 값이 안정화될 때까지 기다린 후 전위 값을 기록하며, 보통 수 분 정도 걸린다. 조합 전극을 이동시켜 다수의 점에서 철근의 전위를 측정한다. 측정 간격은 소형 구조물에서는 5~10 cm, 교량 바닥판에서는 약 50 cm, 또 대형 구조물에서는 약 1m로 한다.

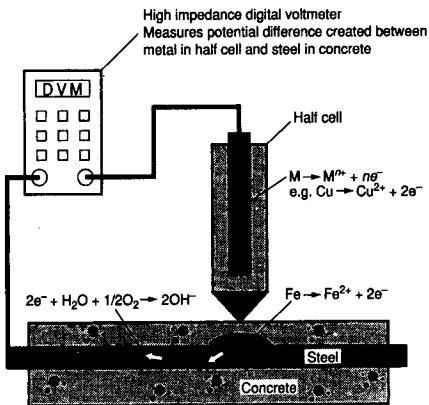


그림 2 철근의 자연 전위 측정

측정된 전위값은 등 전위선도 상에 도시하여 평가하며, 일 예를 <그림 3>에 나타내었다. 측정된 전위 값으로부터 철근의 부식 상태

의 평가는 <표 3>에 나타낸 것과 같은 ASTM C 876의 평가 기준이 이용되고 있다. 단, 중간적인 전위역에 있어서는 불확실함을 피할 수 없다.

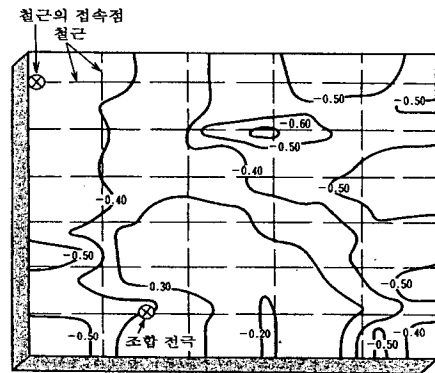


그림 3 등전위선도

표 3. 자연 전위를 위용한 철근 부식의 평가 기준

전위(mV, CSE)	ASTM(미국)	OTH(영국)
	부식 확률	부식 확률
-200 이상	90% 이상 없음.	5% 이하
-200 ~ -350	불확실	50%
-350 이하	90% 이상 부식	95% 이상 부식

한편, 현장에서는 측정의 능률화를 위해 <그림 4>와 같이 4~8개의 조합 전극을 나란히 세운 장치나 회전식 조합 전극이 시판되고 있다.



그림 4. 회전식 전위차계를 이용한 전위 측정

(2) 표면전위차측정법

표면전위차측정법은 <그림 5>와 같이 2개의 조합 전극을 사용하여 콘크리트 표면에서 한쪽 조합 전극을 고정시키고 다른 쪽의 조합 전극을 이동시켜 표면의 전위차를 측정하여 전위 구배를 구한다. 인접한 측정점의 전위 구배가 50 mV/30 cm 이상인 장소는 부식 활성 장소로 판정된다. 이 방법은 콘크리트를 까내어 철근에 측정 단자를 마련할 필요가 없다는 이점이 있다.

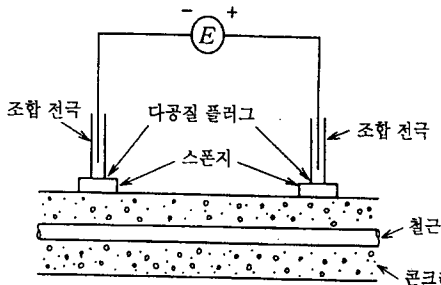


그림 5. 표면 전위차 방법

3.2 비저항법

비저항이 높은 건조한 콘크리트 중에 묻힌 철근은 부식의 진행이 쉽게 되지 않지만 비저항이 낮은 습기가 많은 콘크리트 속에서는 부식이 일어나기 쉽다. 비저항은 콘크리트의 조성, 함수량, 염화물 함유량 등에 의존하여 부식 전지 내를 흐르는 부식 전류의 크기를 지배하므로 비저항의 측정은 콘크리트의 부식 환경을 조사하는 데 유용하고 간편한 수단이 된다. 비저항과 철근 부식의 관계는 <표 4>와 같다.

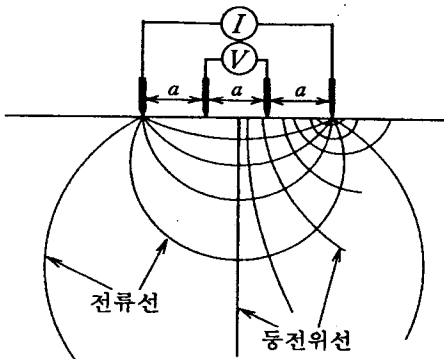


그림 6. 콘크리트의 저항률 측정법

비저항의 측정은 <그림 6>과 같이 콘크리트의 표면에 4개의 전극을 등간격(a)으로 나란히 배치하고, 양단의 두 전극 사이에 직류 또는 교류(I)를 흘려 중간의 두 전극 사이의 전위 차(V)를 측정한 후 식(1)에 의해서 비저항( $\rho$ )을 계산한다.

$$\rho = 2\pi aV/I \quad (1)$$

전극간의 간격은 철근의 영향을 피하기 위해 피복 두께 이하로 한다. 교류법에서는 임피던스가 주파수에 의존하므로 100 ~ 200 Hz의 저주파수를 사용하면 좋다. 측정된 비저항의 판단 기준은 <표 4>와 같다.

표 4. 비저항에 의한 부식성의 평가

비저항( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	부식성
< 5,000	매우 크다
5,000 ~ 10,000	크다
10,000 ~ 20,000	작다
> 20,000	없다

3.3 분극저항법

일반적으로 철근의 부식 속도를 정량적으로 구하기 위해서는 분극저항법이 많이 사용된다. 분극저항법의 원리는 콘크리트의 표면에 대극(counter electrode)과 조합 전극(reference electrode)을 설치하여 대극에서 철근에 미소 전류를 가하면 철근의 전위가 변화하고, 반대로 전위를 변화시키면 전류가 변화하게 된다. 철근의 전위를  $\Delta E$ 만큼 변화시키면 미소 전류  $\Delta I$ 가 생기고,  $\Delta E$ 가  $\pm 10 \text{ mV}$  정도의 미소 변화이면 전위와 전류 사이에는 직선 관계가 성립하며 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta E = R_p \cdot \Delta I \quad (2)$$

식(2)에서 직선의 기울기인  $R_p$ 를 분극 저항이라 하며, 분극 저항과 부식 전류 사이에는 식(3)과 같은 관계가 성립한다.

$$I_c = K \cdot (1/R_p) \quad (3)$$

이때, K의 값은 금속의 종류나 금속이 놓여지는 환

경에 의해서 결정되는 상수이며, 측정된  $R_p$  값으로부터 식(3)을 이용하여 철근의 부식 속도를 계산할 수 있다.

분극저항법을 실구조물에 적용하는 경우 콘크리트 중에 매입된 철근의 기하학적 배치(지름, 피복) 및 콘크리트의 비저항, 계면의 임피던스가 다르기 때문에 측정 면적이 구조물마다 다르게 되어 구조물의 상호 비교가 곤란하게 된다. 이 때문에 철근 지름이나 배근 상태를 고려하여 미리 전류 분포를 실험적으로 구하여 계산하는 방법이나 <그림 7(a)>와 같이 전류가 흐르는 범위를 좁게 한정하는 가이드 링을 이용한 센서(2중 대극 센서)<sup>8)</sup>도 개발되어 있다. (<그림 7(b)>)

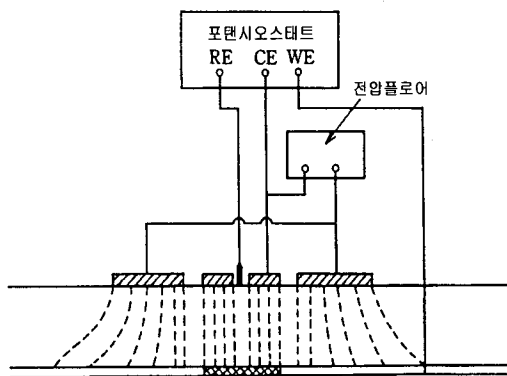


그림 7(a) 가이드 링을 이용한 측정 개요



그림 7(b) 가이드 링을 이용한 분극 저항 측정 장치 예

를 얻을 수 있는 센서를 개발하였다.

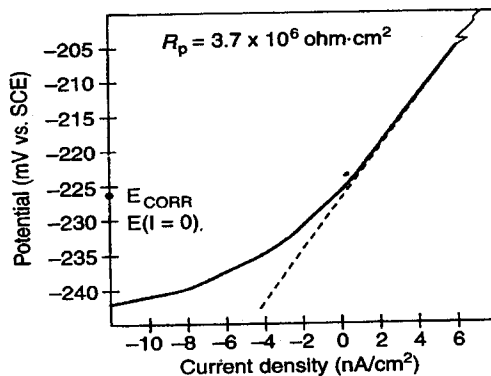


그림 8. 분극 저항의 측정 예

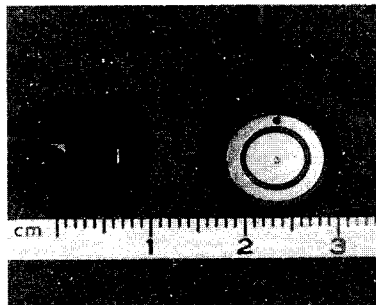


그림 9(a) 매입형 미니 센서

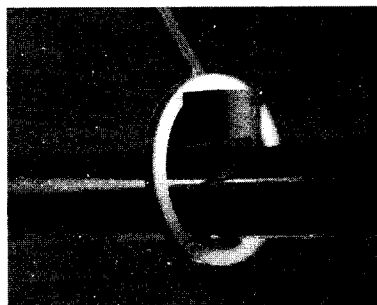


그림 9(b) 매입형 미니 센서의 설치 예

<그림 8>은 콘크리트 속에 매입된 철근의 분극 저항 측정 예를 나타낸 것이며 <표 5>는 분극 저항으로부터 계산한 부식 전류 밀도의 판단 기준<sup>9)</sup>을 정리한 것이다. 한편, 일본에서는 <그림 12>와 같은 매입형 미니센서를 시공시 철근에 부착함으로써 철근의 자연 전위, 분극 저항 등을 측정하여 정량적인 부식 데이터

표 5. 가이드 링을 이용한 측정 결과의 판단 기준

부식 전류 밀도( $I_{corr}$ )	상 태
$I_{corr} < 0.1 \mu A/cm^2$	Passive condition
$I_{corr} 0.1 \text{ to } 0.5 \mu A/cm^2$	Low to moderate corrosion
$I_{corr} 0.5 \text{ to } 1 \mu A/cm^2$	Moderate to high corrosion
$I_{corr} > 1 \mu A/cm^2$	High corrosion rate

### 3.4 교류 임피던스법

3.3절에서 설명한 분극 저항  $R_p$ 를 구하는 방법의 하나로 AC임피던스법이 있다. 일반적으로 철근과 콘크리트 사이의 계면은 <그림 10>과 같이 콘크리트의 저항  $R_s$ , 철근 표면의 전기 이중층 용량  $C_d$ , 분극 저항  $R_p$ 로 이루어지는 등가 회로<sup>10)</sup>로 모델링된다. 이러한 회로에 주파수가 다른 교류 전압을 인가하면 높은 주파수(1 kHz 정도)의 경우는 전류는 용량 성분( $C_d$ )에 충전되지 않고  $R_s \sim R_p$ 를 통과한다.

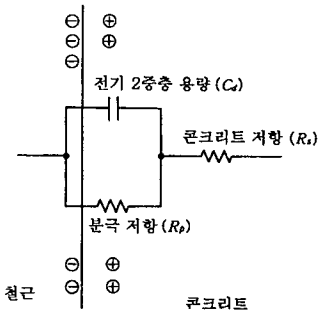


그림 10. 철근/콘크리트 계면의 등가 회로

이 현상을 이용하여 주파수를 변화시켜 가면서 주파수와 임피던스의 관계를 구하면 <그림 11>과 같은 결과<sup>11)</sup>를 얻을 수 있다. 이 그림에서 콘크리트의 저항 ( $R_s$ )와 분극 저항( $R_p$ )를 구할 수 있으며, 이때 구해진 분극 저항으로부터 부식 속도를 계산할 수 있다.

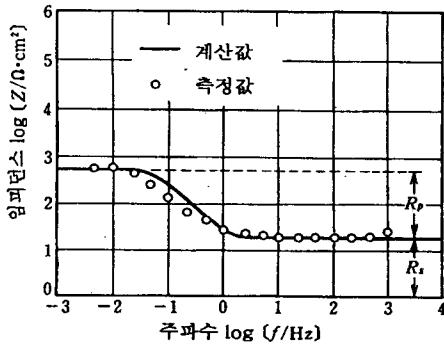


그림 11. BODE 선도

한편, 교류 임피던스법의 현장 적용시 측정 시간이 약 40분 정도 필요하므로 현장 적용에 어려움이 있으므로 이를 개선하기 위해서 다음 방법이 제안되고 있다.

#### (1) 전위 스텝법

비교적 큰 직류 전압을 전위 제어로 스텝 모양으로 인가하여 전기 이중층 용량을 강제적으로 단시간에 충전하여, 그 후의 응답 전류에 착안하여 분극 저항을 구하는 방법이다. 이 방법에서는 10초 정도로 측정이 가능하다.

#### (2) 정전류 2중 펄스 중첩 방식

종래의 1주파수의 전류를 차차 변화시킨 측정에 대해서, 저주파(0.25 Hz)의 직사각형 전류에 고주파(160 Hz)의 직사각형 전류를 중첩시킨 전류를 사용해서 각각의 전류에 응답하는 전압을 검출하여 콘크리트 저항( $R_s$ )과 분극 저항( $R_p$ )을 측정하는 방법이다.

## 4. 매크로셀 전류를 이용한 철근 부식 모니터링

철근 콘크리트 구조물 중의 철근 부식을 조사하기 위해서는 고가의 기구와 장비 및 인력이 소요될 뿐만 아니라 매번 철근을 노출시켜야 하는 단점이 있다. 이를 개선하기 위하여 개발된 것으로 비교적 최근에 연구 성과와 적용 사례가 증가하고 있는 ladder system은 매크로셀 전류 측정법을 응용한 것으로 독일에서 개발되었으며, 최근 신설 철근 콘크리트 구조물의 철근 부식 모니터링에 적용한 사례가 많이 보고되고 있다. 한편, 국내에는 anode-ladder system 또는 multi-depths sensor로 소개된 바 있다. <그림 13>에 철근의 조립시에 함께 매입된 센서의 모습을 나타내었다. 이는 콘크리트 구조물의 건설시에 미리 철근과 함께 설치하여 철근 부식을 모니터링할 수 있도록 고안된 것이며, 기존 구조물에 설치할 수 있도록 개발된 expansion ring system도 있다.

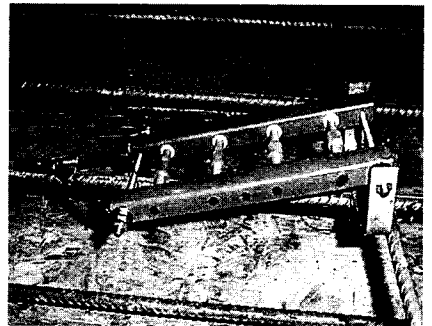


그림 13. multi-depths 센서의 설치

#### 4.1 마크로셀 전류의 측정 원리

마크로셀의 구성은 이종 금속으로 갈바닉쌍을 형성시켜 애노드와 캐소드를 분리시킴으로써 애노드와 캐소드 사이에 발생하는 미소 부식 전류의 측정을 가능케 한 측정 기법으로 콘크리트 중의 철근 부식 모니터링에 보편적으로 사용되는 측정법은 <그림 14>와 같다. ASTM G 109에 제시된 마크로셀 전류의 측정<sup>12)</sup>은 이종 금속 대신 동일 철근을 사용하며 상부에서 공급된 염수(salt water) 중의 Cl<sup>-</sup> 이온이 콘크리트 중으로 침투, 확산하여 상부의 철근이 활성화됨에 따라 애노드로 작용하며 Cl<sup>-</sup> 이온이 침투하지 않은 하부의 철근이 캐소드가 된다. 이때 상·하부의 철근을 기지의 저항을 이용하여 전기적으로 접속시킨 후 저항의 양단에 걸리는 전위 차를 측정함으로써 부식 전류를 계산한다.

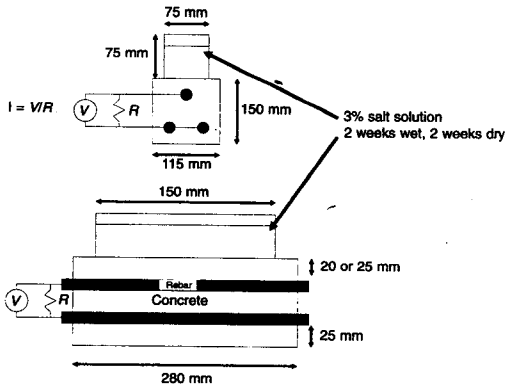


그림 14. 마크로셀 전류의 측정(ASTM G 109)

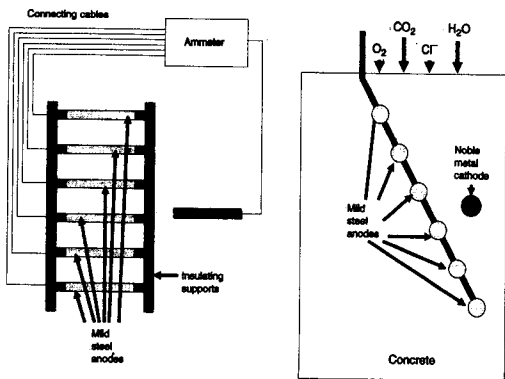


그림 15. ladder system의 구성과 개요

<그림 15>는 마크로 전류의 측정을 위한 ladder system의 개요<sup>13)</sup>를 나타낸 것으로 경과 시간에 따라 외부에서 침투하는 유해 이온의 침투에 의하여 활성화되는 애노드부의 철근과 캐소드 부위 사이의 부식 전류를 깊이별로 측정할 수 있도록 구성된 것이다.

#### 4.2 모니터링 및 분석

모니터링은 컴퓨터에 의한 자동 측정이나 수동 측정 모두 가능하며; 중성화나 염화물의 침투에 의하여 깊이별로 매입된 애노드 철근이 차례로 활성화되며 정기적으로 측정된 전류량으로부터 임계 염화물 양이나 중성화 정도가 시간과 환경적인 요소와 함께 분석될 수 있다. 또한 휴대용 자동 계측기인 CANIN-LTM이 개발되어 전류량과 전위차, 전해질, 저항 및 온도 등이 자동으로 측정된다. <그림 16>에 측정 예를 나타내었다.

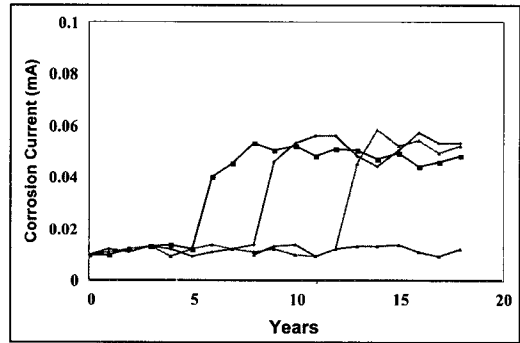


그림 16. multi-depths 센서를 이용한 측정 예

#### 4. 결 론

본고에서는 콘크리트 구조물의 유지 관리를 담당하는 엔지니어와 관련 분야 종사자들의 이해를 돕고자 콘크리트 구조물 중의 철근 부식 모니터링 기술에 관하여 국내외에 적용되고 있는 전기화학적 기법 등을 중심으로 측정 원리와 적용 사례를 소개하였다.

콘크리트 구조물의 철근 부식으로 인한 성능 저하는 철근 부식으로 인한 균열이 발생한 후에야 비로소 육안 관찰이 가능하며 이미 철근의 부식이 상당히 진행된 후라면 보수 보강 대책의 수립이 쉽지 않을 뿐만 아니라 비용이 크게 소요되므로 조기에 철근 부식의

정후를 감지하여 대책을 수립하는 것이 중요하다. 그러나, 국내의 경우 아직 철근 부식과 모니터링 기법과 관련된 연구 성과가 많지 않은 실정이므로 체계적인 연구와 더불어 모니터링의 기법이 정착될 수 있도록 연구자 및 관련 분야 종사자들의 노력이 필요할 것으로 생각된다. □

### 참고문헌

1. ACI Committee 222, "Corrosion of Metals in Concrete", ACI Journal, Jan.~Feb., 1985.
2. Jan P. Skalny, "Materials Science of Concrete", The American Ceramic Society, Inc., 1989.
3. M. G. Fontana, "Corrosion Engineering", 3rd, McGRAW-HILL, pp.14~19, 1986.
4. Denny A. Jones, "Principle and Prevention of Corrosion", 2th, Prentice Hall, pp.440~441, 1997.
5. 小林一輔, "鐵筋腐食의 診斷", 森北出版株式會社, p.81, 1993.
6. (社)日本非破壞檢査協會, "コンクリート構造物の非破壞試驗法 第12章", 養賢堂, 1994. 12.
7. ASTM C 876 "Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete", American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA
8. (社)日本非破壞檢査協會, "新非破壞檢査便覽", 日刊工業新聞社, p1244, 1992. 10.
9. J. P. Broomfield, "Corrosion Rate Measurements in Reinforced Concrete Structures by a Linear Polarization Device", ACI SP 151, 1994.
10. 中川防蝕工業(株), "鹽害環境にあるコンクリート構造物の鐵筋腐食診斷システム", (社)日本非破壞檢査協會, No.009-42, 1991.
11. 後藤, "交流インピーダンス法を用いた鐵筋腐食モニタリング", (社)日本非破壞檢査協會, No.009-39, 1991.
12. ASTM G 109, "Test Method for Determining the Effects of Chemical Admixtures on the Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete exposed to Chloride Environments", American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA
13. P. Shiessl, M. Ruapach, "Non-destructive Permanent Monitoring of the Corrosion Risk of Steel in Concrete", Non-destructive Testing in Civil Engineering, British Institute of Non-destructive Testing, International Conference, University of Liverpool, V.2, pp.661~674, 1993.