

# 콘크리트중의 鐵筋腐蝕에 관한 電氣化學적 진단방법에 관한 研究

Electrochemical Diagnosis on Corrosion  
of Steel in Concrete

尹 在 煥

(水原大 建築工學科 副教授, 工博)

## 1. 序 論

최근 강자갈, 강모래 등의 天然骨材의 고갈로 인하여 바다모래(海砂), 깬자갈(碎石)등의 사용이 증가하고 있다. 특히 바다모래를 洗淨하지 않고 콘크리트 材料로써 사용할 경우에는 鐵筋콘크리트 구조물중의 철근을 부식시켜, 구조물의 耐久性을 현저하게 감소시킨다.

콘크리트 구조물중의 철근이 부식하면 구조물 콘크리트의 균열, 박리, 脫落 등의 劣化를 일으켜 마침내 파괴시키는 작용을 하여 耐久性에 큰 영향을 미친다. 콘크리트중의 철근이 부식을 일으키는 원인으로서는 鹽素이온 혹은 콘크리트의 中性化에 의한 不動態 피막의 파괴를 들 수 있다. 이중 콘크리트의 中性化 속도는 일반적으로 늦고, 철근 부식을 일으키는 많은 원인은 염소이온에 의한 것이다. 염소이온이 콘크리트안에 포함되는 경로는 콘크리트용 材料(바다모래, 혼화제등)에 의하여 혼합되어지는 경우와 외부로부터의 침투(飛來鹽分, 除雪劑 등)를 들 수 있다.

철근콘크리트 구조물중의 鐵筋의 실제 腐蝕狀況을 아는 것은 구조물의 耐久性 診斷을 위하여 중요하다. 철근의 부식반응은 電氣化學的인 반응이며, 이 反應에 着目하여 콘크리트표

면으로부터 콘크리트중의 철근의 腐蝕狀況을 非破壞的으로 또한 短時間에 連續的으로 측정하려는 研究가 여러 外國에서는 활발히 進行되고 있으나 國內에서의 이러한 연구는 보이지 않는다. 현재 콘크리트중의 철근부식에 관한 전기화학적 측정방법으로서 검토되고 있는 대표적인 방법으로서는 自然電位法, 分極抵抗法 및 콘크리트 抵抗法이 있다.

본 연구의 목적은 이와같은 方法을 콘크리트 구조물의 非破壞的 耐久性 진단방법으로서 이용하기 위한 基礎的인 연구를 행하는데 있다.

## 2. 콘크리트중의 철근부식에 관한 非破壞的 측정 방법의 종류와 특징

### 2. 1 自然電位法

자연전위법은 電氣化學的 方法중에서 가장 많이 검토되고 있는 방법으로서, 비교적 간편한 방법이다. 自然電位란 金屬이 그 존재하는 환경속에서 유지하고 있는 電位를 말한다. 그림1에 나타낸바와 같이 自然電位는 腐蝕의 anode 反應과 cathode 反應에 의한 電位의 分極으로부터 결정된다.

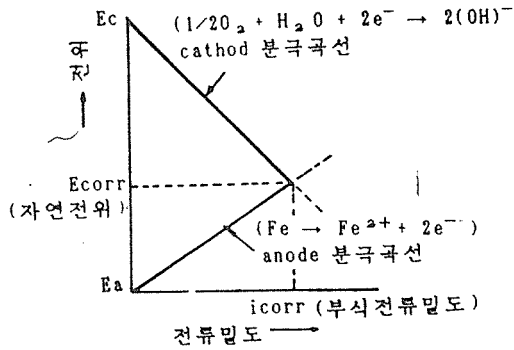


그림 1. 철근부식반응의 개념도

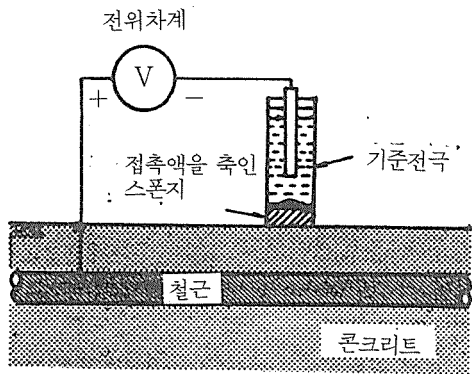


그림 2. 자연전위의 측정방법

自然電位는 環境이나 철근의 狀況에 따라 變化하며 自然電位法은 基本적으로 이러한 電位의 變化로 부터 鐵筋의 腐蝕性을 判定하는 方法이다. 그림 2에 콘크리트중 鐵筋의 自然電位를 측정하는 方法을 표시한다. 측정장치는 기준전극과 電位差計로 이루어지는 극히 簡單한 方法이다.

콘크리트중의 鐵筋의 腐蝕性을 自然電位치로부터 판단하는 기준으로서 ASTM C876에서 制定된 표1의 것이 널리 사용되고 있다. 이 기준은 콘크리트중의 鐵筋의 腐蝕성과 電位值 와의 關係를 確率論的으로 평가한 것이며, 室

표1. ASTM C876에 의한 자연전위와 철근부식성과의 관계

측정전위의 범위	콘크리트중 철근부식의 가능성
$-200\text{mV} < E$	90% 이상의 확률로써 부식 없음
$-350\text{mV} < E \leq -200\text{mV}$	불확정
$E \leq -350\text{mV}$	90%이상의 확률로써 부식 있음

\* 전위값은 포화황산동 전극을 기준

內실험에 의해 얻어진 결과를 기초로 여기에 다시 많은 여러 종류의 콘크리트 構造物에서 얻어진 調査結果를 참고하여 作成된 것이다.

그러나 이 기준값은 腐蝕 狀況을 측정한 自然電位값이 그때 그때의 狀況에 따라 서로 다르며 定量的으로 腐蝕 狀況을 파악하기에는 곤란하다는 보고도 있다. 따라서 自然電位값 그 자체는 本來 腐蝕할는지 어떨지의 可能性 만을 나타내는 指標이며 自然電位값 자체만으로 現在의 腐蝕 상태에 대하여 추정하려고 하는 시도도 많이 행해지고 있다.

## 2. 2 分極抵抗法

鐵筋의 腐蝕 정도를 보다 직접적으로 파악하기 위해서는 腐蝕 電流量을 구하면 된다. 그림1에서 鐵筋의 腐蝕전류밀도  $i_{corr}$ 는 anode 分極曲線과 cathode 分極曲線이 만나는 점에서 電流 밀도이기 때문에 각각의 分極曲線을 정확히 측정할 수 있다면 이 값을 추정할 수 있다. 그런데 이 分極曲線은 自然電位의 근방 ( $\pm 10\text{mV}$  정도)에서는 直線性을 나타내며, 自然電위로 부터의 微小分極量  $\Delta E$ 와 이 分極을 발생시키는 데 필요한 供給電流量  $\Delta i$ 와의 比(이 比를 分極抵抗이라고 부른다)의 逆數는 다음 式과 같이 腐蝕電流 密度와 근사적으로 比례關係가 된다.

$$i_{corr} = K \cdot \frac{\Delta i}{\Delta E} = K \cdot \frac{1}{R_p}$$

여기에서  $K$ : 환산계수,  $R_p$ : 분극저항

이 성질을 이용한 부식속도의 측정방법이 직線分極法이며, 이외 AC 임피던스法 交流分極法 등의 방법이 있다.

分極抵抗法의 측정방법을 그림3에 개략적으로 나타내었으며, 전원·제어장치로서는 직線分極法의 경우에는 Potentiostat 또는 Galvanostat등이 필요하며 交流分極法에서는 고주파전류(1~10KHz)와 저주파전류(0.01~0.1Hz)를 중첩할 때는 定電流펄스를 印加할 수 있는 장치가 필요하다.

分極抵抗은 自然전위와는 반대로 어디까지나 速度의 지표이며, 현재의 부식상태를 나타내는 지표는 아니다. 따라서 分極抵抗의 經時 변화를 측정하여 가면 腐蝕量의 추정은 가능하며, 또한 分極抵抗이 대국적으로 변화가 없는 것으로 볼 수 있는 경우에는 腐蝕量의 豫測이 가능하다.

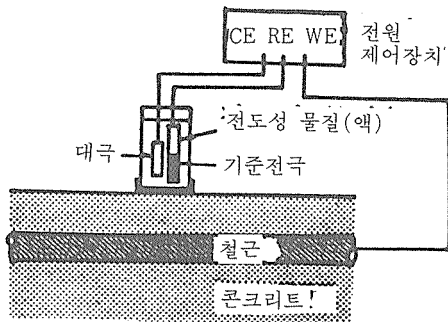


그림 3. 분극저항 측정방법

### 2. 3 콘크리트 電氣抵抗性的의 測定

콘크리트중의 鐵筋의 부식상황을 직접 나타내는 것은 아니나 鋼材의 腐蝕性和 밀접한 관계를 가진 것으로서 콘크리트의 電氣抵抗性이 있다.

콘크리트의 抵抗을 구하는 方法으로서는 2.2에서의 交流分極法에서 얻어지는 溶液抵抗(R soln)값도 그중의 하나이다. 단지 이 방법으로는 전류의 흐름을 특정지을 수 없기 때문에 얻어진 抵抗值로 부터 콘크리트의 특성값인 比抵抗을 계산한다는 것은 극히 곤란하다.

이 比抵抗을 측정하는 方法으로서는 그림4에 나타난 4電極法이 사용된다. 이 방법은 등간격으로 일렬로 배열한 4개 電極中 양쪽 끝의 電極 사이에 直流 또는 周波數 10~100Hz 정도의 交流를 공급하여 그 電流量과 内部 2개의 電極 사이에서 측정된 電位差로부터 比抵抗을 구한다.

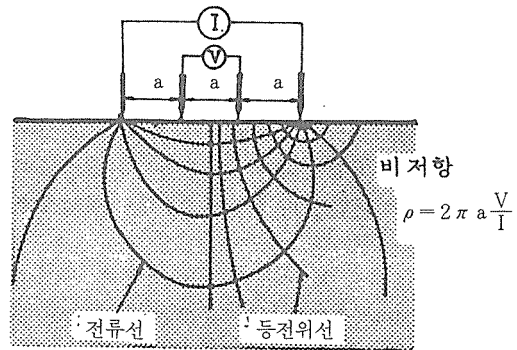


그림 4. 콘크리트의 비저항 측정방법

## 3. 콘크리트중의 철근부식에 관한 非破壞測定 方法의 檢討

直線分極法을 이용하여 콘크리트 표면으로부터 그림 3과 같이 철근의 自然電位, 分極抵抗을 동시에 측정하여 이들 값을 철근부식에 관한 非破壞測定 및 모니터링 (monitoring)에 이용하기 위한 基本的인 자료를 얻기 위하여 다음과 같이 실험계획하였다.

### 3. 1 實驗概要

부식측정을 위한 철근콘크리트 공시체는 15 × 15 × 55cm의 휨실험용 공시체를 이용하여 그림 5와 같이 ϕ 13mm 철근 2대를 삽입한 뒤 철근피복 두께를 2cm로 하여 제작하였다. 철근은 ϕ 13mm의 磨棒鋼(SS 20)을 400번 및 600번의 샌드페이퍼로 표면을 연마한 뒤 아세톤으로 표면을 세정하였다. 또한 철근 兩端面

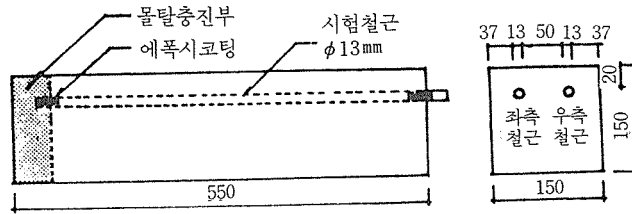


그림 5. 공시체의 형상 치수

표 2. 콘크리트의 배합

W/C (%)	Slump (cm)	Gmax (cm)	S/A (%)	단위중량(kg/m <sup>3</sup> )				AE감수제 (g) (C×0.15%)
				시멘트	물	세골재	조골재	
65	21	20	42.6	269	175	809	1089	403.5
55	21	20	40.2	322	177	744	1106	483.0
45	21	20	37.3	407	183	658	1106	610.5

에서의 腐蝕을 방지하기 위하여 소정의 구간은 에폭시코팅 처리하였다.

또한, 콘크리트의 配合등 콘크리트의 조성이 부식에 미치는 영향을 파악하기 위하여 콘크리트의 배합은 표 2에 나타난 바와 같이 3종류의 배합으로 하였다.

시험체 조건은 표 2의 각각의 배합에 대하여 NaCl 無添加의 공시체(이하 플레인 공시체라 칭함)와 Cl이온이 3kg/m<sup>3</sup>이 되도록 NaCl의 콘크리트 混合水에 添加하여 제작한 공시체(이하 염분함유 공시체라 칭함) 및 방청제의 效果를 파악하기 위하여 上記의 염분첨가 공시체에 방청제(NR-1900)를 소정량(3000CC/m<sup>3</sup>)첨가한 공시체(이하 방청제첨가 공시체라 칭함)를 각각 제작하였다. 동일 조건의 공시체를 3개씩 제작하여 全體 27개를 제작하였다.

사용 骨材는 강자갈, 강모래이며, 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고 全配合에 A·E 減水劑(Lignal-AE)를 첨가하였다. 콘크리트 공시체 脫型 후 7日間 수중양생을 행한 후 60°C, 100% RH의 恒溫恒濕槽에서 부식을 촉진하였으며 소정재령에 전기화학적

실험을 실시하였다.

直線分極法에 사용한 기기는 Potentiostat이며, 對極으로서는 白金을 基準電極으로서는 포화카르멜 전극(CSE)을 사용하였다. 콘크리트중에 삽입된 철근 각각에 대하여 콘크리트 표면에서 5cm 간격으로 10포인트씩 전기화학적 特性值(自然電位( $E_c$ ), 分極抵抗( $R_p$ ))를 측정하였다.

소정재령에서 전기화학적인 측정을 행한 공시체는 콘크리트를 破碎시켜 内部鐵筋을 꺼내어 腐蝕狀態를 관찰하였다.

### 3.2 實驗結果 및 考察

材齡 1年까지의 電氣化學的 측정결과와 일부를 그림 6~14에 나타낸다.

그림 6~14는 물시멘트비가 각각 0.45, 0.55, 0.65인 경우의 플레인 공시체, 염분함유 공시체 및 방청제 첨가공시체의 同一 공시체상의 2개의 鐵筋에 대하여 소정재령에 있어서의 自然電位( $E_c$ : 單位 mV vsCSE를 mV로 略記)와 分極抵抗( $R_p$ )의 分布와 材齡 1년에 있어서의 鐵筋의 腐蝕狀態를 동시에 표시한 것이다. 同一 공시체상의 2개의 철근을 구분

하기 위하여 그림 5종의 단면도중 우측에 있는 철근을 右側철근, 좌측에 있는 철근을 左側철근으로 호칭한다.

### 3. 2. 1 플레인콘크리트 供試體

플레인콘크리트에 있어서 自然電位 값( $E_c$ )은 初期材齡에 있어서 공시체의 전 구간에 걸쳐 거의 동일한 값을 나타낸다. 그러나 시간의 경과에 따라 전위 값은 부분적으로 증가 또는 감소하며, 전위값의 分布도 不均等하게 된다. 그러나 그 차이는 미소하여 플레인콘크리트인 경우의 초기의 자연전위값은 모든 경우에 있어서  $-200\text{mV}$  이상의 값을 가지며, 시간의 경과에 따라 전위값이 약간 增加하는 경향을 보이고 있다. 材齡 1年에서의 거의 대부분의 전위값은  $-100\text{mV}$  이상으로 안정된 것이 많다.

이것은 鐵筋 주위에 不動態 皮膜이 형성되어 그 두께가 增大하기 때문이라고 생각된다. 그러나 유일하게 그림 8에 나타낸 공시체에 있어서는 左, 右側 철근 모두 철근의 左端 부분이  $-200\text{mV}$ 보다 低下하고 있음을 알 수 있으며 다른 부분과의 전위차의 구배도 급격함을 알 수 있다.

또한 分極抵抗( $R_p$ )값은 자연전위와는 반대로 左端 부분이 일반적으로 작고 그리 현저하지는 않으나 右端으로 갈수록 커지고 있음을 알 수 있다. 이것은 그림에서 나타낸 바와 같이 兩鐵筋 모두 左側 부분이 腐蝕하고 있다는 점을 고려하면 부식부분에서 자연전위는 低下함과 동시에 전위구배가 급하게 되고 分極抵抗 값은 적게된다는 既存의 研究結果<sup>2)</sup>와 一致하는 현상이다.

전기화학적인 特性値는 철근의 直上 부분에서 측정되는 것에 비하여 그림 중의 철근의 부식은 鐵筋下部에 주로 발생하고 있다는 것에 有意할 필요가 있다. 보통 콘크리트인 경우에는 철근주위에 不動態 皮膜이 형성되어 철근 부식이 억제되는 것이 일반적이다. 여기에서와 같이 플레인콘크리트에서 부식이 발생한 것은

블리딩 效果에 의하여 철근하부에 水膜層이 형성된 것과 철근 좌단부의 콘크리트와 몰탈과의 경계부에서의 結합부를 통하여 산소와 水分이 공급되었기 때문이라고 생각한다. 그림 6, 7에서와 같이 철근의 자연전위값이 材齡 1年에 있어서  $-100\text{mV}$  근방에 안정되어 있음에도 不拘하고 철근하부에 군데 군데 부식이 발생한 것은 이와같은 Bleeding 效果에 의한 것으로 생각되며 또한 물시멘트의 변화에 따른 콘크리트 材質의 차는 명확히 나타나지 않았다. 또한 자연전위와 분극저항과의 상관도 명확하지 않았다. 그러나 플레인공시체에 있어서는 자연전위값이  $-200\text{mV}$  이상일 경우에는 철근의 부식경향이 없다고 일반적으로 판단할 수 있다고 생각한다.

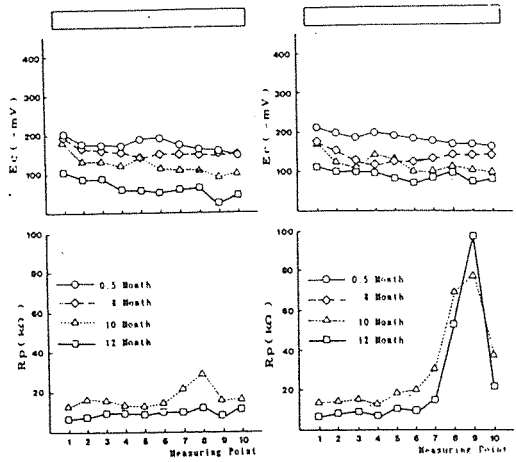
### 3. 2. 2 鹽分含有供試體

콘크리트중에 염분을 함유하게 되면 鹽化物 이온에 의하여 철근의 부동태 피막이 파괴되고 鐵筋부식이 발생될 것이 예상된다.

염분함유 공시체에 있어서는 初期材齡에서 自然電位 값( $E_c$ )은 거의 均等하게  $-300\sim-500\text{mV}$  사이에 존재하여 플레인콘크리트인 경우에 비하여 상당히 低下함을 알 수 있다. 또한 시간의 경과에 따라 공시체의 全區間에 걸쳐 자연전위값이 不均等하게 變化하여 그 구배도 급격하게 됨을 알 수 있다.

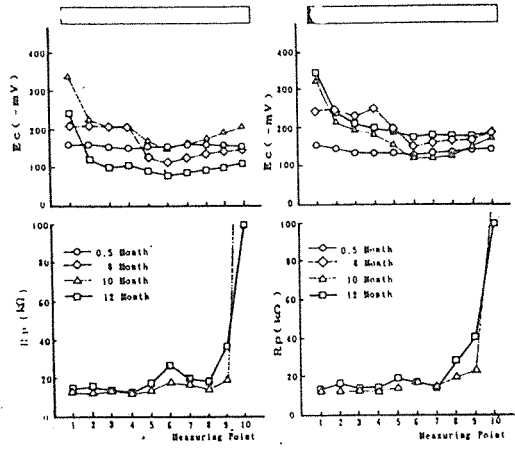
염분함유 공시체의 경우에는 材齡 1年에 있어서도 자연전위값이 비교적 全區間에 걸쳐 均等하게 낮아,  $-300\sim-400\text{mV}$  사이에 존재하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 鐵筋의 부식상태도에서 나타나듯이 全般的으로 많은 부식이 발생하고 있다는 것과 잘 一致하고 있다. 그러나 자연전위값과 부식개소와의 明確한 對應은 보이지 않았다. 또한 분극저항값도 자연전위나 부식과의 明確한 關係는 파악할 수 없었다.

이와같이 부식하고 있는 부분, 부식하지 않는 부분에 있어서 自然電位의 測定値의 크기에 큰 차이가 없는 이유로서 「不活性인 부분



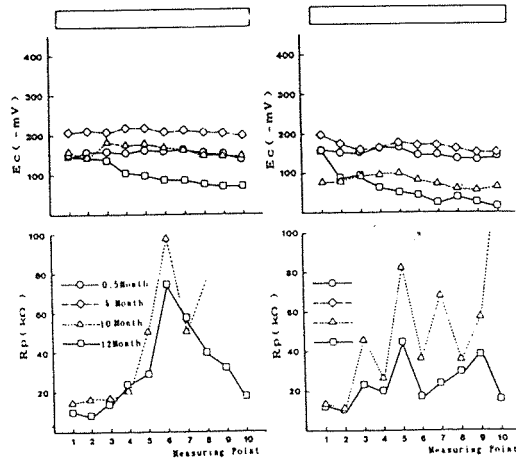
(1) 우측철근 (2) 좌측철근

그림 6. 플레인콘크리트 공시체 (w/c=0.45)의 자연전위 및 분극저항값의 분포



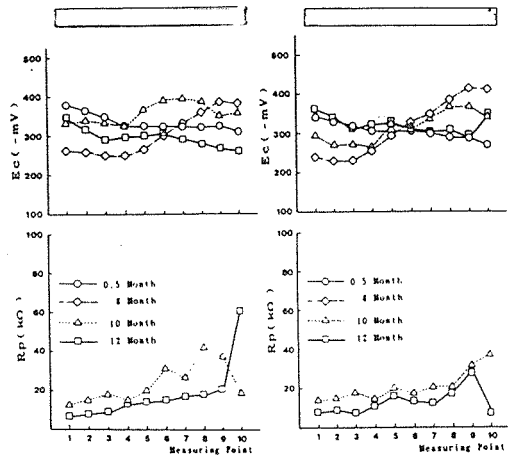
(1) 우측철근 (2) 좌측철근

그림 8. 플레인콘크리트 공시체 (w/c=0.65)의 자연전위 및 분극저항값의 분포



(1) 우측철근 (2) 좌측철근

그림 7. 플레인콘크리트 공시체 (w/c=0.55)의 자연전위 및 분극저항값의 분포

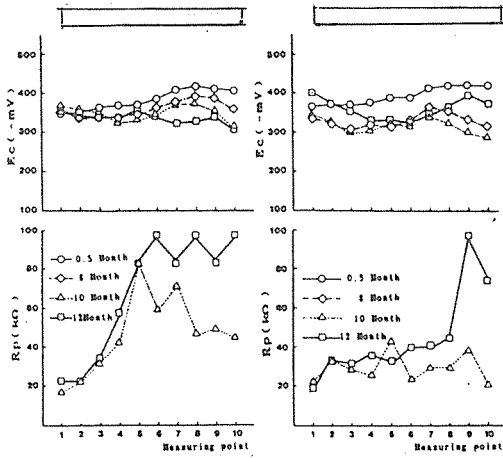


(1) 우측철근 (2) 좌측철근

그림 9. 염분함유 공시체 (w/c=0.45)의 자연전위 및 분극저항값의 분포

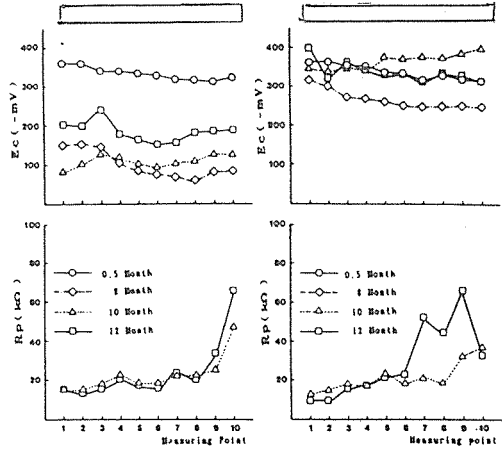
의 자연전위는 근처에 活性인 부분이 있는 경우에는 그 부분의 영향을 받기 때문에 실제값보다 작게 된다」고 田村<sup>5)</sup>은 언급하고 있다.

따라서 철근의 자연전위값은 측정개소에 있어서 부식의 여부를 직접 나타내기 보다는 철근의 전 길이에 걸쳐 부식의 발생 및 발생 가능



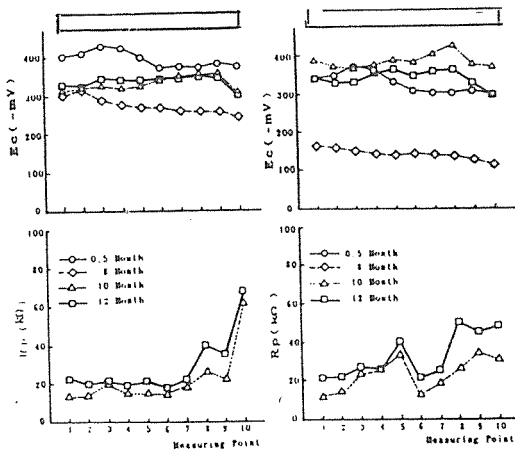
(1) 우측철근 (2) 좌측철근

그림 10. 염분함유 공시체 (w/c=0.55)의 자연전위 및 분극저항값의 분포



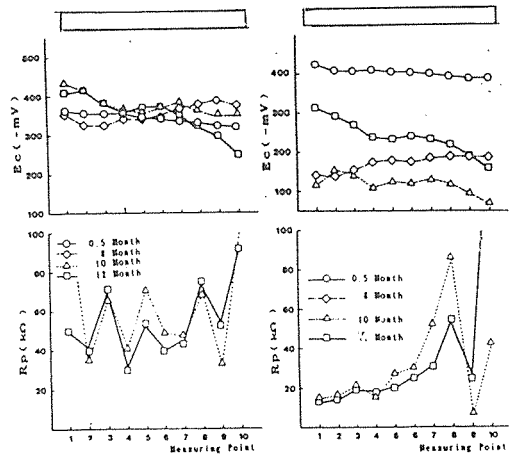
(1) 우측철근 (2) 좌측철근

그림 12. 방청제 첨가 공시체 (w/c=0.45)의 자연전위 및 분극저항값의 분포



(1) 우측철근 (2) 좌측철근

그림 11. 염분함유 공시체 (w/c=0.65)의 자연전위 및 분극저항값의 분포

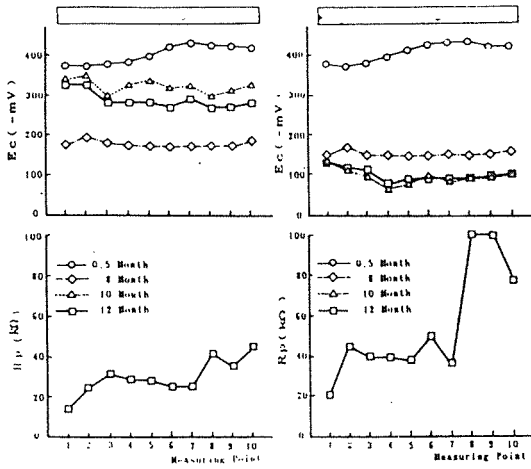


(1) 우측철근 (2) 좌측철근

그림 13. 방청제 첨가 공시체 (w/c=0.55)의 자연전위 및 분극저항값의 분포

성 여부의 경향을 나타낸다고 생각하는 것이 타당하다. 또한 이 경향은 재령에 관계없이 재령의 초기에도 파악할 수 있다. 철근의 부식발

생 개소는 bleeding이 발생하는 철근하부에 발생하였으며 물시멘트비의 차이에 따른 콘크리트조직의 차이가 철근부식에 미치는 영향은



(1) 우측철근 (2) 좌측철근

그림 14. 방청제 첨가 공시체(w/c=0.65)의 자연전위 및 분극저항값의 분포

분명하지 않았다. 염분함유 공시체의 실험으로부터 철근의 자연전위값이  $-300\text{mV}$ 보다 낮은 때에는 부식의 가능성이 있다고 판단하는 것이 타당하다.

### 3. 2. 3 방청제 添加 供試體

鹽分含有의 콘크리트에 방청제를 첨가하였을 때에는 自然電位 값은 上記의 두 경우와는 다른 특징적인 樣相을 보인다.

初期 材齡에 있어서 자연전위값은 鹽分含有의 경우와 類似하게 낮아  $-300\sim-500\text{mV}$  사이에 存在한다.

이것은 初期에 있어서 鐵筋 주위의 不動態 皮膜의 形成이 鹽化物 이온에 의하여 방해받기 때문이라고 생각한다. 그러나 材齡의 경과에 따라 자연전위 값은 크게 변화하여, 材齡 1년에 있어서는 初期 전위값이 그대로 유지되거나 약간 증가한 경우와, 전위값이 크게 증가하여  $-100\text{mV}$  근방까지 증가한 두가지의 경우로 나눌 수 있다.

前者에 속하는 것은 그림 12의 좌측철근(材

齡 1년에서의  $E_c$ 는 약  $-300\sim-400\text{mV}$ ), 그림 13의 우측철근(材齡 1년에서의  $E_c$ 는 약  $-300\sim-400\text{mV}$ ), 그림 14의 우측철근(材齡 1년에서의  $E_c$  약  $-300\text{mV}$ )으로 방청제를 첨가하였음에도 不拘하고 자연전위 값은 낮은 값을 보이며 철근이 부식하고 있다는 것을 알 수 있다.

그러나 자연전위가 증가한 경우로서는 그림 12의 우측철근(材齡 1년에서의  $E_c$ 는 약  $-200\text{mV}$  전후), 그림 13의 좌측철근(材齡 1년에서의  $E_c$ 는 약  $-200\sim-300\text{mV}$ ), 그림 14의 좌측철근(材齡 1년에서의  $E_c$ 는 약  $-100\text{mV}$  전후)로서 同一한 시험체임에도 不拘하고 자연전극전위 값이 높아짐에 따라 철근의 부식 경향도 더 작음을 알 수 있다.

여기에서도 분극저항과의 관계는 분명하지 않으며 물시멘트비의 차이에 의한 콘크리트 조직의 차이가 부식에 미치는 영향은 명확하지 않았다. 이 실험으로부터 多量의 염분이 콘크리트에 混入된 경우에도 방청제의 첨가에 의하여 상당한 부식억제 효과가 있다는 것을 그림 9, 10, 11과 비교하면 금방알 수 있으며 또한 同一 시험체 내의 철근에서도 위치에 따라 방청제의 抑制 效果가 均等하지 않음을 알 수 있다. 자연전위와 부식과의 관계는  $-200\text{mV}$  이상인 경우는 소량의 부식을 보이며  $-300\text{mV}$  以下에서는 많은 부식이 발생하여 이것은 앞의 시험결과와 동일한 경향을 보인다.

### 3. 2. 4 腐蝕 面積과 自然電位の 관계

그림 15에 부식면적율과 자연전위와의 관계를 나타낸다. 자연전위는 철근 하나에 대하여 재령 1년에서 측정한 10개 전위값의 평균치이다. 자연전위가  $-200\text{mV}$ 보다 크면 거의 부식하지 않으나  $-300\text{mV}$  이하인 경우에는 부식면적율이 크다는 것을 알 수 있다. ASTM 기준에서는 부식발생의 上限線을  $-350\text{mV}$  이하로 하고 있으나 기준전극으로써 포화카르멜 전극을 사용한 본 실험에서는  $-300\text{mV}$  정도를 상한선이라고 생각한다.



