

## 콘크리트 철근의 분극저항 측정

김 종 집 · 정 종 호 · 허 용 학

한국 표준과학 연구원

### Measurements of Polarization Resistance in Concrete Rebar

Jong Jip Kim, Jong Ho Jung, Yong Hak Huh

Korea Research Institute of Standards and Science P.O. Box 102, Yusong, TaeJön, 305-600, Korea

Polarization resistance was measured by d/c linear polarization technique for concrete rebars exposed for 8 months to lab. air, tap water, 1% NaCl and 3.5% NaCl solutions. The results were compared with those from a/c impedance, galvanostatic and potentiostatic polarization techniques. Values of polarization resistance determined from d/c linear polarization data were similar to those estimated by a/c impedance and galvanostatic polarization techniques, except for the specimen exposed to lab. air in which no active corrosion occurs. However, the values from potentiostatic polarization were markedly lower than those obtained from other techniques, and difference was measured to be small between specimens exposed to different conditions in the above.

*Keywords* : concrete rebar, polarization resistance, a/c impedance, potentiostatic polarization, galvanostatic polarization.

### 1. 서 론

콘크리트는 강알칼리성이므로 외적 요인이 작용하지 않는 한, 철근의 표면에는 부동태 피막이 생성되어 철근이 부식으로 부터 보호된다. 철근의 부식을 일으키는 주요 외적 인자는 탄산화(carbonation)와 염화물(chloride)의 침투이다. 공기 중의 CO<sub>2</sub>는 세멘트 중에 포함되어 있는 Ca(OH)<sub>2</sub>와 반응, CaCO<sub>3</sub>를 생성시켜 pH를 낮추며, 바다 모래와 해빙제(deicing salt) 등에서 혼입된 염소 이온은 철근의 부동태 피막의 생성을 방해하거나 파괴시켜 철근의 부식을 발생시킨다. 철근의 부식 속도는 콘크리트내의 pH 및 염

화물량 외에도, 산소 및 수분량 등의 노출 환경 변수에 의해 좌우된다.<sup>1)</sup> 따라서 침지 조건에 의한 영향이 크며, 지속적인 침지(immersion) 조건보다는 침지와 건조가 반복되는 조건에서 부식이 더 심하다. 또한 철근의 부식 속도는 콘크리트의 조성, 두께, 전극 위치/형태<sup>1-4)</sup> 및 측정 방법에 따라 측정된 결과에 큰 차이를 보인다.<sup>5-7)</sup>

콘크리트 철근 부식 속도의 현장 측정에는 이동이 용이하고 D/C 전원 사용이 가능한 장비 및 분극 면적을 한정시킬 수 있는 보조 전극(guard electrode)이 사용된다.<sup>8,9)</sup> 철근 부식 속도의 현장 측정에 활용 또는 검토되고 있는 주요 전기화학적 분극 방법으로는 측정 시간이 긴 실

험실적인 직류 분극저항(polarization resistance) 측정 및 교류 저항(A/C impedance) 측정법들을 일부 변형한 방법들<sup>7)</sup>과 측정 절차의 간편하고 데이터 해석이 용이한 정전류(galvanostatic) 및 정전위(potentiostatic) 방법들<sup>5,6,10,11)</sup>이 있으며, 특히 포화 전위 및 전류 측정에 근거한 후자의 2가지 방법들은 측정 절차 및 재현성에 관한 연구 자료가 부족하다.

또한 콘크리트 철근 부식 측정법의 확립 및 개선을 위해서는, 부식 속도에 영향을 미치는 다양한 실험 조건 및 조건들의 조합에서 분극시험 방법들의 특성 및 측정값에 대한 비교 연구가 필요하다. 본 연구에서는 이 점을 감안, 비교적 산소의 접근이 용이하고 수분의 공급이 계속되는 시편의 일부분을 침지시키는 4가지의 실험 조건에서 매립시키지 않은 외부 설치 보조전극들을 사용, 직류 선형 분극(linear polarization), 교류 저항, 정전류 및 정전위 분극 방법으로 콘크리트 철근의 부식 특성을 측정, 비교하였다.

### 2. 실험방법

철근의 부식 측정에 사용한 전극 중 기준 전극은 Cu-CuSO<sub>4</sub> 전극으로서, ASTM C876-87에 의거 자체 제작, 사용하였으며, 전극은 포화 CuSO<sub>4</sub> 수용액이 담긴 외경이 50mm인 플라스틱 튜브, 미송(pine)으로 직경이 40mm인 플러그, 직경과 길이가 각각 6.5, 110mm인 Cu 봉으로 구성된다. 보조전극 및 분극 면적을 한정시키기 위한 guard 전극은 링 형태로 주조한 Pb 블럭이며, 보조 전극 및 guard 전극의 외경은 각각 6.1 및 9.6cm가 되도록 제작하였고 플라스틱 홀더에 매립시켜, 별도의 지지 기구 없이 사용할 수 있도록 하였다.

시편은 세멘트/물/자갈의 비가 1 : 0.5 : 3으로 섞어서 만든, 크기가 20×20×10cm<sup>3</sup>인 콘크리트 블럭이며, 철근은 9.5mm인 연강을 콘크리트 표면으로 부터 5cm 깊이에 매립하였다. 철근과

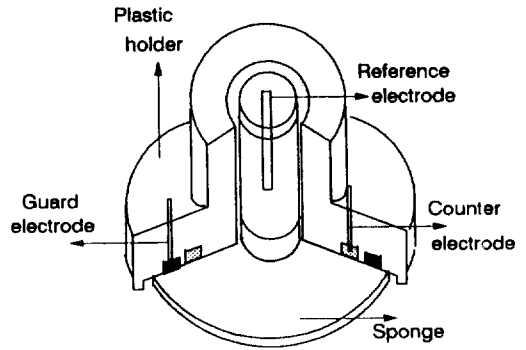


Fig. 1. Sectional view of electrode arrangement for rebar corrosion measurement.

전극들은 액상의 세제로 적신 스폰지를 통하여 전기적으로 접촉되며(Fig. 1 참조), 적심(wetting) 용액은 물에 희석한 일반 가정용 세제를 사용하였다. 철근의 부식 특성을 비교하기 위해 콘크리트 블럭을 실험실 대기(lab. air), 수도물, NaCl 1% 수용액, NaCl 3.5% 수용액등에 노출시켰고, 수용액에 위치시킨 시편들의 경우 용액의 수위를 콘크리트 높이의 1/2이하로 유지하여, 철근이 수용액에 직접 접촉되지 않도록 하였다.

직류 분극실험은 EG&G사의 273 potentiostat을 사용, 부식전위가 안정화(분당 5mV이내 변동)된 후에 측정하였으며, 분극 저항 측정시의 전위 이동 범위는 부식 전위를 기준으로 -20mV에서 +20mV까지이고, 주사 속도는 0.1mV/sec이다. 철근의 분극 면적은 보조 전극의 단면을 수직으로 투영시켜, 이에 해당되는 부분의 철근 표면적으로 계산<sup>8)</sup>하였으며, 콘크리트의 내부 저항(Rs)은 current interrupt 방법으로 제거하였다. 교류 저항(A/C impedance)은 Solatron사의 1255 frequency response analyzer를 사용, 부식 전위에서 측정하였는데, 측정시의 전위 변동폭은 10mV이고, 주파수 범위는 10<sup>-4</sup>-10<sup>5</sup>Hz이다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 2는 실험실 대기, 수도물, NaCl 1% 수용

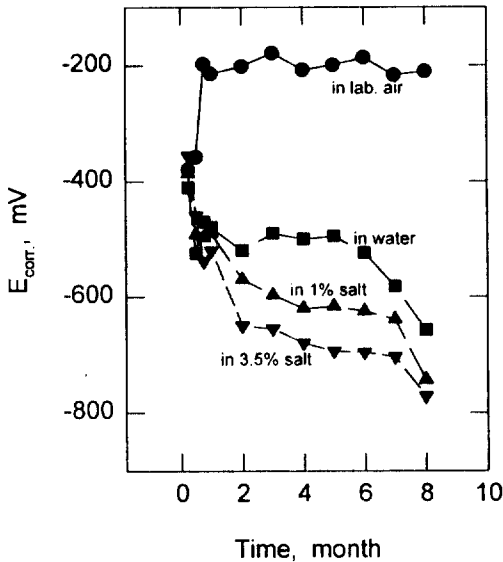


Fig. 2. Change of corrosion potential,  $E_{corr}$ , with time in concrete rebar specimens exposed to lab. air, tap water, 1% NaCl and 3.5% NaCl solutions.

액, NaCl 3.5% 수용액 등 각 부식 조건에서 7일 경과 후부터의 시간에 따른 부식전위( $E_{corr}$ )의 변화 거동을 나타내며, 4가지 조건에서 공히 초기 3개월까지는 불안정한 거동을 보이고 있으나, 이 이후 부식전위가 비교적 안정되었음을 알 수 있다. 또한 대기(실험실) 중에 유지한 시편에서는 초기부터 부식전위가 증가하기 시작하여 1개월 이후부터는  $-200\text{mV}$ 에 근접한 수준을 유지하고 변동폭도 작았으나, 다른 시편들에서는 3개월 유지 후부터 대체로 감소하는 경향을 나타내었다. 따라서 대기 중에 유지한 시편에서는 1개월 유지 후부터 ASTM C-876의 판정 기준에 의한 부식이 일어나지 않을 확률이 90% 이상으로 해석되는  $-200\text{mV}$ 에 근접하며, 나머지 시편들에서는 초기 즉 실험 시작 7일 이후부터의 측정치가  $-350\text{mV}$  보다 작아서, 위의 기준에 의해 판단해 보면 부식 발생 확률이 90% 이상인 영역에 위치하고 있다.

이 시편들을 8개월간 부식시킨 후의 부식전위값

은 실험실 대기 중에 유지한 시편에서는  $-210\text{mV}$ , 수도물에 담근 시편에서는  $-657\text{mV}$ , 그리고 1% 및 3.5% NaCl 수용액에 노출시킨 시편에서는 각각  $-744$ ,  $-772\text{mV}$ 로서, 실험실 대기 중에 유지한 시편, 수도물, 소금물에 담근 시편의 순서로 낮아졌으며, 이러한 순서는 실험 1개월 이후부터 변동없이 유지되었다. 따라서 실험실 대기 중에 유지한 시편보다는 수분의 흡수가 많은 수도물 속에 침지시킨 시편에서, 그리고 소금물의 농도가 높을수록 부식전위가 더 낮았다. 보통 수분이 많이 흡수되어 있는 시편에서의 부식전위 저하는 외부로부터 산소의 침투가 차단되어 나타난 산소 부족 상태 발생의 결과인 철근의 depassivation에 의한 것으로<sup>12)</sup> 해석되며, 이러한 경향 및 수도물에 담근 시편 보다 소금물 속에 담근 시편에서 부식전위가 더 낮아지고, 소금물의 농도에 따라 나타난 부식전위의 차이는 다른 연구 보고<sup>13)</sup>와 유사한 결과이다.

Fig. 3은 각 부식 환경에서의 직류 분극 저항( $R_p$ )의 장기적인 변화 거동을 나타내며, 4가지 조건에서의 측정값은 초기에는 큰 차이를 보이지 않으나 3개월 후부터 조건별 분극저항의 차이가 뚜렷해지는 경향을 보여주고 있다. 또한 부식이 심하지 않은 것으로 예상되는 대기 중 및 수도물에서 유지한 시편에서는 분극 저항값의 변동폭이 큰 반면, 부식이 심한 소금물에 담근 시편들에서는 변동폭이 작아 분극저항이 비교적 안정화되어 있으며, 대기 중에 유지한 시편을 제외한 모든 시편에서 시간이 경과함에 따라 분극 저항이 감소하는 경향이 나타나고 있다. 실험실 대기 중, 수도물, NaCl 1% 및 3.5% 수용액에 8개월간 노출시킨 시편에서의 분극저항은 각각  $32.5$ ,  $4.0$ ,  $0.8$  및  $0.4\text{k}\Omega$ 이며, 분극 면적을 고려하면 각각  $484.3$ ,  $59.6$ ,  $11.9$  및  $6.0\text{k}\Omega\text{cm}^3$ 이다. 철근의 분극 저항이  $50\text{k}\Omega\text{cm}^3$  이하이면 부식이 시작된 것으로,  $20\text{k}\Omega\text{cm}^3$  이하이면 부식이 심한 것으로 해석되는 기준<sup>14)</sup>을 적용하면, 대기 중 및 수도물에 유지한 시편들에서는 분극 저항

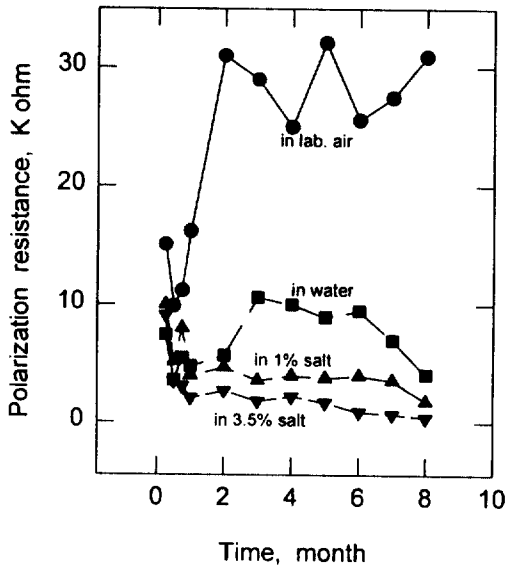
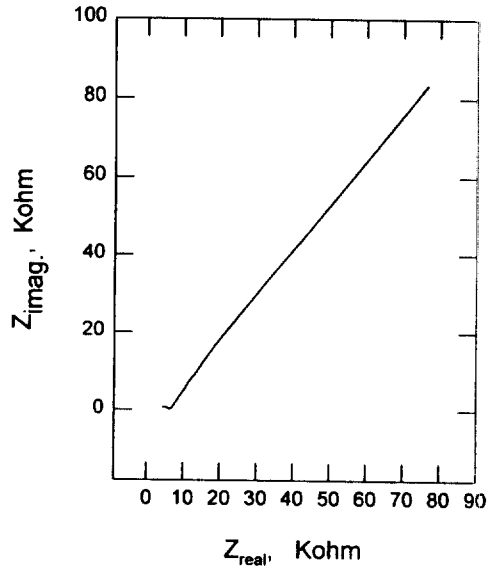
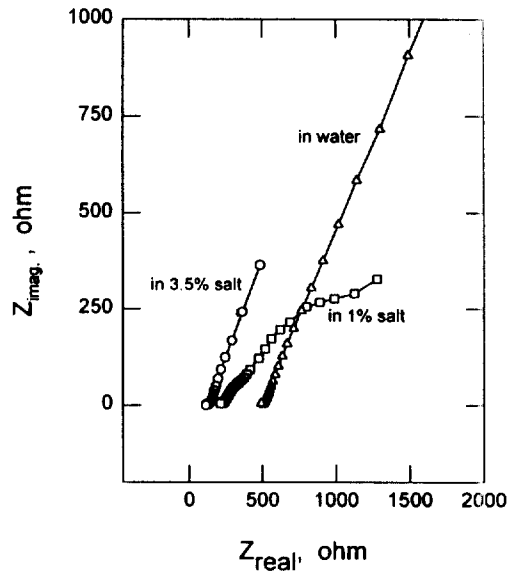


Fig. 3. Change of polarization resistance,  $R_p$ , with time in concrete rebar specimens exposed to lab. air, tap water, 1% NaCl and 3.5% NaCl solutions.

이  $50k\Omega\text{cm}^3$  이상이므로 부식이 시작되지 않은 것으로 해석되고, 소금물에 담근 시편들에서는  $20k\Omega\text{cm}^3$  이하이므로 부식이 심한 것으로 것으로 해석된다. 따라서 수도물에 담근 시편에서는 부식전위에 근거한 판정 기준을 적용하면 부식이 발생되었을 확률이 90% 이상이되나, 분극 저항 측정의 결과로부터는 부식이 시작되지 않은 것으로 해석되어 서로 상반되는 결과를 나타내며, 산소가 결핍되는 실험 조건에서도 이와 유사한 즉, 부식전위는 낮으나 부식 속도는 늦은 결과가 보고된 바 있다.<sup>12)</sup> 소금물에 담근 시편들을 비교해 보면 NaCl의 농도가 높은 3.5% 수용액에 담근 시편의 분극 저항이 1% 수용액에 담근 시편의 분극 저항의 1/2 수준이며, 전자의 수용액에서 8개월 동안 노출시킨 시편의 부식 전류밀도를  $B$ 가  $26\text{mV}^{15}$ 라고 가정하고,  $B(\text{상수}) = i_{\text{CORR}} \times R_p$  식으로 부터 계산하면, 이 시편의 부식 전류 밀도는  $4.3\mu\text{A}/\text{cm}^3$ 이고 부식 속도는 2.0 mpy 정도인데, 이 값은 mild steel의 해수에서의 부식 속도인 5 mpy보다 작은 수준이다.



(a)



(b)

Fig. 4. Nyquist plots for rebar specimens exposed for 8 months to lab. air (a), and tap water, 1% NaCl and 3.5% NaCl solutions (b).

Fig. 4는 Fig. 3에서와 동일한 시편들의 교류 저항 측정 결과의 하나인 Nyquist plot으로서

모든 시편에서 공히 주파수가 높은 영역 즉, Fig. 4의 왼쪽 부분에서는 콘크리트 양생 후에 철근의 표면에 생성하여 낮은 속도로 성장하는 얇은 막(lime layer)에 의한 것으로 보고<sup>16)</sup>되고 있는, 직경이 대략 25-1500Å의 범위이며 왼쪽 부분이 열린, 아주 작은 반원(semi-circle)이 나타났다(Fig. 4의 스케일이 커서 반원이 다소 불분명함). 이 밖의 주파수 영역에서도 모든 시편에서 공히 직경이 큰, 오른쪽이 열린 반원 형태가 나타나며, 반원의 중심은 다른 연구 보고<sup>17)</sup>에서와 같이 실수(수평)축 아래에 위치하고 있다. 완전한 반원은 부식 속도가 제일 높은 NaCl 3.5% 수용액에 8개월간 노출시킨 시편에서도 본 연구의 실험 주파수 범위인  $10^5$ - $10^{-4}$  Hz 범위에서는 관찰되지 않았으며, 이러한 경향은 Bode plot에서도 확인되었다. 즉, 주파수가 낮은 부분에서 주파수가 낮아져도 교류저항의 절대값이 변하지 않는 수평 부분(plateau)은 관찰되지 않았다. 이러한 교류저항 측정 결과는 이미 보고<sup>15,18,19)</sup>된 철근 부식의 등가 회로(equivalent circuit)로 모사(simulate)할 수 없었으며, 따라서 간단한  $R_s$  (ohmic 저항),  $R_t$  (charge transfer 저항),  $C_{dl}$  (double layer capacitance)만으로 구성된 회로로 모사하였다. 결과적으로 확산 또는 Warburg impedance를 무시하고, 주파수  $f$  또는 각속도  $\omega$ 에서 측정된 총 교류 저항  $Z$ 와의 관계로부터 다음 식에 의해  $R_t$ 를 구하여 교류 분극 저항으로 정하였다.

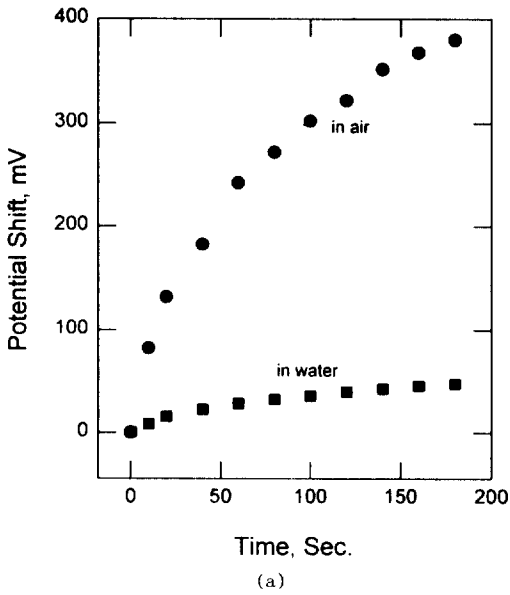
$$Z = R_s + R_t(1 - j\omega C_{dl}R_t) / [1 + (\omega C_{dl}R_t)^2]$$

분극 저항 및 ohmic 저항을 구한 결과, 분극 저항은 실험실 대기, 수도물, NaCl 1% 수용액, NaCl 3.5% 수용액에 노출시킨 시편에서 각각 78.3k, 6.5k, 0.8k, 0.7kΩ이고, ohmic 저항은 이들 조건에서 각각 18.8k, 1.7k, 0.43k, 0.17kΩ이다. 이 결과들과 앞에서의 직류 분극에 의한 결과들을 비교하면, 교류 저항법에 의한 측정 값

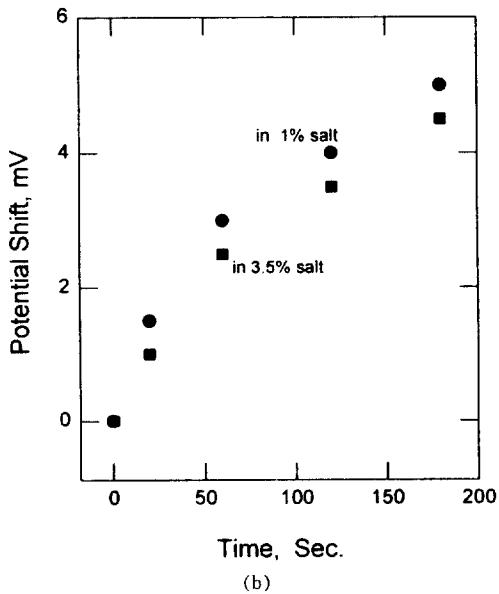
이 실험실 대기 중에서 유지한 시편에서만 2.5배 정도의 큰 차이가 났으며, 다른 조건에서는 그 차이가 비교적 작았다. 이는 부식이 진행되지 않아서 부동태막이 생성된 것으로 추정되는 실험실 대기 중에 유지한 시편을 제외하고는 앞에서와 같은  $R_s$ ,  $R_t$ ,  $C_{dl}$ 만으로 구성된 간단한 등가회로로 모사하여도 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 또한 교류 분극저항은 ohmic 저항들이 작은 시편에서 더 작았으며, 교류 분극 저항과 ohmic 저항 모두 실험실 대기, 수도물, NaCl 1% 수용액, NaCl 3.5% 수용액에 노출시킨 시편 순으로 작아졌다. 따라서 동일한 시편을 사용한 본 연구의 경우 분극 저항은 비저항(resistivity)이 큰 시편에서 더 크게되며, 이는 콘크리트의 비저항 측정만으로 철근의 부식을 정성적으로 평가하는 방법의 타당성을 확인해주고 있다.

Fig. 5는 앞에서와 같은 각 부식 환경에서 8개월간 노출시킨 시편에 5μA 인가한 초기 3분 동안의 정전류(galvanostatic) 분극 곡선으로서, 부식이 심한 NaCl 1% 및 3.5% 수용액에 노출시킨 시편들(Fig. 5(a))에서는 부식이 심하지 않은 시편들(Fig. 5(b))에 비해, 전위의 증가 속도가 더 빨리 줄어든 반면, 실험실 대기 중이나 수도물에 위치시킨 시편들에서는 전위의 증가 속도가 서서히 줄어들어 3분 동안의 분극 전 과정에서 전위가 빠른 속도로 증가하고 있음을 나타내고 있다. 따라서 본 연구의 대상인 정전류 분극 방법, 즉 일정 시간 분극 중 시간이 경과하여도 전위가 더 이상 변하지 않는 포화 전위값의 근사치와 부식전위와의 차를 인가 전류값으로 나누어 분극저항을 구하는 방법에서는 부식 속도가 낮은 시편에서는 부식 속도가 높은 시편에 비해 더 긴 분극 시간이 필요하다.

본 연구에서는 포화 전위 측정에는 긴 시간이 걸리는 점을 감안하여, 최적 분극 시간을 결정하기 위하여 분극 시간에 따른 분극저항을 측정하였다. 3분 동안 분극시킨 후의 전위 이동값을 인가 전류값으로 나눈 값을 앞에서의 직류 분극



(a)



(b)

Fig. 5. Galvanostatic polarization results for rebar specimens exposed for 8 months to lab. air and tap water (a), and 1% NaCl and 3.5% NaCl solutions (b).

저항 및 교류 저항과 비교한 결과, 교류 저항의 측정 결과와 거의 유사하였으며, 실험실 대기, 수

도물, NaCl 1% 수용액, NaCl 3.5% 수용액에 노출시킨 시편에서의 측정값은 각각 76.6k, 9.4k, 1.0k, 0.9k $\Omega$ 이다. 그러나 이 방법에서는 분극 시간 외에도 인가 전류 값에 따라 분극 저항의 변화가 크게 나타났다. 인가 전류를 10 $\mu$ A로 하고 3분 동안 분극시켰을 경우, 전위의 이동 범위, 포화 전위에 도달하는 시간 및 분극 저항 모두 크게 증가하여, 실험실 대기, 수도물, NaCl 1% 수용액, NaCl 3.5% 수용액에 노출시킨 시편에서의 측정값은 각각 673k, 215k, 1.9k, 1.0k $\Omega$ 이다. 따라서 인가 전류가 10 $\mu$ A일 경우, 실험실 대기 중 및 수도물에 유지한 시편들에서는 부식 전위로부터의 과도한 전위 이동이 나타나 시편 손상 가능성이 커짐을 알 수 있었으며, 인가 전류를 5 $\mu$ A 미만으로 낮추어 측정한 결과 부식이 심한 시편들에서의 전위 이동 범위가 너무 작아서 분극 저항의 정확한 측정이 어려웠다. 따라서 본 연구의 경우 최적 인가 전류값은 5 $\mu$ A인 데, 이 결과는 매립 전극을 사용하여 측정된 결과<sup>6</sup>와 상이하며, 결과적으로 전극의 형태/위치에 따른 최적 시험 조건의 변화에 대한 더 많은 연구가 필요한 것으로 생각된다.

Fig. 6은 Fig. 5에서와 동일한 시편들에 20mV를 인가한 정전위(potentiostatic) 분극 곡선이며, 이 분극 곡선에서는 앞의 정전류 분극 곡선에서와는 달리 시편간의 전류-시간 변화 거동의 차이가 뚜렷하지 않았다. 분극 인가 전압은 시편 손상을 피하기 위해서는 10mV 이하가 더 적절하나, 이 경우 모든 시편에서의 전류의 측정값이 1 $\mu$ A 이하로 미소하였기 때문에 20mV로 정하였으며 이러한 결과는 매립 전극을 사용하여 측정된 결과<sup>6</sup>와 다르다. 정전류 분극에서와 유사한 방법으로 인가 전류값을 3분 동안 분극 후에 측정된 전류값으로 나누어 분극 저항을 계산한 결과, 분극 저항은 실험실 대기, 수도물, NaCl 1% 수용액, NaCl 3.5% 수용액에 노출시킨 시편에서 각각 6600, 278, 246, 232 $\Omega$ 이다. 이 값들은 앞의 3가지 방법에 의해 측정된 분극

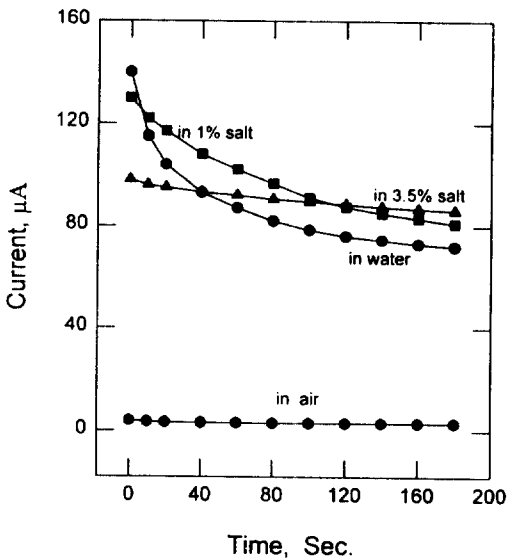


Fig. 6. Potentiostatic polarization results for rebar specimens exposed for 8 months to lab. air, tap water, 1% NaCl and 3.5% NaCl solutions.

저항 측정값들에 비해 크게 낮으며, 또한 시편들간의 분극 저항 값들의 차이도 작아서 부식이 심한 시편과 그렇지 않은 시편간의 차이가 작다. 분극 저항값은 Fig. 6의 실험실 대기중 및 NaCl 3.5% 수용액에 노출시킨 시편에서 보는 바와 같이, 시간에 따른 전류 변화폭이 작아 분극 시간을 늘려도 분극 저항은 크게 변화하지 않으며, 따라서 분극 시간과 앞에서 언급한 인가 전위의 최적값은 더 많은 연구가 필요한 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

실험실 대기 중, 수도물, 1% NaCl, 3.5% NaCl 수용액에 노출시킨 콘크리트 철근의 부식 속도를 직류 분극, 교류 저항, 정전류 및 정전위 분극 방법으로 측정, 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 철근의 부식 전위 및 직류 분극 저항은, 초기의 불안정기를 제외하고는, 부식 시간이 경과

함에 따라 실험실 대기 중에서 유지한 시편에서는 증가한 경향을, 다른 3 종의 시편에서는 감소하는 경향을 보여주었다.

2. 교류 저항의 측정 결과, 모든 시편에서 중심이 실수축 아래에 위치한 2개의 반 원이 고주파 및 저주파 영역에서 나타나며, 확산을 무시한 간단한 등가회로로 모사한 결과 대기중에 유지한 시편을 제외하고는 직류 분극 저항에 근접되는 측정 결과를 얻었다.

3. 포화 전위에 근거한 정전류 분극법(5 $\mu$ A, 3분)으로 분극 저항을 측정한 결과, 교류 저항과 거의 유사한 값들을 얻을 수 있었으나 인가 전류의 크기에 따른 분극 저항의 차이가 크게 나타났다.

4. 정전위 분극(20mV, 3분) 후의 전류값으로부터 분극 저항을 구한 결과, 분극 저항은 직류 분극, 교류 저항, 정전류 분극 방법에 의해 측정된 값들에 비해 낮았으며, 시편들간의 분극 저항 값들의 차이도 작게 나타났다.

#### References

1. E. Escalante, S. Ito and M. Cohen, Qiu, NIST report NBSIR 80-2012 (1980).
2. A. Sehgal, D. Li, Y.T. Kho, K. Osseo-Asare and H.W. Pickering, Corrosion, Vol. 48, No. 9, 706 (1992).
3. J. A. Gonzalez, W. Lopez and P. Rodriguez, Corrosion, Vol. 49, No. 12, 1004 (1993).
4. S. R. Yeomans, Corrosion, Vol. 50, No. 1, 72 (1994).
5. K. Videm, J. Lehrmann and R. Mydral, Proc. NACE Int'l Conf., Grado, Italy, 281 (1995).
6. P. Rodriguez, E. Ramirez and J. A. Gonzalez, Mag. of concrete research, Vol. 46, No. 167, 81 (1994).
7. J. Flis, S. Sabol, A. Sehgal, K. Osseo-Asare and P. D. Cady, Corrosion, Vol. 49, No. 7, 601 (1993).
8. E. Escalante, E. Whinton and F. Qiu, NIST re-

- port NBSIR 86-3456 (1986).
9. S. Feliu, J.A. Gonzalez, M.C. Andrade, Proc. NACE, Corrosion/87, 236 (1987).
  10. B. Elsener and H Bohni, ASTM STP 1065, 143 (1990).
  11. C. Andrade, 13th ICC proceedings, paper No.3, Melbourne, Australia (1996).
  12. H. Arup, Electrochem. and Corr. Newslett, No. 2, 8 (1979).
  13. C. E. Locke and M. D. Boren, Proc. NACE, Corrosion/87, 117 (1987).
  14. N. S. Berke, NACE corrosion 85, paper 273, Houston, TX (1985).
  15. M. S. Stern and A. J. Geary, J. Electrochem. Soc., vol. 105, No. 638 (1958).
  16. D. E. John, P.C. Searson and J. L. Dawson, British Corrosion J., vol. 16, No. 2, 102 (1981).
  17. F. Wenger and J. Galland, Mat. Sci. Forum, Vol 44 & 45, 375 (1989).
  18. F. Wenger, J. Galland and O. Azou, C. R. Acad. Sci. Paris 291, series C, 149 (1980).
  19. C. J. Newton and J. M. Sykes, Corrosion: Science, Vol28, No 11, 1051 (1988).