

전기화학적 부식측정기법을 이용한 철근 콘크리트의 부식특성평가

이 수 열 · 이 재 봉
국민대학교 공과대학 금속재료공학부

Application of Electrochemical Corrosion Measurement Techniques for Rebars in Concrete

Su Youl Yi and Jae Bong Lee

School of Metallurgy & Materials Engineering, Kookmin University,
Seoul 136-702, Korea

Rebar corrosion in concrete containing chloride ions and calcium nitrite inhibitors was investigated. First, rebar corrosion was accelerated by applying the impressed constant voltage to rebars in concrete. Effects of chloride contents and inhibitors on rebar corrosion were evaluated by the accelerated corrosion technique. The method is to measure the time to crack initiation of reinforced concrete by applying constant voltage between rebars and the stainless steel cathode in short period. Second, the rebar corrosion in concrete was investigated by free-corrosion tests in long period, measuring corrosion potentials and corrosion currents by using the linear polarization and a.c. impedance measurements. Third, macrocell and microcell corrosion of reinforcing steels in concrete were examined. Macrocell corrosion was evaluated by measuring galvanic currents between rebars in concrete contaminated by chloride ions and those in concrete without any chloride ions and microcell corrosion was investigated by measuring polarization resistance, R_p . The effects of chloride ions and inhibitors on macrocell and microcell corrosion were analyzed.

Keywords : rebar, calcium nitrite, impressed potential, microcell, macrocell, polarization resistance.

1. 서 론

콘크리트 내부의 철근은 알칼리성 분위기(pH 12.5이상)를 가짐으로써 강 표면에 부동태 피막을 형성시켜 뛰어난 내식성 분위기를 제공한다. 또한 콘크리트의 낮은 투과율은 부식을 야기시키는 물질들의 투과를 극소화하고 높은 전기저항성은 전기화학적 전류의 흐름을 막아 콘크리트 내 철근의 부

식을 억제하게 된다. 이러한 화학적, 물리적 보호특성을 지닌 콘크리트는 몇 가지 요인에 의해 그 보호적 기능을 상실하게 된다. 첫째는 대기중의 이산화탄소의 유입에 의한 콘크리트의 중성화, 그리고 해사 및 동결기 제설제 등의 사용에 의해 유입되는 염소이온이 그 두 번째 요인이다. 특히 콘크리트 내에 염소이온의 침투는 부동태 피막을 파괴하여 공식(pitting)의 형태로 부식을 유발함으로써 철근의

단면적 감소와 무게감량을 일으킨다. 일단 철근이 부식되면 초기에 비해 약 4배 이상의 체적 증가를 가져오게 되어 콘크리트 구조물의 균열을 가져오며 이러한 균열은 부식에 필요한 산소, 수분 및 염분의 침투를 더욱 용이하게 하여 철근의 부식속도를 가속화시킴으로서 구조물의 안전성 및 수명에 심각한 영향을 초래하게 된다. 이러한 부식현상을 방지하기 위하여 ① 철근표면을 에폭시 수지로 코팅하는 방법,¹⁻³⁾ ② 콘크리트의 피복두께를 증가시키는 방법,⁴⁾ ③ 철근 표면을 아연 코팅하는 방법,^{5,6)} ④ 부식억제제를 첨가하는 방법,⁷⁻⁹⁾ ⑤ 콘크리트에 플라이애쉬, 슬래그 등을 첨가하는 방법,¹⁰⁻¹²⁾ ⑥ 철근의 음극방식법,¹³⁻¹⁵⁾ 등을 사용하는 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 이러한 부식현상을 방지하기 위하여 염화물을 함유한 철근 콘크리트에 calcium nitrite 부식억제제의 농도변화를 변수로 하여 제작한 공시체와 철근 표면을 에폭시 수지로 코팅한 후 1%의 damage를 가한 철근을 사용하여 제작한 공시체에 정전압을 인가하여 콘크리트의 균열발생시점을 측정하는 부식촉진실험과 침지시간이 경과함에 따른 부식전위측정과 선형분극시험법을 통하여 분극저항(R_p)을 측정하는 침지실험, 그리고 공시체 내의 염소이온농도 차이를 형성한 마크로 및 마이크로 셀 부식실험 등을 통하여 콘크리트내 철근의 부식특성에 미치는 염화물 및 부식억제제의 영향과 에폭시 수지의 방지기능을 평가, 비교하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 공시체 제조

정전압기법(constant voltage method)에 의한 부식촉진실험과 자연전위에서의 침지실험을 위하여 사용한 철근 콘크리트 공시체는 Fig. 1(a)과 같이 직경 10 cm, 높이 20 cm의 원형 몰드를 이용한 lollipop 공시체로서 직경 13 mm 철근을 중앙에 매입하여 제작하였다. 콘크리트에 첨가된 NaCl의 농도는 잔골재(모래)를 기준으로 하여 0.04, 0.2, 및 2.0 wt%이며, 부식억제제인 calcium nitrite의 양을 0, 3, 및 10 kg/m³으로 변화시켜 첨가하였다. 콘크리트의 배합은 제1종 포틀랜드 시멘트와 최대치수 25

mm의 굵은 골재, 그리고 잔골재(모래)와 물을 혼합하였으며, 콘크리트의 강도(28일 강도)는 물/시멘트 비를 조절하여 210 kg/cm²로 하였고, 동일조건 의 공시체를 각각 3개씩 제작하였다. 철근 표면을 에폭시 수지로 코팅한 경우 전기적 접촉을 위해 인위적으로 철근면적의 1%의 damage를 주어 공시체를 제작하였다.

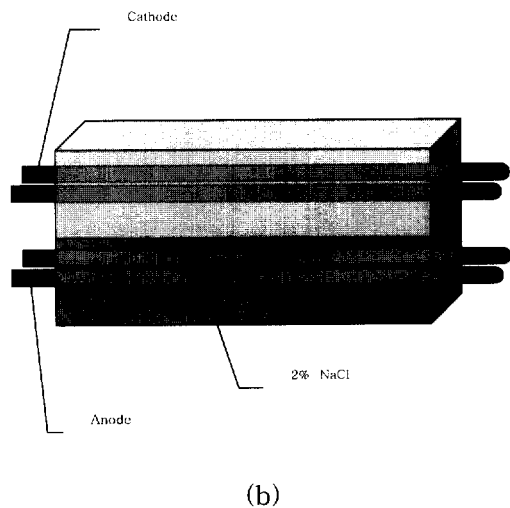
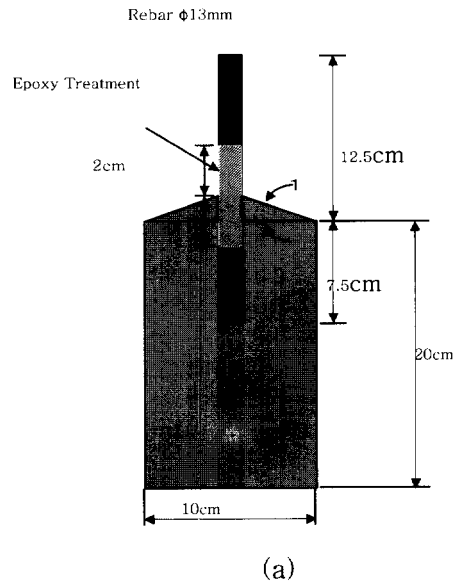


Fig. 1. Schematic of concrete samples : (a) lollipop-like specimen for accelerated corrosion test and ; (b) slab specimen for macro and micro cell corrosion test.

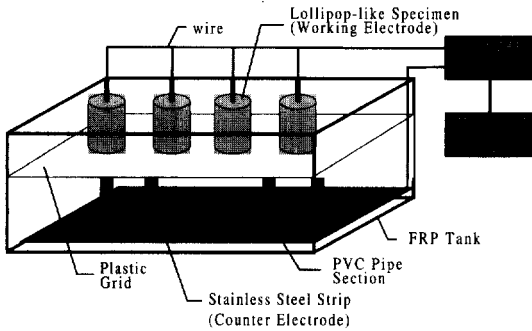


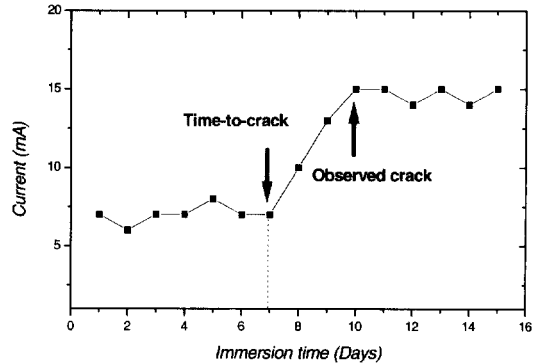
Fig. 2. Schematic diagram of accelerated corrosion test apparatus.

마크로 및 마이크로 셀 실험용 공시체는 $15 \times 20 \times 40$ cm의 직육면체의 형태로 직경 19 mm 철근 4개를 Fig. 1(b)과 같이 상부와 하부에 각각 2개씩 공시체 내부에 매입하였다. 공시체의 상부에는 염분을 첨가하지 않았으나, 하부에는 잔골재 량을 기준으로 2.0 wt%의 염분을 첨가하여 부식이 하부에 집중되도록 하였으며, 부식억제제인 calcium nitrite의 첨가량은 0, 3, 6 kg/m^3 으로 변화시켰으며, 모든 콘크리트 공시체는 100 % 습도 분위기에서 28일 동안 양생하여 2일간 건조 후 모사 해수용액(3.5 wt% NaCl)에 침지하여 실험을 실시하였다.

2.2 전기화학적 부식실험

본 연구에서 실시한 부식촉진 실험은 Fig. 2와 같이 lollipop 공시체를 3.5 wt% NaCl 수용액에 침지 후 작용전극인 철근과 보조전극인 스테인리스강판 사이에 D.C. 6 V를 인가함으로써 철근의 부식을 촉진시켜 콘크리트에 균열이 발생하는 시점(time-to-crack)을 측정하여 콘크리트 내에 함유된 염화물 및 부식억제제의 특성과 에폭시 코팅철근의 부식특성을 단기간 내에 평가하는 시험법이다.¹⁶⁾

철근이 부식되면 부식생성물에 의해 체적이 팽창하므로 콘크리트에 균열이 발생하며 이러한 균열을 통하여 부식에 필요한 산소, 수분, 및 염소이온 등의 침입이 용이하게 되면 두 전극 사이에 흐르는 전류 값이 Fig. 3(a)와 같이 증가하게 된다. 이와 같이 전류 값이 큰 폭으로 증가하는 시점이 콘크리트에 균열을 생성시키는 시점(time-to-crack)이며 실제로 전류 값이 상승되고 3~5일 후 콘크리트의 균



(a)



(b)

Fig. 3. (a) Plot of current variations obtained for the constant impressed voltage method ; (b) cracked specimen during an accelerated corrosion test.

열을 Fig. 3(b)와 같이 육안으로 관찰할 수 있었다.

침지실험은 침지기간이 경과함에 따라 부식전위 및 분극저항의 변화특 장기간 동안 측정하였으며, 기준전극은 포화카로멜전극(saturated calomel electrode : SCE), 보조전극은 흑연전극, 작용전극에는 lollipop 공시체에 매입된 철근을 사용하였다. 선형분극시험법(linear polarization Method)은 개방전위(open circuit potential)에서 안정화시킨 후 이 개방전위를 기준으로 -10 mV부터 10 mV까지 주사속도는 0.3 mV/sec로 연속적으로 인가하여 분극저항을 측정하였다. 측정된 분극저항(Rp)값은 Stern-Geary equation²⁴⁾을 이용하여 부식전류밀도를 산출함으로써 콘크리트 내에 변수로 첨가된 염소이온의 농도, 부식억제제의 종류, 그리고 에폭시 코팅철근

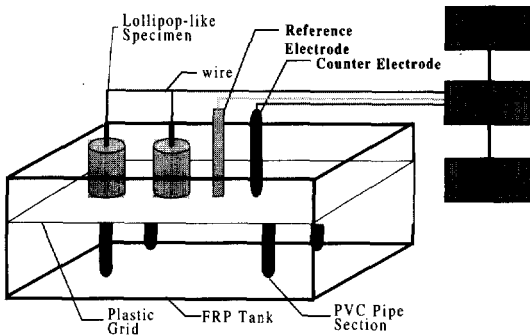


Fig. 4. Schematic diagram of immersed corrosion test apparatus.

의 부식저항성을 평가하였다. 교류 임피던스 실험은 부식전위가 안정화 될 때까지 유지한 후 부식전위에서 진폭은 10 mV, 주파수는 10^4 Hz에서 10^{-3} Hz까지의 범위에서 실시하였으며, 각각의 실험에서는 Fig. 4와 같이 모두 potentiostat (Gamry Model CMS 105)와 computer로 제어하였다.

마이크로 셀 및 마이크로 셀 부식실험은 침지시간이 경과함에 따라 갈바니 전류의 측정과 선형분극 시험법, 그리고 교류 임피던스 법을 실시하였다. 염분농도가 서로 다른 상부과 하부철근의 갈바니 전류를 ZRA(zero resistance ammeter)를 통하여 1시간 동안 측정하여 마이크로 셀 부식전류를 측정하였고, 선형분극법과 교류 임피던스 법을 실시하여 마이크로 셀 부식전류를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

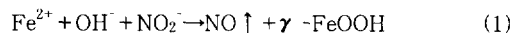
3.1 부식억제제의 영향

3.1.1 부식촉진실험

부식억제제(calcium nitrite)의 함량이 콘크리트 내 철근의 방식에 미치는 영향을 규명하기 위하여 염소이온농도를 0.04, 0.2 wt%로 고정하고, calcium nitrite의 첨가량을 0, 3, 10 kg/m³으로 변화시켜 제작한 공시체에 부식촉진실험을 행하고 그 결과를 Fig. 5에 도시하였다.

Fig. 5(a)는 calcium nitrite가 첨가되지 않은 공시체의 촉진실험의 결과로서 염소이온 농도가 0.04 wt%인 경우 10일, 그리고 0.2 wt%일 때는 6일 경

과 후 콘크리트 표면에 균열을 관찰할 수 있었다. 따라서 공시체내에 첨가된 염소이온농도의 증가가 콘크리트의 균열발생시점을 단축시키는 것을 확인할 수 있었으며, calcium nitrite가 10 kg/m³첨가된 Fig. 5(c)에서는 각각의 염소이온농도(0.04, 0.2 wt%)에서 공시체의 균열생성시점을 연장하여 부식억제제의 첨가가 철근의 부식을 억제하는 효과를 나타내었지만, calcium nitrite가 3 kg/m³첨가된 Fig. 5(b)의 경우 calcium nitrite가 첨가되지 않은 Fig. 5(a) 보다 콘크리트에 균열생성시점을 단축시켰다. 따라서 철근의 방식을 목적으로 첨가된 calcium nitrite의 양이 3 kg/m³일 경우 오히려 부식을 촉진시키는 결과를 나타내었다. 이것은 일반적으로 콘크리트의 부식에서 가장 큰 영향을 미치는 인자는 세공용액(pore solution)내의 수산화이온(OH⁻) 농도에 의한 pH이므로 염소이온이 침투하지 않는 경우 pore solution의 pH는 약 12.5이상의 강알칼리성 분위기로 내부에 존재하는 철근은 부식되지 않는다. 하지만, 염소이온이 공시체내의 세공용액(pore solution)에 침투하게되면 철근표면의 부동태피막을 공식(pitting)의 형태로 파괴하며, 세공용액 내의 pH 저하로 인하여 철근의 부식을 더욱 가속시키게 된다. 이의 방식방법으로 첨가된 calcium nitrite는 콘크리트 내 양극(anodic)에서 염소이온과 경쟁적으로 ferrous ions(Fe²⁺)와 반응하여 (1)식과 같이 철근 표면에 보다 안정된 산화피막인 ferric oxide(γ -FeOOH)을 형성하므로 철근은 부식으로부터 방지된다.¹⁷⁾



따라서 nitrite 이온은 함유된 염소이온에 앞서서 비교적 안정한 피막을 형성하지만, 첨가된 nitrite 이온의 농도가 철근의 부동태화에 필요한 한계량 이하로 적을 경우 ferrous oxide (Fe(OH)₂) 피막이 염소이온(Cl⁻)과 반응하여 soluble complex, [FeCl]_x를 형성하여 철근의 부식이 가속화되는 것을 알 수 있다.

철근 표면을 예폭시 수지로 코팅한 경우는 Fig. 5(d)와 같이 공시체내에 2.0 wt% NaCl을 첨가하여도 실험 종료시까지 균열을 발생시키지 않았고,

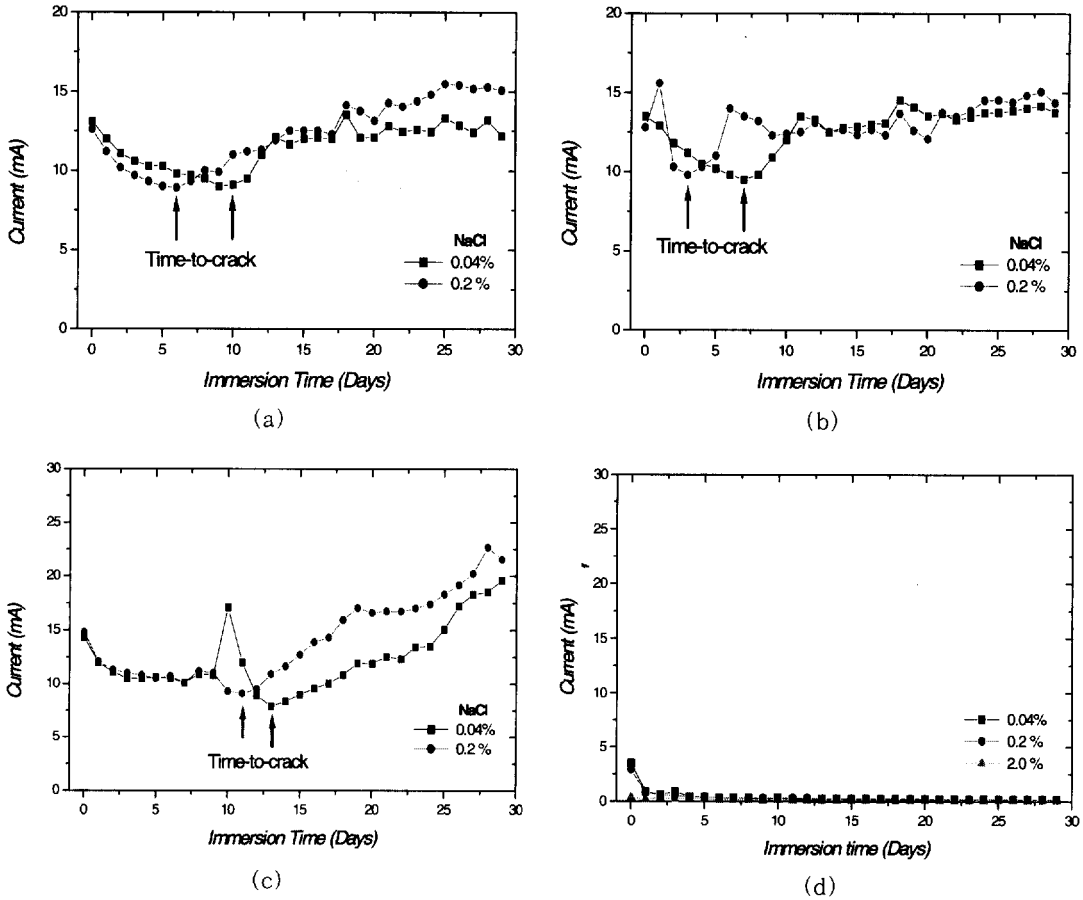


Fig. 5. Plot of current variations obtained from the accelerated corrosion tests by the constant impressed voltage method : (a) control (no calcium nitrite) ; (b) calcium nitrite of 3 kg/m³ ; (c) calcium nitrite of 10 kg/m³

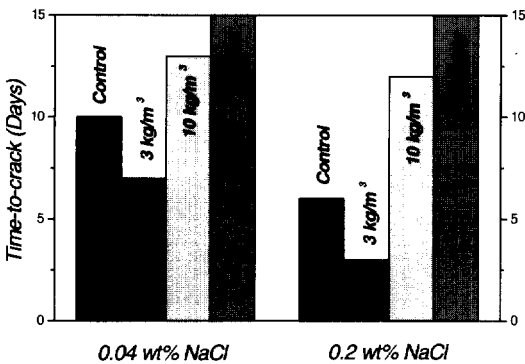


Fig. 6. Comparison of rebars embedded in chloride contaminated concrete with various calcium nitrite contents and epoxy coated rebars with chloride contaminants in terms of time-to-crack

매우 낮은 전류가 측정되어 본 연구에서 실시한 부식촉진실험(constant voltage method)결과 우수한 부식저항성을 나타내었다. Fig. 6은 염소이온의 농도와 부식억제제의 첨가량에 대한 균열의 발생시점을 도시한 결과인데, calcium nitrite의 첨가량에 따라 철근의 부식이 억제되거나 또는 촉진됨을 확인할 수 있었다.

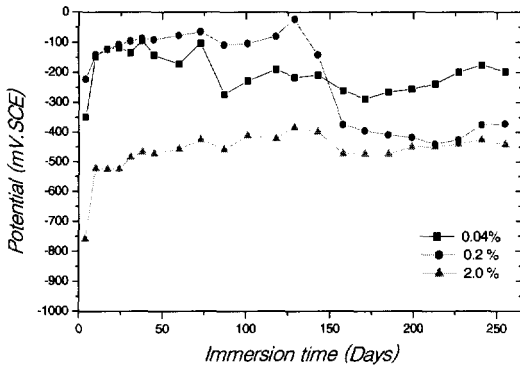
3.1.2 침지실험

Fig. 7은 전위를 인가하지 않은 염수 환경하에서 염화물 및 부식억제제를 함유한 콘크리트 내에 존재하는 철근의 부식가능성을 고찰하고자 침지기간이 경과함에 따른 부식전위를 측정하였다. 침지실험에서는 염소이온의 농도를 2.0 wt%까지 첨가하여

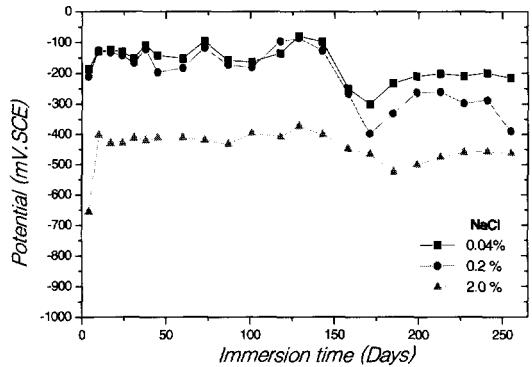
보다 심각한 부식환경에서 부식억제제의 영향을 평가하였다. 실험결과 콘크리트 내에 첨가된 부식억제제의 양에 관계없이 염소이온의 농도가 증가함에 따라 순차적으로 부식전위가 감소하는 경향을 보였고, 염소이온의 농도가 2.0 wt%인 경우 침지 실험 초기부터 약 -500 mV_{SCE}의 매우 낮은 전위 값을 나타내었다. 10 kg/m³의 calcium nitrite가 첨가된 Fig. 7(c)는 염소이온의 농도가 0.04, 0.2 wt%인 경우 촉진실험의 결과와 유사하게 높은 전위를 유지하였고, 2.0 wt%의 농도에서도 비교적 높은 부식전위를 나타내었다. 그러나, 3 kg/m³의 calcium nitrite가 첨가된 Fig. 7(b)은 calcium nitrite를 첨가하지 않은 Fig. 7(a)와 비교하여 별다른 차이를

나타내지는 않았다. 에폭시 코팅철근을 사용한 Fig. 7(d)의 경우 공시체 내에 함유된 염소이온의 농도가 0.04, 0.2 wt% NaCl에서는 -100 mV_{SCE}의 높은 부식전위가 측정되었으나, 2.0 wt% NaCl이 첨가된 공시체에서는 calcium nitrite를 각각 3, 10 kg/m³ 첨가한 Fig. 7(b),(c)보다 상대적으로 낮은 값이 측정되어 염소이온에 의한 철근의 부식이 예상되었다.

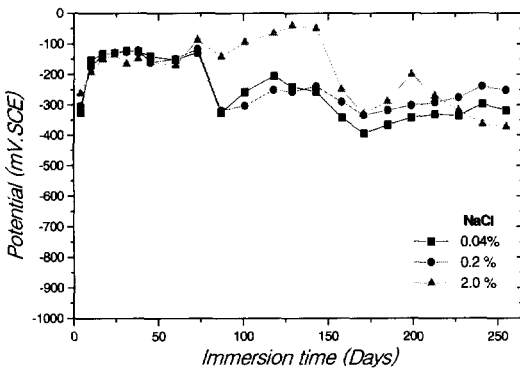
ASTM C 876¹⁸⁾에 의하면 콘크리트 내에 철근의 부식전위가 -270 mV_{SCE}보다 낮은 값을 나타낼 경우 90 %이상의 부식가능성이 있다고 제안되고 있다. 그러나, C. Dehghanian¹⁹⁾ 등은 -500 mV_{SCE}이하의 부식전위 값이 측정된 공시체를 대상으로 선형



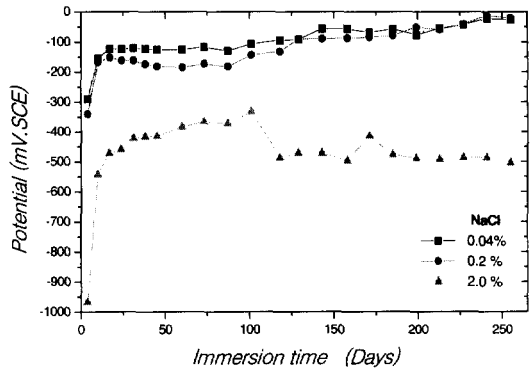
(a)



(b)

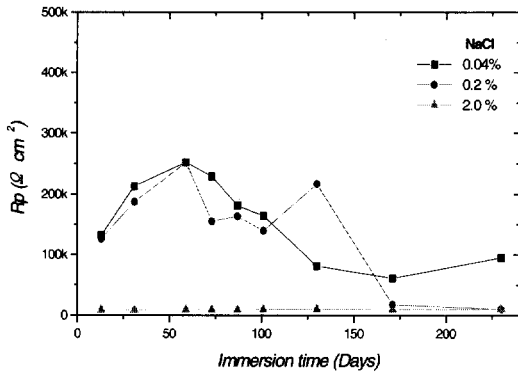


(c)

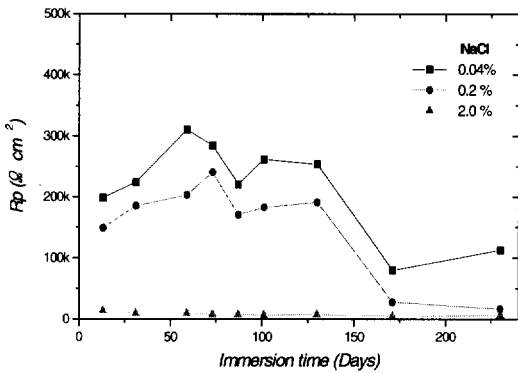


(d)

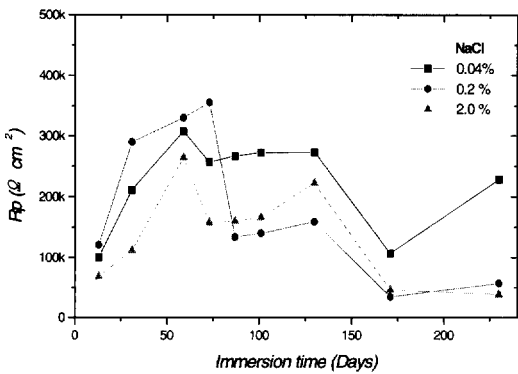
Fig. 7. Plots of corrosion potential variations vs. time obtained from the immersion tests (free-corrosion) using rebars embedded in concrete with various chloride contaminants and the addition of (a) calcium nitrite of 0 kg/m³, (b) calcium nitrite of 3 kg/m³, (c) calcium nitrite of 10 kg/m³, and (d) the epoxy coated rebars in various chloride contaminated concrete.



(a)



(b)



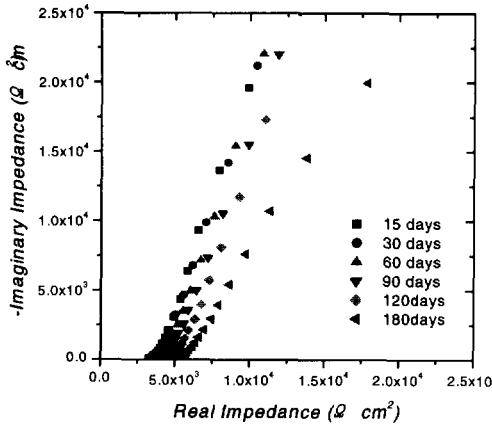
(c)

Fig. 8. Plots of polarization resistance variations vs. time obtained from the immersion tests (free-corrosion) using rebars embedded in concrete with various chloride contaminants and the addition of (a) calcium nitrite of 0 kg/m³, (b) calcium nitrite of 3 kg/m³, (c) calcium nitrite of 10 kg/m³.

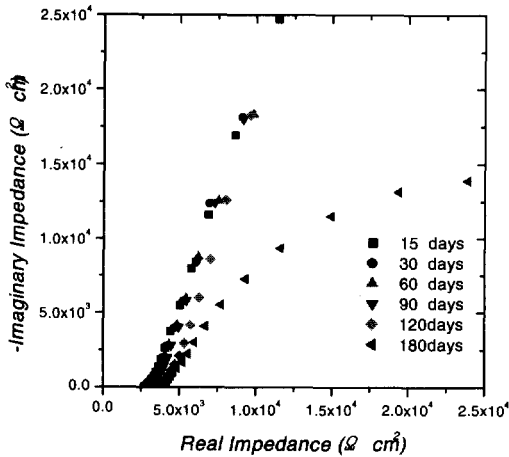
분극시험법과 타펠외삽법으로 산출한 부식속도 측정결과 0.4 mpy(mils per year) 이하의 매우 낮은 값을 보이므로 부식전위가 낮은 값을 가지더라도 반드시 부식속도가 빠른 것을 나타내는 것은 아니며, 특히 Shamim²⁰⁾은 공시체가 수용액 내에 완전히 침지된 상태에서 이와 같은 현상은 현저하게 나타난다고 주장하였다. R. Browne²¹⁾과 C. Preece²²⁾ 등에 의하면, 수용액 내의 산소농도는 대기 중에서 보다 상대적으로 적기 때문에 제한된 산소의 확산에 의하여 측정된 전위는 보다 낮은 값을 나타내는 것이라 주장하였다. 따라서 본 실험에서는 3.5 wt% NaCl 수용액에 침지한 철근 콘크리트의 부식속도를 정량적으로 측정하기 위하여 선형분극시험법을 사용하여 분극저항(Rp)을 측정하여 Fig. 8에 나타내었다. 부식전위의 측정결과와 일치하여 염소이온이 증가함에 따라 분극저항의 감소를 관찰할 수 있었다. 10 kg/m³의 calcium nitrite가 첨가된 Fig. 8(c)는 염소이온농도가 0.2, 2.0 wt%에서 비교적 높은 분극저항 값을 보이는 반면, 3 kg/m³의 calcium nitrite가 첨가된 Fig. 8(b)의 경우 부식억제제가 첨가되지 않은 Fig. 8(a)과 유사한 분극저항 값을 나타내었으며 2.0 wt%의 농도에서는 매우 낮은 값을 보였다. Berke등에 따르면 콘크리트 속에 매입된 철근의 분극저항이 66000 Ωcm² 보다 큰 값을 보이면 약 0.4 μA/cm²의 매우 낮은 부식속도를 갖는다고 보고하고 있다.²³⁾ 따라서 본 실험에서 측정된 분극저항은 염소이온 농도가 2.0 wt%로 과포화된 공시체를 제외하고 침지 후 100여일 경과할 때까지 100000 Ωcm²이상의 분극저항(Rp) 값을 나타내므로 매우 낮은 부식속도임을 알 수 있었다.

3.2 염소이온 농도의 영향

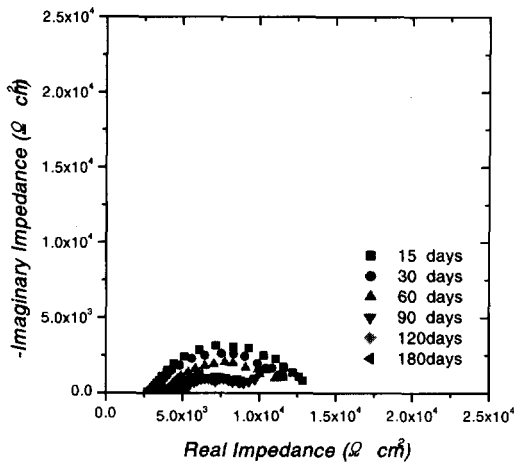
Fig. 9는 공시체에 함유된 염소이온농도의 영향을 고찰하고자 calcium nitrite의 양을 3 kg/m³으로 고정하고, 침지기간이 경과함에 따라 측정된 결과를 Nyquist plot으로 도시한 것이다. 0.04 wt%와 0.2 wt% NaCl을 함유한 공시체는 침지 후 180일 경과한 시점에서 순차적으로 분극저항이 감소하는 것을 관찰할 수 있었으며, 2.0 wt% NaCl이 첨가된 공시체는 초기부터 매우 낮은 분극저항 값이 측정되어 Fig. 8의 선형분극시험법과 일치하는 결과



(a)



(b)



(c)

Fig. 9. Impedance spectra in Nyquist plot of the rebar concrete with the variation of chloride content : (a) 0.04 wt% NaCl ; (b) 0.04 wt% NaCl ; (c) 2.0 wt% NaCl.

를 나타내었다.

Fig. 10은 선형분극법과 교류 임피던스 법을 이용하여 측정된 침지실험의 결과를 식 (3.2)와 같이 Stern-Geary equation²⁴⁾을 이용하여 부식전류밀도를 산출하여 도시한 결과이다.

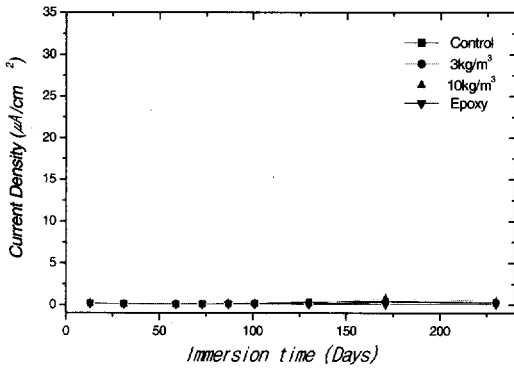
$$I_{corr} [A/cm^2] = B[V] / Rp[\Omega cm^2] \quad (2)$$

$$B = 26 [mV]^{25)}$$

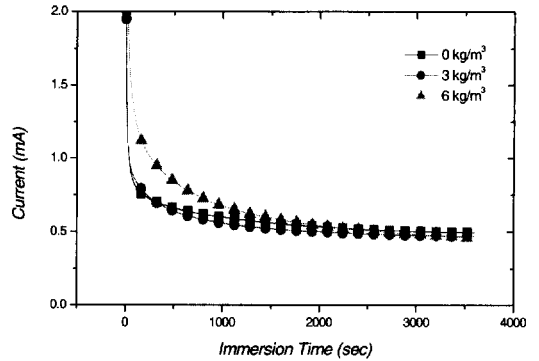
함유된 염소이온농도가 증가함에 따라 부식전류밀도의 증가를 가져왔으며, 2.0 wt% NaCl이 함유된 공시체의 경우 첨가된 calcium nitrite 양이 3 kg/m³일 때는 부식억제제가 첨가되지 않은 공시체 보다 높은 값이 측정되었고, 10 kg/m³이 첨가된 공시체가 가장 낮은 부식전류밀도 값을 유지하는 반면, 1 %의 damage를 부여한 에폭시 코팅철근은 black rebar의 경우 보다 10배 이상의 빠른 속도로 부식되는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 black rebar에서 발생하는 균일부식과는 달리 에폭시 코팅철근의 경우 노출된 부위에서 국부적으로 빠르게 부식이 진행되는 것 때문으로 판단된다.

3.3 매크로 및 마이크로 셀 부식특성

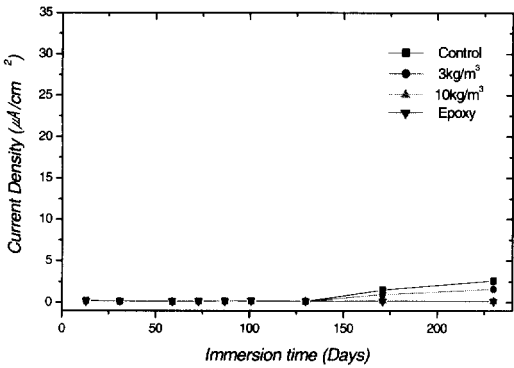
Fig. 11은 염분농도의 차이를 형성한 상부와 하부철근의 매크로 셀 전류를 구하기 위하여 부식억제제의 함량을 0, 3, 6 kg/m³으로 변화시켜 ZRA (Zero Resistance Ammeter)를 이용하여 갈바니 전류를 측정된 결과이다. Fig. 11(a)는 3.5 wt% NaCl 수용액에 침지후 1일이 경과한 시점에서 측정된 갈바니 전류의 결과로 변수로 첨가된 부식억제제의 함량에 관계없이 모든 공시체에서 동일하게 약 0.5 mA의 전류를 나타내어 부식억제제의 효과를 침지 초기부터 관찰할 수는 없었으나, 35일이 경과된 Fig. 11(b)에서 부식억제제가 첨가되지 않은 공시체는 약 1.0 mA로 갈바니 전류가 크게 상승하여 하부철근의 부식이 빠르게 진행되는 것을 관찰할 수 있었다. 부식억제제가 6.0 kg/m³ 첨가된 공



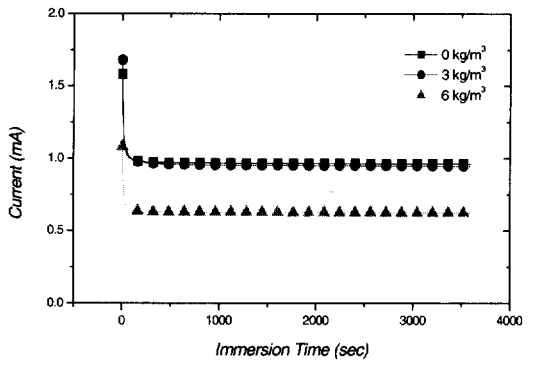
(a)



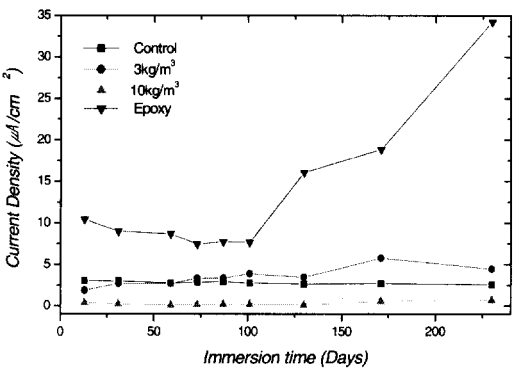
(a)



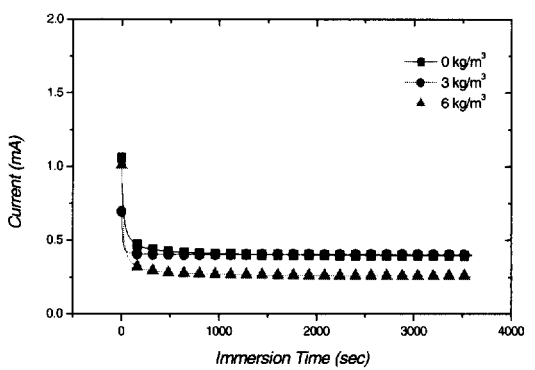
(b)



(b)



(c)



(c)

Fig. 10. Plots of current density variation of specimens with the variation of chloride content: (a) 0.04 wt% NaCl ; (b) 0.04 wt% NaCl ; (c) 2.0 wt% NaCl.

Fig. 11. Plots of galvanic current variations of specimens with immersion time span: (a) after 1 day ; (b) after 35 days ; (c) after 120 days.

시체의 전류는 0.6 mA로 침지 시간이 경과함에 따라 갈바닉 전류의 증가폭이 매우 적게 나타났으나 부식억제제의 첨가량이 3.0 kg/m³일 경우, 부식억제제가 첨가되지 않은 공시체와 유사한 전류 값을 나타내었다. 120일이 경과된 Fig. 11(c)에서는 부식억제제 첨가량(0, 3.0, 6.0 kg/m³)에 관계없이 모든 공시체에서 35일이 경과된 시점에서 측정된 Fig. 9(b) 보다 적은 값의 갈바닉 전류가 측정되었는데, 이것은 침지 초기에 2.0 wt%의 NaCl이 존재하는 하부철근의 부식으로 상부철근과 갈바닉 영향으로 전류 값이 증가하지만, 120일이 경과된 시점에서는 상부철근까지 부식이 발생되어 하부철근과의 상대적인 갈바닉 전류 값이 감소하는 경향을 나타내는 것으로 판단된다.

Fig. 12는 매크로 및 마이크로 셀 부식 전류밀도의 측정결과를 도시한 것이다. Fig. 12(a)는 염분농도의 차이를 형성한 상부와 하부철근의 갈바닉 전류를 측정하여 매크로 셀 부식전류밀도를 측정된 결과로 부식억제제의 첨가량에 따라 약간의 차이는 있으나, 침지 후 약 14일이 경과할 때까지 매크로 셀 부식속도는 증가하다가 이후 계속적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 Fig. 11의 결과와 마찬가지로 초기에 염소이온이 존재하는 하부철근의 부식으로 그 속도는 증가하였으나, 이후 시간이 경과함에 따라 상부철근의 부식으로 하부와의 갈바닉 전류 값이 감소하는 것으로 판단된다. 따라서 염소이온이 존재하는 하부철근의 부식속도가 감소하는 것이 아니라, 상부철근과의 상대적인 차이가 감소하는 것으로 해석할 수 있다.

Fig. 12(b)는 선형분극시험법을 이용한 분극저항의 측정으로 마이크로 셀 부식속도를 측정하기 위하여 부식전류밀도를 산출하였다. 마이크로 셀 부식속도는 첨가된 부식억제제의 양에 따라서 하부철근의 부식특성이 명확하게 측정되었으며, calcium nitrite 양이 3 kg/m³ 인 시험체는 침지기간이 경과함에 따라 큰 폭으로 증가하여, 약 200일 후 3-4 배 빠른 부식속도를 나타내었으며, 6 kg/m³인 경우 매우 적은 속도가 측정되어 부식억제제의 첨가량 증가에 따라 하부철근이 방지됨을 알 수 있었다.

이와 같은 매크로 및 마이크로 셀 부식실험결과 철근의 부식에 미치는 매크로 및 마이크로 셀 부식

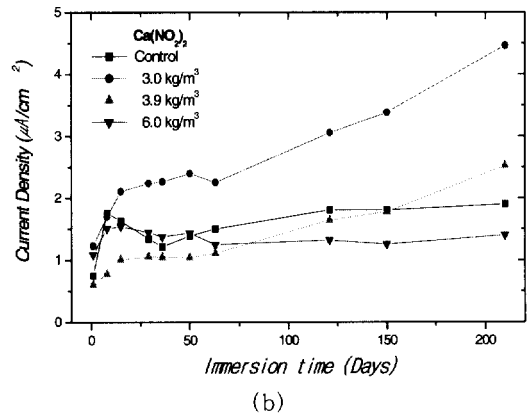
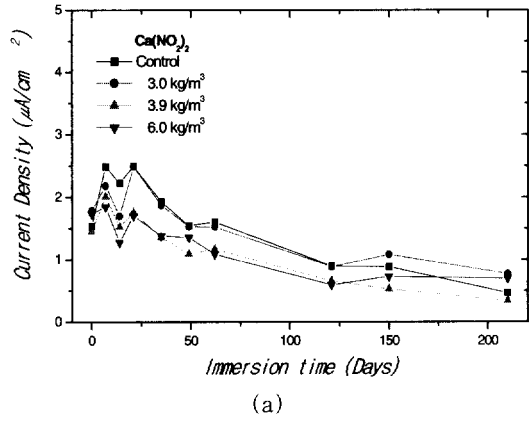


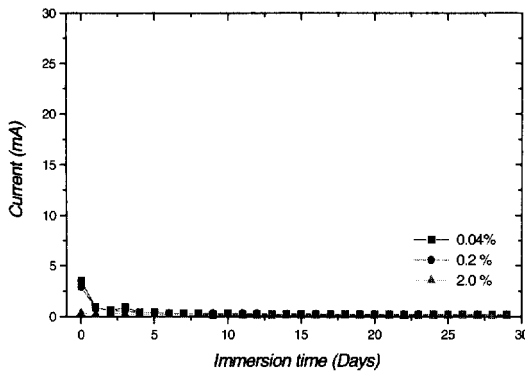
Fig. 12. Plots of macrocell and microcell current density variations with the immersion time span: (a) macrocell corrosion tests ; (b) microcell corrosion tests.

정도는 어느 한 쪽이 우세하지 않고 상호간 값은 비교적 서로 비슷한 크기의 수치가 측정되었다.

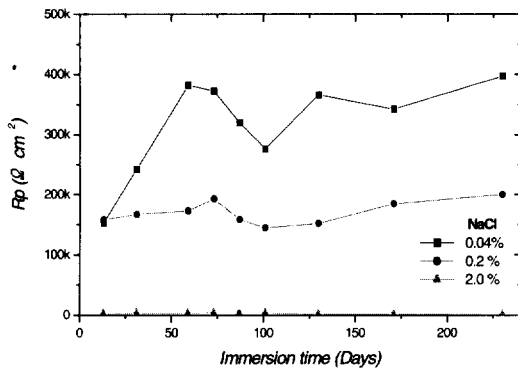
3.4 에폭시 코팅철근의 부식특성

철근 표면에 에폭시 수지로 코팅하여 인위적으로 1 %의 damage를 가한 공시체의 부식특성을 고찰하기 위하여 부식촉진실험과 침지실험을 실시하여 그 결과를 Fig. 13에 도시하였다.

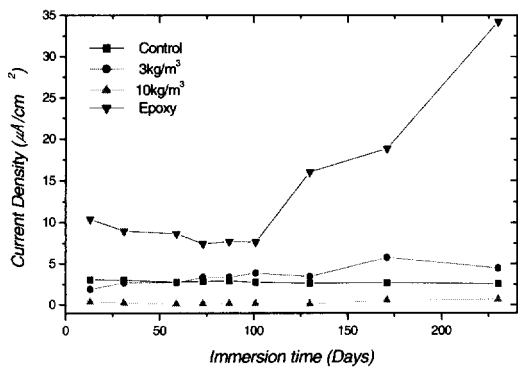
Fig. 13(a)은 에폭시 코팅철근의 부식촉진실험 결과로서 공시체 내의 염소이온농도가 2.0 wt%까지 함유되어도 Fig. 5와 같이 공시체의 균열발생으로 인한 전류의 증가가 나타나지 않았으며, 실험이 종료될 때까지 공시체에 균열을 발생시키지 않아



(a)



(b)



(c)

Fig. 13. Plots represented for corrosion tendency for epoxy coated rebars with the immersion time span: (a) current vs. time plot in the case of accelerated corrosion tests ; (b) polarization resistance vs. time plot and (c) current density vs. time plot in the case of immersion (free-corrosion) tests.

본 연구에서 실시한 정전압기법에 의한 부식촉진실험결과 매우 우수한 부식저항성을 나타내었으나, Fig. 13(b),(c)와 같이 인위적으로 전위(potential)를 인가하지 않고 침지기간이 경과함에 따라 철근의 부식정도를 측정된 침지실험에서는 상반된 결과가 관찰되었다. Fig. 13(b)은 선형분극법에 의한 분극저항의 측정결과로 공시체내에 함유된 염소이온의 농도가 2.0 wt%일 때 침지 초기부터 3000 Ω cm² 이하의 낮은 분극저항 값이 측정되었으나, Fig. 13(c)과 같이 부식전류밀도 산출결과 부식억제제 첨가방식의 공시체 보다 무려 10 배 이상의 속도로 부식되는 것으로 확인되었다. 이것은 염화물 및 부식억제제가 첨가된 공시체에 사용된 black rebar의 1 %에 해당하는 노출면적에 국부적으로 부식이 진행되어 black rebar에서 발생하는 균일부식의 형태와는 다르게 부식이 진행되기 때문이다. 따라서 1 %의 damage를 부여한 에폭시 코팅철근은 공시체내에 함유된 염소이온의 농도가 2.0 wt%일 때 낮은 국부부식 저항성이 관찰되었지만, 단기간의 평가 방법인 부식촉진실험으로는 이러한 결과를 확인할 수 없었다. 그러므로, 본 연구에서 실시한 정전압기법에 의한 부식촉진실험은 염화물 및 부식억제제의 첨가량을 변수로 제작된 공시체의 부식특성을 단기간 내에 평가하는 매우 효과적인 실험임을 입증할 수는 있었으나, 국부부식의 형태를 보이는 에폭시 코팅철근의 부식특성을 평가하기엔 적합하지 않은 것으로 판단된다.

4. 결 론

염소이온과 부식억제제의 첨가량, 그리고 1 %의 damage를 부여한 에폭시 코팅철근을 사용하여 제작된 공시체를 대상으로 부식촉진실험, 침지실험 그리고 마크로 및 마이크로 셀 부식실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 철근의 방식을 위하여 첨가된 calcium nitrite 부식억제제는 콘크리트에 함유된 염화물의 농도에 따라 적절한 첨가량의 중요성이 부식촉진실험과 침지실험을 통하여 확인되었다.

2) 정전압기법에 의한 부식촉진실험으로 얻어진 철근의 부식특성은 침지 실험결과와 일치하여 염화물 및 부식억제제를 함유한 철근 콘크리트의 부식을 단 기간 내에 평가하는 매우 효과적인 실험임이 확인되었다.

3) 침지기간이 경과함에 따라 마크로 셀 전류밀도는 점차 감소하였고, 마이크로 셀 전류밀도는 점차 증가하였으며, 전류밀도 값은 비교적 서로 비슷한 크기의 수치가 측정되었다.

4) 1 %의 damage를 부여한 에폭시 코팅철근의 부식특성을 단기적인 방법인 정전압기법에 의한 부식촉진실험으로 평가하는 것은 적합하지 않았다. 이는 균일부식을 일으키는 black rebar와는 달리 국부부식에 기인하는 것으로 판단된다.

References

1. A. M. Zayed and A. A. Sagues, *Corr. Sci.*, **30**, 1025 (1990).
2. A. A. Sagues, H. M. Perez-Duran and R. G. Powers, *Corrosion*, **47**, 884 (1991).
3. A. A. Sagues, and A. M. Zayed, *Corrosion*, **47**, 852 (1991).
4. Page, C.L., Short, N.R. & El-Tarra, A., *Cement Concrete Res.*, **11**, 395 (1981).
5. R. Brousseau, M. Arnott, S. Dallaire and R. Feldman, *Corrosion*, **48**, 947 (1992).
6. A. Bentur, S. Diamond, N. S. Berke "Steel Corrosion in Concrete", E & FN Spon, 132 (1997).
7. J. T. Lundquist, A. M. Rongenberg and J. M. Gaidis, *Materials Performance*, **18**, 36 (1979).
8. C. Alenso and C. Andrade, *ACI Materials J.*, **87**, 130 (1990).
9. Ping Gu, S. Elliott, R. Hrestova, J. J. Beaudoin, *ACI Materials J.*, **94**, 385 (1997).
10. Mohammed Maslehuddin, Huseyin Saricimen, and Abdulaziz I. Al-Mana, *ACI Materials J.*, **84**, 42 (1987).
11. M. L. Sennour, H. Zhang, H. G. Wheat and R. L. Carrasquillo, *Corrosion/92*, paper no. 199, Houston, TX, NACE, (1992).
12. Brain B. Hope and Alan K, C. Ip, *ACI Materials J.*, **84**, 525 (1987).
13. M. D. Koretsky, F. Aboameri and J. C. Westall, *Corrosion*, **55**, 52 (1999).
14. D. G. Enos, A. J. Williams, and J. R. Scully, *Corrosion*, **53**, 891 (1997).
15. D. G. Enos, A. J. Williams, and J. R. Scully, *Corrosion*, **54**, 389 (1998).
16. H. Saricimen, O. A. Ashiru, N. R. Jarrah, A. Quddus and M. Shameem, *Material Performance*, **37**, 32 (1998).
17. A. Bentur, S. Diamond, N. S. Berke "Steel Corrosion in Concrete", E & FN Spon, 121 (1997).
18. ASTM C 876-80, "Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete", West Conshohocken, PA, ASTM, (1980).
19. C. Dehghanian, *Corrosion*, **55**, 291 (1999).
20. M. Shamim Khan, *ACI Mater. J.*, **88**, 37 (1991).
21. R. Browne, M. Geoghegan, A. Baker, "Analysis of Structural Condition from Durability Result", Performance of Concrete in Marine Environment, Publication SP-65 Detroit, MI, ACI, 193 (1980).
22. C. Preece, F. Gronvold, T. Frolund, "Influence of Cement Type in the Electrochemical Behavior of Steel in Concrete", Ellis- Horwood, 393 (1983).
23. N.S. Berke, *Corrosion/87*, paper no. 132, Houston, TX, NACE, (1987).
24. M. Stern and A. Geary, *J. Electrochem. Soc.*, **104**, 56 (1957).
25. C. Andrade and J. A. Gonzalez, *Werkstoffe und Korrosion*, **29**, 515 (1978).