

전기화학적 임피던스법을 이용한 염함유 시멘트 모르타르내의 철근부식 연구

남 상 철^{†*} · 백 지 흠 · 조 원 일 · 조 병 원 · 윤 경 석 · 전 해 수*

한국과학기술연구원 전지·연료전지센터, *고려대학교 화학공학과
(1998년 3월 13일 접수, 1998년 8월 4일 채택)

Electrochemical Impedance Study on the Rebar Corrosion in Cement Mortar Containing Chloride Ions

Sang Cheol Nam^{†*}, Chi-Hum Paik, Won Il Cho, Byung Won Cho, Kyung Suk Yun, and Hai Soo Chun*

Battery and Fuel Cell Research Center, KIST, Seoul 136-791, Korea
Department of Chemical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea
(Received March 13, 1998; accepted August 4, 1998)

요약: 염분을 함유한 시멘트 모르타르 내의 철근의 부식현상을 교류 임피던스법에 의해 고찰하였다. 부식 가속화 장치를 이용하여 단기간 내에 부식현상을 예측하였으며, 측정된 임피던스 값은 제안된 전기화학적 등가회로 및 모델에 적용할 수 있었으며, CNLS(complex nonlinear least squares) fitting 법에 의하여 계산된 값과 실험에서 얻은 값이 잘 일치함을 알 수 있었다. 주어진 모델로부터 구한 전하이동저항(charge transfer resistance, R_c)은 염분 농도와 시간에 따른 철근의 무게 감소량의 예측을 가능하게 하였으며, 이는 실제 철근의 무게 감소치에 근접함을 알 수 있었다.

Abstract: Rebar corrosion in cement mortar containing chloride ions was investigated by electrochemical AC impedance spectroscopy. Corrosion of mild steel bar was accelerated by an acceleration test equipment in short period. Impedance values obtained from AC-impedance method could be adapted to the proposed electrochemical equivalent circuit model and they were consistent with calculated values obtained by CNLS fitting method. The weight loss of rebar could be calculated by charge transfer resistance(R_c) with time and it was close to real value.

Key words: Rebar Corrosion, AC Impedance, Cement Mortar

1. 서 론

콘크리트 구조물에서의 철근은 시멘트 경화체의 세공용액이 강알칼리성을 띠고 있기 때문에 그 표면에 산화피막을 만들어 부식으로부터 보호되고 있다. 그러나, 산성비 혹은 공기중의 이산화탄소 등에 의한 pH의 감소, 동절기 제설제로 사용되는 염화칼슘이나 해사의 사용에 의한 염분의 유입은 철근의 산화 피막을 파괴시켜 부식반응을 촉진시키는 요인으로 작용한다. 이와 같이 생성된 부식 생성물은 본래의 체적에 비해 약 2.5배 팽창하게 되어 구조물에 균열을 발생시켜 결과적으로 콘크리트 구조물의 내하력 저하를 초래한다. 이러한 부식을 방지하기 위해서 에폭시 도막철근[1] 혹은, 부식 억제제[2] 등을 사용하거나 또는 부식이 전기화학반응이라는 점을 이용한 전기방식[3] 등을 실시하고 있다.

부식현상을 전기화학적으로 측정하는 방법으로는 자연전위법, 전기저항법, 분극저항법, 교류 임피던스법, 전기화학적 노이즈법의 5가지로 나눌 수 있으며, 각각의 방법에 따라 정성, 정량, 실험실 및 현장 적용성 등에 고유의 특징을 가지고 있다. 이에 대한 특징을 요약하여 Table 1에 나타내었다. 이 중에서 특히 교류 임피던스법은 부식 메커니즘 및 여러 가지 부식현상을 이해하기 위해 여러 학자들에 의해 각광받고 있는 방법으로[4-7], 작동전극(working electrode), 상대전극(counter electrode), 그리고 기준전극(reference

electrode)으로 구성된 시스템에 교류를 인가하면서 주파수를 변화시키면, 전극계면에서 변화가 일어나게 되고, 이 변화는 저항(resistance)과 캐패시터(capacitance)의 조합으로 구성된 임피던스로 나타나게 된다. 이로부터 철근의 부식반응에 관여하는 여러 가지 유용한 정보를 알 수 있으며, 비교적 측정이 용이한 자연전위법[8]을 병행하면 부식반응에 관한 정성과 정량분석을 동시에 수행할 수 있다.

본 연구에서는 콘크리트내의 철근 부식현상을 이해하고, 또한 방지기술개발의 전 단계로서 시멘트 모르타르 내에서의 염분농도에 따른 철근부식현상을 자연전위법을 이용하여, 정성적으로 평가함과 동시에 교류 임피던스법을 이용하여 정량화 시키는데 주된 목적을 두었다. 일반적으로 부식현상은 장기간에 걸쳐 서서히 발생하는 것으로 이를 측정하는데 많은 시간이 소요되므로, 이를 단기간에 관찰할 수 있도록 일정한 습도와 온도가 주기적으로 반복·유지되는 항온항습조 내에서 부식을 인위적으로 촉진시켜 나타나는 부식현상을 고찰하였다.

2. 실 험

본 실험에 사용한 철근 시멘트 모르타르 시험체는 100 mm× \varnothing 70 mm의 원통형으로, W/C(water/cement)를 0.5로 하였고, \varnothing 10 mm의 철근을 정 중앙에 매입하였으며, 흑연전극을 피복두께로부터 20 mm가 되게 삽입하여 각각의 염분 농도에 대해 총 20개의 시험체

† 주 저자 (e-mail: scnam@kistmail.kist.re.kr)

Table 1. Various Electrochemical Method for Corrosion Detection

Method	Contents	Application		Corrosion
		Laboratory	Field	
Half potential	Evaluation of corrosion state by measuring of half potential	Good	Good	Qualitative
Electrical resistance	Evaluation of corrosion state by measuring of specific resistance	Medium	Good	Semi-quantitative
Polarization resistance	Evaluation of corrosion rate by measuring of polarization resistance with small DC current	Good	Medium	Quantitative
AC impedance	Evaluation of corrosion rate by measuring of impedance with small AC voltage	Medium	Poor	Quantitative
Electrical noise	Evaluation of corrosion state by measuring of electrical noise	Poor	Poor	Semi-quantitative

Table 2. Composition of the Ordinary Portland Cement Used (w/o)

components	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO ₂	Cr ₂ O ₃	ig.loss
	60.06	20.19	10.39	2.93	2.51	1.86	0.32	0.09	0.007	1.58
analysis method	WET	AAS & WET	ICP	AAS & WET	ICP	AAS	AAS	AAS	ICP	

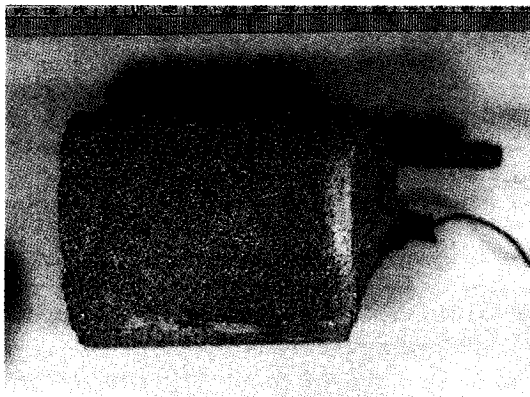


Figure 1. Cement mortar specimen for impedance measurement.

를 제작하였다. 이를 Figure 1에 나타내었다. 철근은 본래의 산화 피막에 의해 부식에 대한 저항성을 가지고 있으나 각 시편마다 조건이 다르므로 일정한 조건을 유지하기 위하여 sand blasting 처리하여 표면의 피막을 모두 제거하였다. NaCl을 사용하여 염소이온이 시험체 중량에 대하여 0.6, 1.8, 3.0%의 3가지 농도로 하였으며, 배합수에 녹여 시험체를 제조하였다. 시멘트는 국내에서 생산된 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 이에 대한 화학 조성비는 Table 2와 같다.

철근의 부식 속도를 가속화하기 위하여 Figure 2에 나타낸 조건으로 항온항습조 내부의 환경이 일정 습도와 온도가 주기적으로 변화시켜 시험체에 가해지도록 하였다. 자연전위의 측정 및 교류 임피던스법 측정을 위한 기준전극으로는 ASTM C186-91의 규격을 적용하여 자체 제작한 Cu/CuSO₄ 전극을 사용하였으며, 제작된 전극의 평형 전위는 0.316 V(vs. NHE)였다. 실험장치는 Figure 3과 같으며 자연전위는 voltmeter로 측정하여 각각의 염분 농도에 대한 시험체간의 평균값을 취하였고, Zahner사의 IM6 impedance spectroscopy analyzer (Germany)를 이용하여 각각의 저항 값을 측정하였다. 이의 결과분석을 위해 Zahner사의 임피던스 software를 제안된 등가회로 모델에 적용하여 측정결과와 비교하여 각각의 파라미터를 구하였다. 전위와 임피던스 데이터는 1주일을 주기로 측정하였으며, voltmeter로 나타나는 전위는 그 값의 변화가 ±5 mV 이내에서 10분 정도 안정하게 될 때의 값을 기록하였다. 실제로 시험체는 전기적 접촉이 어려워 전위 값의 변동이 심하고 측정

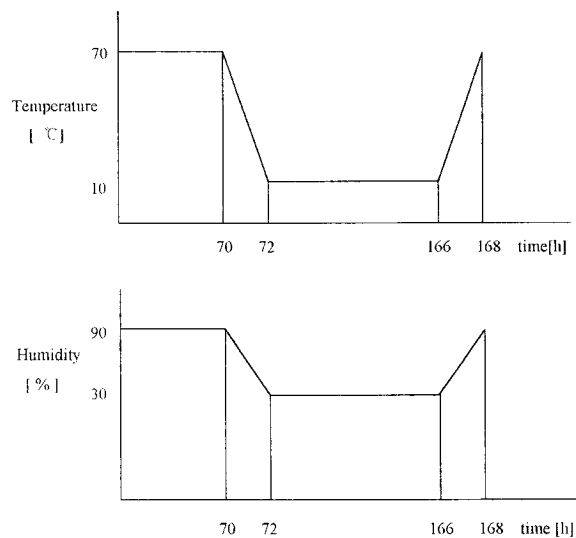


Figure 2. Experimental condition in an acceleration test.

에 장시간 소요되기도 하였으나, ASTM에서 규정하는 wetting solution을 사용하여 이러한 문제점을 해결하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 자연전위법에 의한 부식상태 결정

모든 금속은 각각의 평형전위를 지니고 있으며, 기준전극에 대해 음의 방향으로 큰 값을 나타낼수록 이온화하기 쉬운 상태로 존재하게 된다. 이러한 현상은 부식의 유무를 판단하는데 있어 매우 유용한 방법으로 철근이 공시체내에서 갖는 평형전위를 측정하여 염분농도에 따른 부식의 유무를 판단하였다.

Figure 4는 각기 염분 농도를 달리한 시멘트 모르타르 속에 위치한 철근 시편으로부터 측정된 자연전위 값을 나타낸 것으로서, 염분이 함유되지 않은 철근 시편의 자연전위는 -0.2 V의 값을 가지다가 시간이 경과함에 따라 점점 양 전위의 방향으로 증가하는 경향을 보였다. 자연전위의 이와 같은 변화는 시멘트 고유의 강 알칼리성에 의해 철근표면에 부동태 피막이 자연적으로 형성되기 때문이며, 이로써 철근의 부식반응은 억제되어 매우 안정한 철근 콘크

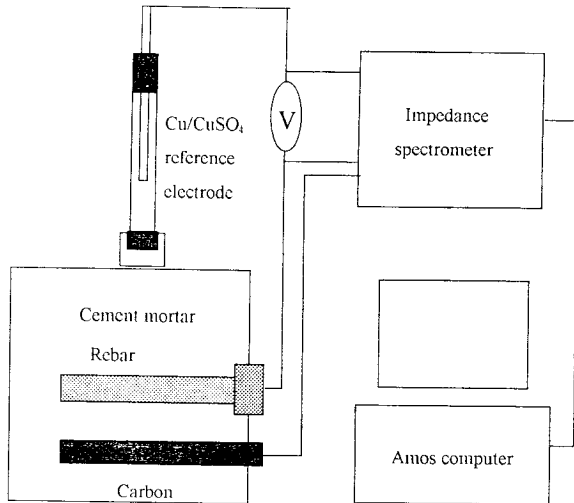


Figure 3. Schematic diagram of experimental apparatus.

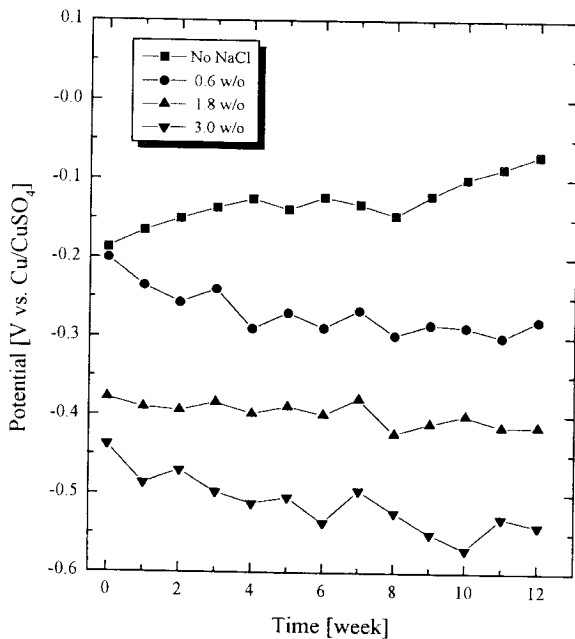


Figure 4. The variation of corrosion potential as a function of time in an acceleration test.

리트 구조물을 이루게 한다.

그러나, 염이 첨가된 시멘트 모르타르 내부에 위치하는 철근 시편의 경우에는 염분농도가 증가함에 따라 염소이온에 의한 공식에 의해 열역학적으로 음의 방향으로 전위값이 비례적으로 증가하였으며, 시간 경과에 따라서도 계속 감소하는 경향의 자연 전위값을 나타내고 있다. ASTM C876에 기준되어 있는 -0.35 V 이하의 조건에서 약 95% 이상의 부식 가능성이 있다는 사실을 고려할 때, 본 연구에서 시멘트 모르타르에 가한 1.8과 3.0%의 염분을 함유한 시험체에 있게 되는 철근 시편에서는 부식이 활발하게 진행되고 있는 것으로 판단할 수 있다.

3.2. 임피던스 측정 및 시뮬레이션에 의한 파라미터 계산

철근의 부식반응은 철근과 그 주위를 감싸고 있는 시멘트 화합물 사이의 계면에 관한 현상으로, 이를 전기화학적 임피던스 모

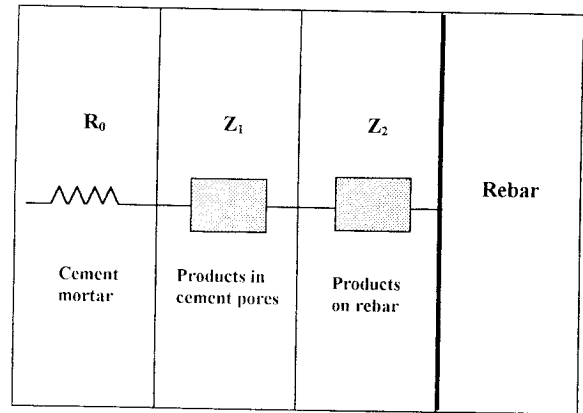


Figure 5. Electrochemical model of rebar-cement mortar interface.

델의 관점에서 살펴보면, Figure 5에서와 같이 철근표면에서의 전하이동에 의한 저항(Z_2)과, 부식에 의해 발생된 부식생성물과 시멘트 페이스트 사이의 화학반응으로부터 야기되어, 시멘트 기공사이에 생성된 부식생성물로부터 나타나는 저항(Z_1), 그리고, 시멘트 모르타르 자체의 매트릭스 저항(R_0)의 3단계로 나눌 수 있다[9]. 이때, R_0 값은 전해질 저항에 해당하며 Z_1 은 전이영역 (transition zone)으로서, 부식생성물의 불균일성을 나타내는 dispersion factor의 병렬구조로 나타난다. 이때, dispersion factor, Z_d 는 주파수에 의존하는 dispersion capacitance $C_{dl}(\omega)$ 과 dispersion resistance $R_{dl}(\omega)$ 의 조합으로 나타내며, 반원의 일그러짐이 심할수록 부식생성물이 매우 불균일하게 존재함을 의미하며 1보다 작은 값을 갖게 된다. Z_2 는 철근과 시멘트 모르타르사이의 직접계면에 해당하는 저항으로 이것도 마찬가지로 금속표면에 생성된 피막의 불균일성 및 세공정도 등을 나타내는 지표로 $C_{dl}(\omega)$ 와 $R_{dl}(\omega)$ 의 병렬조합으로 나타낼 수 있으며, 이렇게 제안된 모델은 Nyquist plot에서 1개, 혹은 2개의 반원을 나타내거나, 2개의 반원이 서로 겹쳐 하나의 반원으로 보이게 된다. 이때, 낮은 주파수 범위에서 나타나는 직선부분은 전이영역 안에서의 확산반응을 의미하게 된다[10].

이에 대한 등가회로 (equivalent circuit)를 Figure 6 (a)에 나타내었으며, 이에 대한 전체 임피던스 관계식을 식 (1)에 나타내었다.

$$Z_{total} = R_0 + [R_{dl}^{-1} + j\omega C_{dl} + [R_1 + \{(R_2 + Z_w)^{-1} + R_{dl}^{-1} + j\omega C_{dl}\}^{-1}]^{-1}]^{-1} \quad (1)$$

이를 좀 더 간략히 도식화하기 위한 방법으로 dispersion factor를 포함하여 그 정도를 나타내는 CPE(constant phase element)를 도입하여, 전이영역과 직접계면에서의 불균일 정도를 CPE1과 CPE2로, 확산에 대한 부분을 CPE3으로 대체하여 나타내었으며[Figure 6 (b)], 이에 대한 전체 임피던스 관계식을 식 (2)에 나타내었다. 일반적으로 철근에 부식반응이 진행되지 않을 때는 시멘트 기공 속에 부식생성물이 존재하지 않기 때문에, 1개의 반원은 전하이동 저항만이 존재하는 것으로 볼 수 있으며, 따라서 Z_1 은 사라지게 된다.

그러나 부식반응이 진행함에 따라 부식생성물은 시멘트 기공 속에 존재하게 되므로, 전이영역에서의 저항 Z_1 을 포함할 수 있으며, 부식이 진행되는 부분과 진행하지 않는 부분이 함께 공존함으로써 2개의 반원이 구분되지 않고 하나의 형태로 존재할 수 있으므로 이를 등가회로에서 병렬구조로 나타냈다.

$$Z_{total} = R_0 + [Z_{CPE1}^{-1} + [R_1 + \{Z_{CPE2}^{-1} + (R_2 + Z_{CPE3})^{-1}\}^{-1}]^{-1}]^{-1} \quad (2)$$

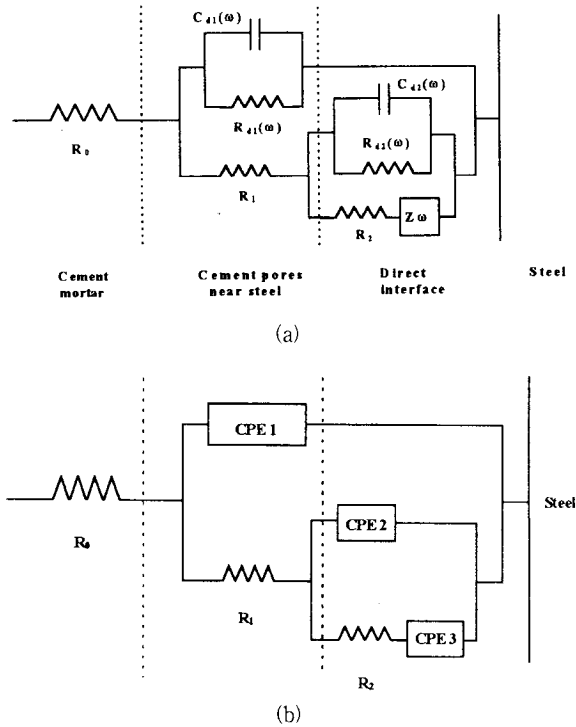


Figure 6. Electrochemical equivalent circuit model between rebar and cement mortar interface.

실험에 의해 측정된 임피던스 값은 식 (2)에 의해 CNLS(complex nonlinear least squares) fitting을 수행하게 되며, 이로부터 각각의 임피던스 파라미터를 구할 수 있다. 이때, 전하이동저항 (charge transfer resistance, R_2)을 식 (3)에 대입하여 부식전류를 구하였으며[11], 패러데이 법칙에 의해 철근의 무게 감소량을 정량적으로 구하였다.

$$i_c = \frac{1}{2.3} \left(\frac{\beta_a \beta_c}{\beta_a + \beta_c} \right) \frac{1}{R_2} \quad (3)$$

$$\left(\frac{1}{2.3} \frac{\beta_a \beta_c}{\beta_a + \beta_c} = 0.022, \beta_a = \beta_c = 0.1 \text{ V/dec.} \right)$$

전이영역의 구조는 시멘트 모르타의 벌크부분과는 다르며, 공극률 (porosity)이 더 높을 뿐만 아니라 높은 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 낮은 양의 비수용성 시멘트가 존재하게 된다[12].

부식반응은 실험에 사용하기 전의 철근의 상태에 대해서도 많은 영향을 미치는데, 표면이 잘 연마된 철근을 사용하였을 경우, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 FeOOH , $\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 와 같은 철의 부동태피막 (passive film)이 표면에 균일하고 연속적으로 생성되어, 이러한 피막이 부식을 억제하는데 커다란 역할을 수행하는데 반해[13], 철근이 대기 중에 방치되어 0.01~0.5 mm 두께를 가진 다공성의 lepidocrocite, goethite, magnetite와 같은 부식 층을 생성하였을 경우, 초기에 시멘트 혼합물에 들어있던 수분이 부식생성물의 기공 속으로 흘러 들어가 그 속에 있던 공기를 밖으로 밀어내어 시멘트 페이스트속에 기포를 형성하게 된다. 따라서, 부식 층에 존재하던 수분의 조성은 벌크상태의 시멘트 페이스트와는 다르게 된다.

부식 층 내에서의 시멘트는 서서히 경화되어 그 성분들이 다시 부식생성물과 반응하여, 그 반응의 결과로 $4\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$ 가 생성되며, 시간이 지남에 따라 $3\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 로 변화하게 된다[14]. 결국, 시멘트 화합물과 철근사이의 진정한 계면의 물리적 특징은 전이영역의 존재에 의하며, 초기 철근의 부식상태에 크게

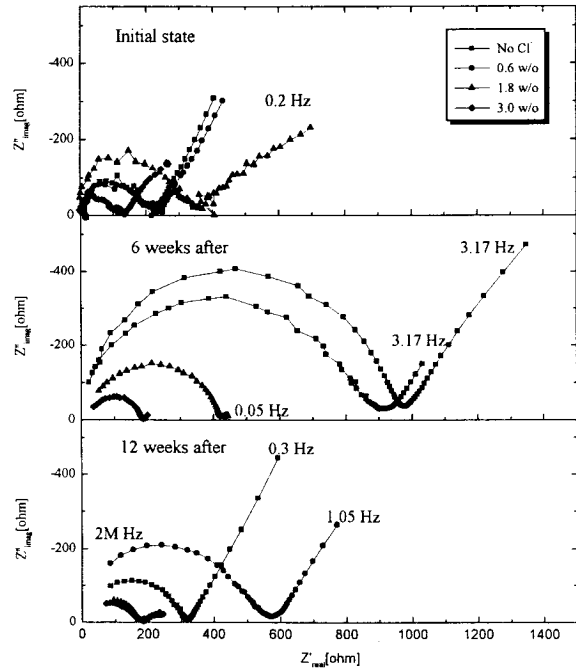


Figure 7. Nyquist plot of bare rebar with time.

의존하는 것으로 볼 수 있다. 이때, 염소이온이 포함되어 있으면 철근 표면에 존재하던 산화피막은 공식 (pitting)에 의해 더 이상 passive하지 못하며, 시멘트 페이스트 내의 염소이온과 산소의 양에 의존하는 lepidocrocite ($\gamma\text{-FeOOH}$), goethite ($\alpha\text{-FeOOH}$), magnetite (Fe_3O_4), 심지어 akaganeite ($\beta\text{-FeOOH}$)를 생성하게 된다. 이러한 과정이 지속되면 부식생성물 층은 매우 불균일해지며, 단지 일부분의 철근표면만이 산화피막으로 둘러싸이게 된다[15].

이미 앞에서 언급한 바와 같이 콘크리트 구조물에 놓여 있는 철근의 부식여부는 철근에 대한 자연전위를 측정함으로써 가능하지만, 부식이 진행되고 있는 철근이 얼마만큼의 속도로 얽아지는가에 대한 판정을 하기는 매우 곤란하다. 이러한 관계는 자연전위와 부식속도를 나타내는 식의 비교에서도 쉽게 알 수 있다. 즉, 자연전위가 의미하는 열역학적 인자는 부식의 상태만을 말해줄뿐 속도론적인 관계를 추론하기가 매우 어렵다. 따라서 부식속도를 의미하는 부식전류 또는 저항을 알아냄으로써 콘크리트 구조물에 위치하는 철근의 부식에 대한 정량화가 가능해진다.

Figure 7은 염분농도가 다른 시멘트 모르타 내에 위치하는 철근에 대하여 일정 시간 경과에 따라서 교류 임피던스법을 이용하여 구한 Nyquist plot의 결과를 나타낸 것으로, 기하학적 구조, 전기화학 반응경로, 미세구조 변화 및 흡착등에 의해 나타나는 유도효과는 나타나지 않았다. 초기에 각 시험체에서 얻어지는 반원이 어느 일정 범위 내에 들어있으며, 또한 서로 비슷한 양상을 나타내고 있다. 그러나, 시간이 지남에 따라서 염분이 첨가되지 않은 시험체와 0.6 w/o의 염분이 첨가된 시험체에서 얻어진 Nyquist plot 중의 반원 크기는 점점 증가하다 다시 감소하는 경향을 보였다. 시멘트 모르타가 갖는 강한 알칼리성 환경은 초기에 철근 표면에 부동태 피막을 형성시켜 부식이 잘 일어나지 않게 하지만, 시간이 경과할수록 가속화 장치 내에서 염분이 존재하는 염소이온의 공격에 의하여 부동태 피막이 파괴되어 부식반응이 활발히 진행되는 것으로 판단된다.

측정된 임피던스 값은 CNLS fitting을 통해 계산된 값과 비교하였으며, 고주파수 영역에서 저주파수 영역에 이르기까지 비교적 잘 일치하는 결과를 보였으며[Figure 8], Table 3에 계산된 각 임피던

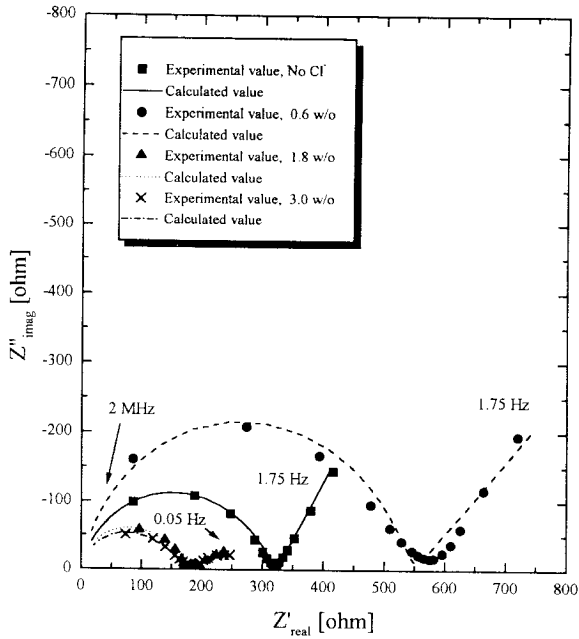


Figure 8. Measured and calculated Nyquist plot of bare rebar embedded in cement mortar. [12 weeks after]

스 파라미터들을 나타내었다. 시멘트 모르타르의 매트릭스 저항(R_0)은 거의 없는 것으로 나타났는데, 이는 가속화 장치내의 고온 다습한 조건이 끝난 직후에 임피던스 측정을 실시한 관계로, 시험체 내부에 충분한 수분이 존재하기 때문으로 사료된다. 실제적인 매물 철근의 부식 정도와 관련된 R_1 과 R_2 값은 염분의 농도증가에 따라 감소하는 경향을 뚜렷이 보이고 있어, 혼입된 염분의 농도에 따라서 철근의 부식량도 증가하고 있음을 알 수 있다. 저주파수 영역에서 나타나고 있는 확산영역의 기울기는 시멘트 모르타르에 가한 염분의 함유량이 증가함에 따라 감소하였는데, 이에 대한 해석이 현재 연구 중에 있다.

실제로 철근의 무게감소 정량에 사용되는 R_2 값을 시간에 대해 도식화하여 나타내면, Figure 9와 같으며, 3.0 w/o의 염분이 첨가되었을 경우 초기부터 거의 일정한 낮은 저항값을 나타낸 반면, 염분이 첨가되지 않거나 0.6 w/o의 낮은 염분을 포함하는 시멘트 모르타르 시험체에 존재하는 철근은 시험 후 약 6~8주까지는 저항값이 증가하였다가 그 이상의 시간에서는 다시 감소하였다. 앞에서 설명한 것과 같이 초기에 염분이 존재하지 않거나 소량 존재할 경

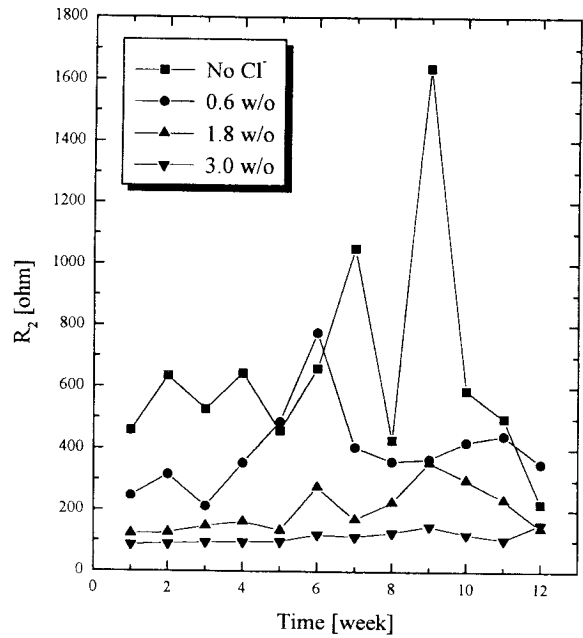


Figure 9. Charge transfer resistance (R_2) of bare rebar embedded in cement mortar with time.

우에는 철근 표면에 형성되는 부동태피막으로 인해 부식이 억제되는 반면, 어느 일정량 이상의 염분이 혼입된 경우에는 초기부터 부식반응이 활발하게 진행되고 있음을 알 수 있다.

3.3. 부식된 철근표면 관찰 및 정량화

앞 절에서 구한 전하이동저항(R_2)으로부터 철근무게 감소량을 시간에 따라 계산하였고, 실제 공시체 내부의 철근을 6주, 12주 경과 후 꺼내 표면을 sand blasting처리 후 무게감소량을 측정하여 이를 Figure 10에 나타내었다. 임피던스 측정법으로부터 얻은 결과는 Figure 10(a)와 같이 염분양이 증가하는 방향으로 6주 후에 0.04 g, 0.07 g, 0.16 g, 0.26 g, 12주 후에는 0.09 g, 0.14 g, 0.27 g, 0.46 g의 철근이 소실되는 것으로 나타났으며, 실제 무게 감소량은 Figure 10(b)에서 6주 후에 0.03 g, 0.06 g, 0.12 g, 0.34 g, 12주 후에는 0.05 g, 0.10 g, 0.28 g, 0.61 g으로 나타났다. 염분농도변화에 따라 임피던스법에 어떤 일정한 경향이 있는 것은 아닌 것으로

Table 3. Calculated Resistance Values of Rebar Corrosion with Time

Resistance(ohm)		Time(week)											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
No NaCl	R_0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	R_1	178.3	200.5	179.8	135.8	79.8	274.2	79.4	207	358.8	178.5	149.3	100.9
	R_2	459.3	635.4	527.9	644.5	459.6	660.7	1051	428.8	1638	589.2	500.3	222.4
0.6 w/o	R_0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	R_1	115.3	135.7	103.1	145.6	175.2	163.2	105.2	169.5	253.1	132.5	120.5	197
	R_2	247.5	317.3	214.1	355.5	488.3	777.1	405.7	360.5	368.5	423.1	444.3	353.1
1.8 w/o	R_0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	R_1	87.3	85.0	95.6	100.3	39.4	148.3	80.2	105	128.3	104.3	89.9	37.6
	R_2	121.3	125.6	148.3	163.2	134.5	277	170.7	227.6	358.2	301.2	235.3	141.8
3.0 w/o	R_0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	R_1	45.3	53.3	56.4	53.4	33.9	69.9	53.6	62.5	57.3	55.5	69.1	30.7
	R_2	86.5	89.3	94.5	96.6	96.9	121.1	114.3	126.9	148.5	121.5	105.1	156.2

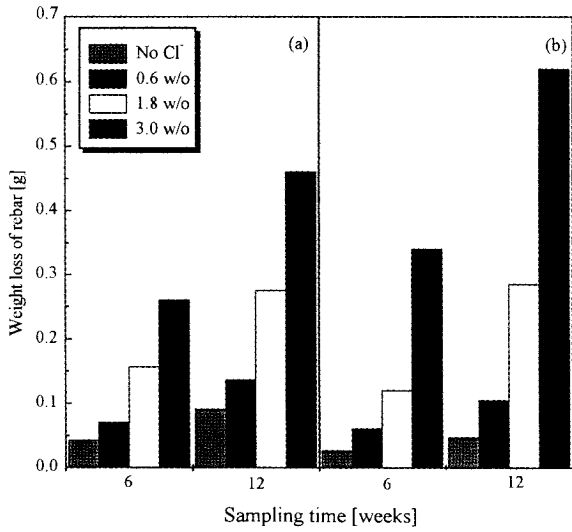
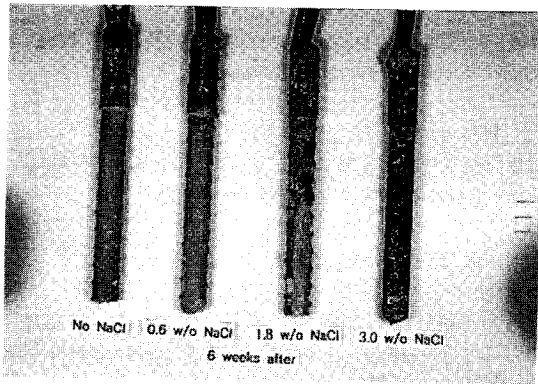
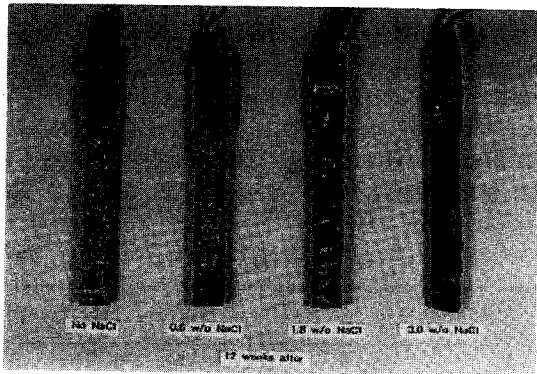


Figure 10. Weight loss of rebar with sampling time: (a) Calculated value ; (b) Real value.



(a) After 6 weeks



(b) After 12 weeks

Figure 11. Corroded surface of rebar after 6 (a) and 12 weeks (b) in an accelerated test.

보이며, 임피던스법으로 얻은 철근소실량이 비교적 실제값에 근접해 감을 알 수 있다. 비록 그 수치면에서는 정확히 일치하지는 않을 지라도, 이는 교류 임피던스법이 부식된 철의 소실량을 비파괴적으로 정량적으로 나타내는데 유용한 방법임을 나타내어 주는 결과라 할 수 있다. 실제로 공시체내의 철근 표면상태는 Figure 11의

시멘트 모르타 시험체로 부터 채취한 철근의 표면사진에서 알 수 있는 바와 같이 시험체 내의 염분 함량이 증가할수록 부식이 활발히 진행되어 적갈색 녹 상태의 발청면적이 증가하였으며, 또한 시간이 경과함에 따라서도 발청면적이 크게 증가하는 것으로 나타났다.

4. 결 론

염분을 함유한 시멘트 모르타 내에서의 철근 부식 가속화 현상을 연구하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) 시멘트 모르타내의 철근의 부식현상은 교류 임피던스법에 의해 비파괴적으로 정량화 할 수 있다.
- 2) 실험으로부터 얻은 임피던스 값은 제한된 전기화학적 등가회로 모델에 잘 일치하였으며, 전하이동저항(R_2)으로 철근의 시간에 따른 소실량을 계산할 수 있으며, 이는 실제값에 근접하였다.
- 3) 부식가속화 장치를 이용할 때, 단기간내에 부식현상을 고찰할 수 있다.
- 4) 자연전위법과 교류 임피던스법을 조화하면 부식을 예측하는데 있어 유용한 측정방법이 될 수 있다.

감 사

본 연구는 과학기술처에서 시행한 “방재기술 개발사업”의 지원으로 수행되었음을 밝힙니다.

참 고 문 헌

1. A. M. Zayed and A. A. Sagues, *Corrosion science*, **40**, 1025 (1990).
2. M. J. Collie, “Corrosion inhibitors”, Noyes Data Corp., New Jersey(1983).
3. J. Bennett, *ANTI-CORROSION*, **12**(1986).
4. M. Itagaki, M. Tagaki and K. Watanabe, *Electrochim acta*, **41**, 1201(1996).
5. I. Epelboin, C. Gabrielli, M. Keddam and H. Takenouti, *Electrochim acta*, **20**, 913(1975).
6. M. keddam, O. R. Mattos and H. Takenoiti, *J. Electrochem soc.*, **128**, 266(1981).
7. C. Y. Chao, L. F. Lin and D. D. Macdonald, *J. Electrochem soc.*, **129**, 1874(1982).
8. M. G. Ali, *ANTI-CORROSION*, **10**(1990).
9. L. Hachani, C. Fiaud, E. Triki and A. Raharinaivo, *Brit. Corr. J.*, **29**, 122(1994).
10. L. Hachani, J. Carpio, C. Fiaud and A. Raharinaivo, *Cem. & Conc. Res.*, **22**, 56(1992).
11. D. A. Jones, “Corrosion”, pp. 147-148, Macmillan, New Jersey (1992).
12. A. Zayed, A. Slater-Haase, Paper N° 209 NACE Conference Corrosion'92 Nashville, 10(1992).
13. F. Wenger and Metaux, *Corrosion et Industrie*, n° 742(1987).
14. J. L. Gallias, G. Arliguie and J. Grandet, 2nd CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Montreal Canada, Supplementary Papers, 111(1992).
15. L. Hachani, E. Triki, A. Raharinaivo and D. Moussa, *Bull. Lia. LPC*(169), 79(1990).