

산화피막이 있는 철근의 분극곡선의 거동에 대한 연구

손윤범* · 한정섭**

*동아대학교 해양공학과 대학원생, **동아대학교 토목·해양공학부 교수

The Study on the Behavior of Polarization Curve of Reinforcement with Oxidation Layer

YOON-BEOM SON AND JEONG-SEB HAN

School of Civil and Ocean Engineering, Dong-A University, Pusan 604-714, Korea

KEY WORDS: Corrosion rate 부식속도, Corrosion potential 부식전위, Concrete 콘크리트, Reinforcement 철근, Polarization 분극곡선

ABSTRACT: In order to study for corrosion behavior of reinforcing steel with oxidation layer, Experiments were done with various NaCl concentrations and with immersion time in simulated concrete pore solution(SCPS) the characteristics of corrosion behavior were measured by polarization resistance method and cyclic potentiodynamic method. reinforcements were coated by epoxy except corrosion area and connecting area with potentiometer. The corrosion potential of reinforcement with oxidation layer was higher than that without oxidation layer and it also showed two anodic-nose. By the result of potentiation dynamic test, the potential curve shift to low with time and anodic-nose was appeared with 3% NaCl solution after 15 days. By result of cyclic Potentiodynamic test, the type of corrosion was different according to concentration.

1. 서 론

철근콘크리트 구조물은 콘크리트가 압축에는 강하지만 인장에는 약하기 때문에 인장을 받는 부분에 철근을 배근하여 철근이 인장을 받도록하여 효율적으로 외력에 저항하게 하는 일체식 구조를 말한다. 철근 콘크리트 구조물은 내구성이 뛰어나고 구조물의 형상에 제약을 받지 않으며 특히 경제적으로 다른 부재에 비해 유리하기 때문에 많은 구조물에서 폭 넓게 이용되고 있다. 그러나 철근 콘크리트 구조물에서 부식이 발생하게 되면 구조물 전체의 안전성과 수명에 직결되는 대단히 중요한 문제를 야기시킨다. 콘크리트 속의 철근이 부식하게 되면 철근의 단면 감소를 가져와 구조물의 하중을 견디어 내지 못하며 또한 부식 생성물은 처음 철근의 부피보다 훨씬 커지기 때문에 인장력에 약한 콘크리트를 균열시킨다(Broomfield, 1997; Kuman Mehta, 1993).

철근의 부식에 영향을 미치는 요소로는 Cl⁻이온의 침입과 공기중의 이산화탄소가 시멘트와 반응하여 중성화를 일으키는 것, 콘크리트의 조성, 철근의 화학적 조성 및 가공 및 용접, 그리고 기후 등 여러인자가 있다(Sagoe-Crentsil and Glasser, 1989; Berke, 1993).

철근 부식의 메카니즘은 매우 복잡하여 그 동안의 많은 연구에도 불구하고 많은 모순을 안고 있다(장 등, 1993; Andrade, 1986; Tuutti, 1992).

그러나 대부분의 부식 메카니즘은 밝혀졌으며 이를 통해 부

식 속도를 측정하는 방법들도 개발되었다. 이들은 크게 부식 전후의 시편의 무게 감량을 측정하는 방법과 전기화학적으로 부식속도를 측정하는 방법으로 나눌 수 있다(고와 박, 1994). 이중 무게감량법은 시간이 많이 걸릴 뿐만 아니라 정확한 부식전위와 부식속도를 알아내기 힘들다. 반면 전기화학적 부식 속도 측정 방법은 비교적 빠르고 정확하게 측정할 수 있다.

이러한 전기 화학적 부식 특성에 관한 연구는 철근에 대해서도 많이 연구되었는데(Sagoe-Crentsil, 1989) 대부분의 연구는 철근의 산화피막이 제거된 상태에서(Schicssl, 1988) 연구되었다. 그러나 시편의 미세한 변화에도 전기화학적 실험에서는 결과가 큰 차이를 보일 수 있기 때문에 산화피막이 제거된 상태에서 실험한 결과를 실제 철근에 적용한다는 것은 무리가 있다.

따라서 본 연구에서는 유사콘크리트 용액내에서 산화피막을 갖고 있는 철근을 이용하여 전기화학적 방법인 분극 저항법으로 철근의 부식 속도와 부식 전위를 염소이온의 농도와 침지 시간의 경과에 따라 측정하고 cyclic potentiodynamic method를 사용하여 양분극 곡선의 변화를 연구하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 시편

본 실험에 사용된 시편의 조성은 Table 1과 같다

철근의 탄소 함량은 0.25%이고 철근의 결함을 유발하는 황의 함량은 0.035%인 것으로 나타났다. 또한 무게 당량의 계산

Table 1 Composition of Rebar

성분	함량(wt, %)	시험 방법
C	0.25	KS D 1804 - 93 (LECO CCS-300)
Si	0.17	KS D 1652 - 96 (TJA 181)
Mn	1.22	KS D 1652 - 96 (TJA 181)
P	0.030	KS D 1652 - 96 (TJA 181)
S	0.035	KS D 1804 - 93 (LECO CCS-300)
C ^{no} /Mn	0.46	KS D 1652 - 96 (TJA 181)
Mi	0.13	KS D 1652 - 96 (TJA 181)
Cr	0.16	KS D 1652 - 96 (TJA 181)
Mo	0.02	KS D 1652 - 96 (TJA 181)
Cu	0.38	KS D 1652 - 96 (TJA 181)

에 필요한 1%이상의 함량을 보이는 원소는 망간으로 1.22%를 나타냈다.

본 실험에는 SD30인 D13 철근이 사용되었으며 길이는 30cm가 되도록 절단하였다. 절단된 시편은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 하부에 4.55cm²의 면적과 상부에 potentiometer와 연결되는 부위를 제외하고는 모두 epoxy로 3회에 걸쳐 코팅하였다. 상부의 연결부위는 산화피막을 완전히 제거한후 clip으로 연결하였다.

2.2 용액

콘크리트속의 공극수와 유사한 용액을(Berke, 1993) 제조하여 사용하였고 그 조성을 Table 2. 에 나타내었다.

여기에 NaCl을 첨가하지 않은 것과 1%, 그리고 3%첨가 한 용액에 대하여 각각 실험하였다. 용액을 제조할 때 Ca(OH)₂에 의한 침전물 때문에 충분히 교반하여 24시간이 지난후 상층액만을 실험에 사용하였다. 실험은 각 용액에 대하여 1시간 1일, 2일, 3일, 7일, 15일 동안 침치시켜 염소이온의 농도와 시간의 변화에 따른 부식 특성을 관찰하였다.

2.3 실험장치의 구성

본 실험에 사용되는 장치는 GAMRY Instrument 사의

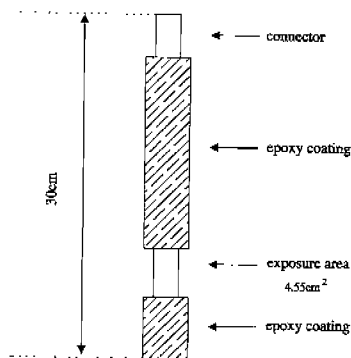


Fig. 1 Schematic diagram of specimen

Table 2 Compositon of simulated concrete pore water solution

성분	함량(wt%)
Ca(OH) ₂	0.2
KOH	1
NaOH	2.45
KCL	3.2
distilled water	93.15

CMS100 Potentiometer 이며 EG&G PARK 사의 Corrosion Cell을 사용하였다. 실험에 사용된 Reference electrode는 Saturated Calomel Electrode(SCE)를 사용하였으며 Auxilliary electrode는 탄소봉을 사용하였다. 부식전위에 대하여 ±20mV 에서 분극 저항법을 사용하여 부식 전위와 부식 속도를 구하였고 그 후 Cyclic Potentiodynamic Method를 사용하여 부식거동을 관찰하였다. 이때 Scan rate는 0.5mV/s 이며 분극은 Reference electrode에 대하여 -1V~1.5V까지 하였다(장 등, 1996; Andrade *et al.*, 1986).

3. 실험결과

3.1 현미경 조직 사진

본 실험에 사용된 시편을 주사식 전자 현미경 (SEM)으로 관찰한 조직 사진을 Photo 2에 나타내었다. 철근의 단면 사진을 보면 외부와 접하는 곳에 25µm 정도 두께의 산화피막이 형성되어 있음을 알 수 있다.

3.2 산화피막의 유무에 따른 분극 곡선의 변화

유사콘크리트 용액에서 30분간 침지한 후 산화 피막의 유무에 따른 분극 곡선의 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 점선으로 나타낸 것은 산화피막이 있는 철근의 분극 곡선이고 실선으로 나타낸 것이 산화피막이 제거된 상태에서 분극 실험을 한 것이다.

산화피막이 있을 때는 없을 때에 비해 부식 전위는 양의 방향에 있고 전류는 전체적으로 적게 흐르는 것을 볼 수 있다. 따라서 철근에서 산화 피막은 철근을 외부의 부식 환경으로부터 보호하는 역할을 한다. 그러므로 이 산화피막을 제거한 뒤에 측정된 앞선 연구들의(Tuutti, 1992) 실험에는 문제가 있음을 알 수 있다.

3.3 부식 특성

3.3.1 부식 전위

Fig. 3에서 보는 바와 같이 NaCl을 함유하지 않은 시편과 NaCl을 1% 함유한 시편에서 초기에는 부식 전위가 -550mV ~ -560mV 정도로 큰 변화가 나타내지 않았다. 그러나 7일 이후에는 NaCl을 1% 함유한 용액에서 -670mV로 음의 방향으로 급격히 떨어지고 있음을 알 수 있다. 1% NaCl의 경우에는 Cl 이온의 영향으로 이 산화피막을 통과하여 부식 전위에 영향을 미치는데에는 시간이 걸림을 알 수 있다. 또한 3%의 NaCl을 함유한 시편에서는 침지 직후에는 다른 용액에서와 비슷한 부

식 전위를 보이지만 그 이후 급격히 떨어지는 양상을 보이다가 3일째부터는 -780mV ~ -800mV 정도의 범위에서 음의 방향으로 약간 떨어지는 것을 볼 수 있다. 즉, NaCl의 농도가 큰 경우, Cl⁻ 이 쉽게 산화피막을 통과하여 철 소지와 반응하기 때문인 것으로 생각된다.

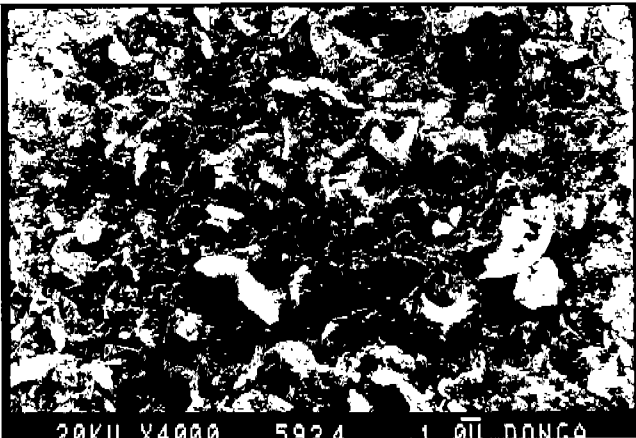
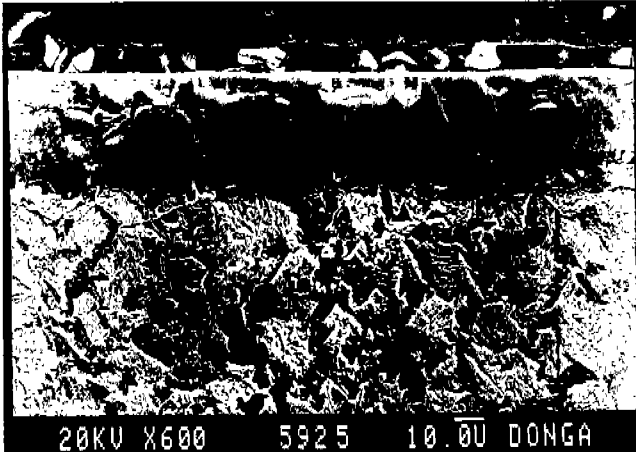


Photo. 1 SEM photograph of rebar, (a) cross section and (b) surface

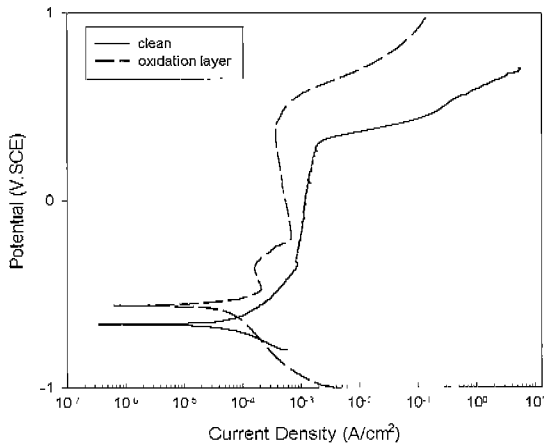


Fig. 2 Polarization curves for clean surface and oxidation layer

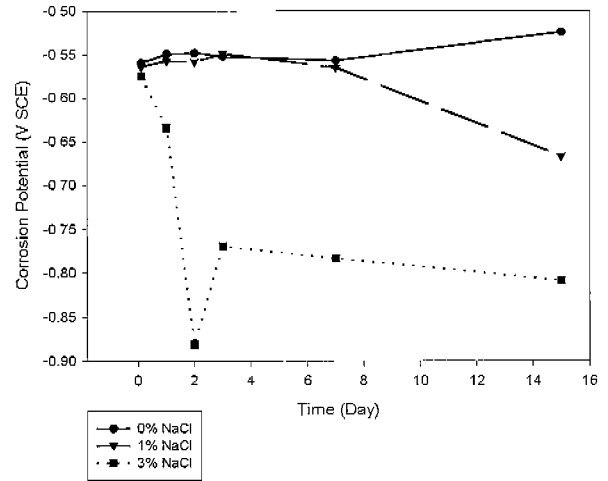


Fig. 3 Corrosion potential of rebar with immersion time and NaCl concentration

3.3.2 부식 속도

Fig. 4에서 NaCl을 함유하지 않은 시편에서는 시간에 따라 부식 속도가 큰 변화를 보이지 않았다. 3일째까지는 부식 속도가 조금씩 증가하였으나 최대값이 0.13mm/year 정도이고 그 이후에는 다시 0.1mm/year 이하로 낮아진다. NaCl을 1% 함유한 용액에서는 약 2일째까지는 부식 속도가 조금씩 증가하나 3일째에 급속히 증가하는 형태를 보였으며 3일 이후에는 0.2mm/year 이하로 안정된 형태를 보이고 있다. 3%의 NaCl을 함유한 용액에서는 2일째에 최대값을 나타내었다고 말하기 어려운 것을 알 수 있다. NaCl의 농도가 약한 경우에는 3일째에 부식 속도가 최대값을 나타낸 것은 Cl⁻ 이 시간이 지남에 따라 산화피막을 뚫고 철소지와 접촉하여 부식속도를 증가 시키는 요인과 pH 13.1의 유사용액에서의 부동태 피막이 형성됨으로써 부식속도가 감소되는 요인의 결과적인 함으로 나타났다고 생각된다. 그러나 NaCl의 농도가 3%인 경우에는 부동태 피막이 생긴다고 해도 Cl⁻이 쉽게 통과하기 때문에 최대값을 이루기 어려운 것으로 생각된다.

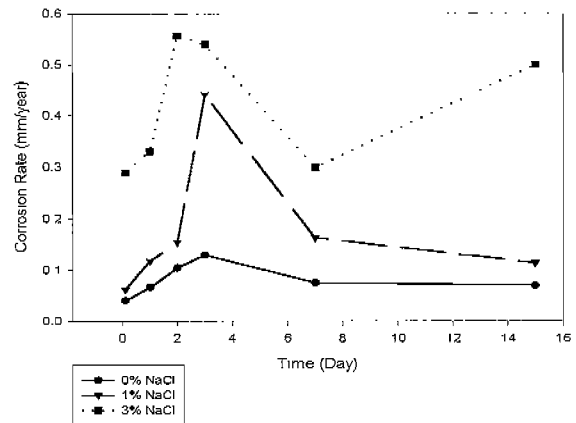


Fig. 4 Corrosion rate of rebar with immersion time and NaCl concentration

3.3.3 Potentiodynamic Method에 의한 분극 곡선

Fig. 5 ~ Fig. 10까지는 Potentiodynamic Method 에 의한 분극 곡선을 NaCl의 농도에 따라 그리고 침지 시간에 따라 나타내었다.

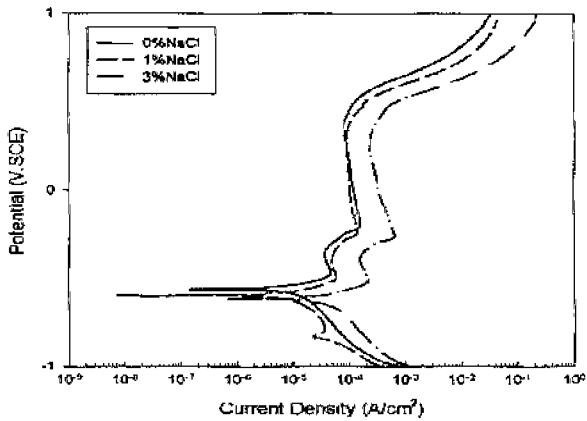


Fig. 5 Potentiodynamic polarization curves as function of different chloride concentrations after 1 hour

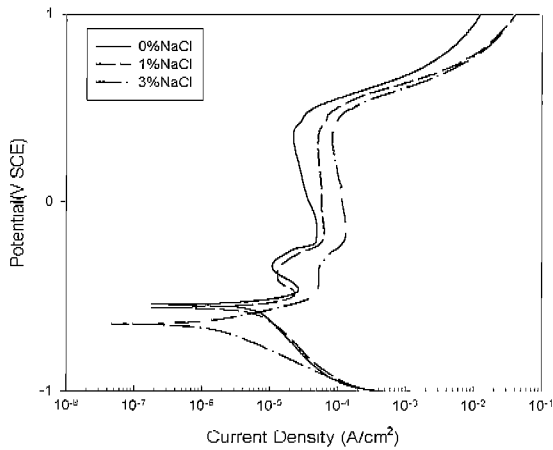


Fig. 6 Potentiodynamic polarization curves as function of different chloride concentrations after 1 day

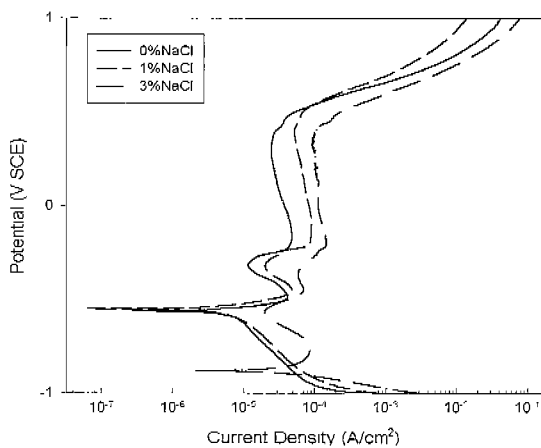


Fig. 7 Potentiodynamic polarization curves as function of different chloride concentrations after 2 days

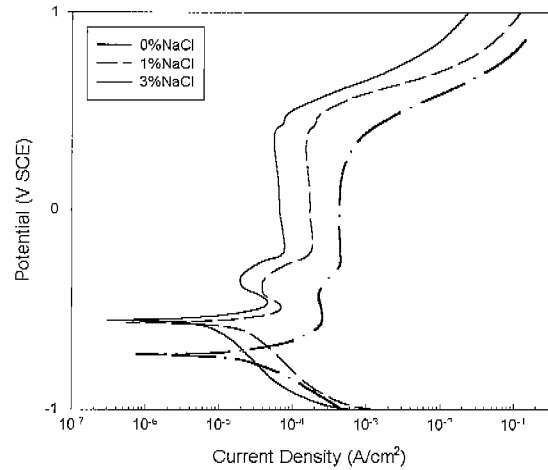


Fig. 8 Potentiodynamic polarization curves as function of different chloride concentrations after 3 days

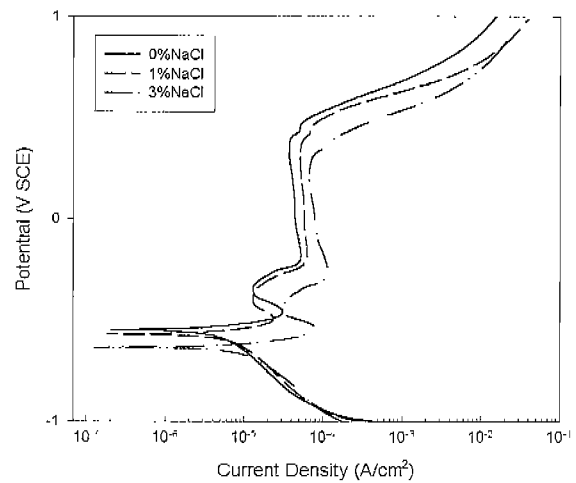


Fig. 9 Potentiodynamic polarization curves as function of different chloride concentrations after 7 days

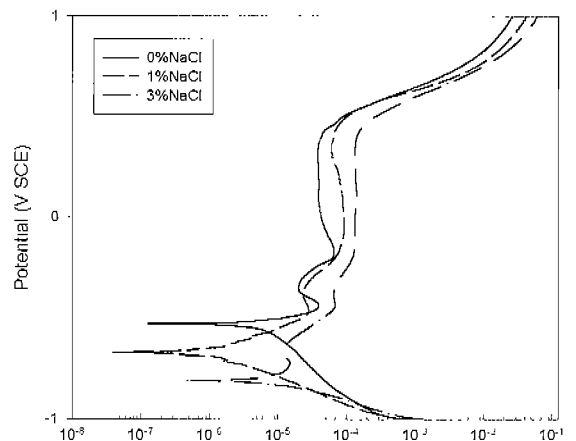


Fig. 10 Potentiodynamic polarization curves as function of different chloride concentrations after 15 days

침지시킨 후 1 시간이 경과한 후인 Fig. 5에서는 0%, 1% NaCl 용액에서는 거의 비슷한 형태의 분극 곡선을 보이며 3% NaCl 용액에서는 전체적으로 전류가 많이 흐르는 방향으로 이동하였음을 알 수 있다. 그러나 부식 전위는 거의 비슷한 위치에서 나타난다.

1일이 경과한 후의 결과를 나타낸 Fig. 6에서는 -250mV까지는 0%와 1% NaCl 용액에서 Potential이 높아짐에 따라 초기는 비슷하나 Potential이 점점 높아지면 1% NaCl 용액에서 더 많은 전류가 흐름을 알 수 있다. 3%의 NaCl 용액에서는 부식 전위는 음의 방향으로 그리고 분극 곡선은 전체적으로 전류가 많이 흐르는 방향으로 이동하는 것은 앞에서 설명한 바와 같이 Cl⁻의 빠른 침투로 철소지와 전해질 사이의 반응 때문인 것으로 생각된다. 또한 3% NaCl 용액에서는 첫번째 Anodic-nose가 다른 농도에서 실험한 것과 비교해 상대적으로 명확하지 않게 나타나고 있다.

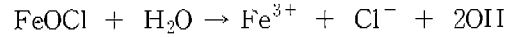
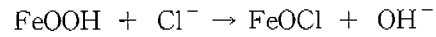
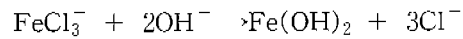
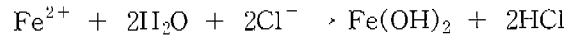
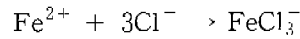
2일이 경과한 후의 그래프인 Fig. 7에서는 3% NaCl 용액에서 부식 전위과 -880mV까지 내려가 있으며 3개의 Anodic-nose가 나타나고 있다. 첫번째 Anodic-nose 이후 -560mV 부근 즉, 다른 농도의 용액에서는 부식 전위로 나타나는 부근 근처에서 전류가 급격히 줄어드는 것을 볼 수 있으며 그 이후의 분극 곡선은 다른 농도의 분극 곡선과 비슷한 형태를 나타낸다. 그러나 두 번째 Anodic-nose는 명확하게 나타나지 않고 있다. Anodic-nose는 시편이 부동태 상태로 변하는 전위나 시편의 원자가전지수가 변할 때 발생한다는 것을 고려할 때 3%의 NaCl을 함유한 용액에서는 Cl⁻이온의 영향에 의하여 부동태가 파괴되어지거나 철근과의 직접적인 반응에 의하여 전류를 증가시키는 작용을 한 것이다.

3일과 7일이 경과한 후의 분극 곡선인 Fig. 8와 Fig. 9은 비슷한 양상을 보인다. 3% NaCl 용액에서 Anodic-nose가 다시 2개로 나타났다. 농도에 따른 곡선의 변화는 전체적으로 볼 때 매우 크게 나타났으며 전류가 급속히 증가하는 전위는 3% NaCl 용액에서 300mV 정도로 다른 용액에 비하여 낮게 나타났다. 3일과 7일이 경과한 후의 차이는 3일이 경과한 후의 실험에서는 농도에 따라 전류가 10배 이상의 큰 차이를 보이나 7일이 경과한 후의 실험에서는 그 차이가 작아짐을 볼 수 있다.

15일이 경과한 후의 그래프인 Fig. 10에서는 농도가 높아짐에 따라 부식 전위가 음의 방향으로 크게 이동하고 있음을 볼 수 있고 3% NaCl 용액에서 Anodic-nose가 다시 3개로 나타나고 있다. 이 때 Anodic-nose는 모두 명확하게 나타나지는 않는다.

이상의 결과에서 나타난 두 군데의 Anodic-nose는 철의 변화에 의한 것으로 첫 번째의 Anodic-nose는 Fe가 Fe(OH)₂로 변한 것이고 두 번째 Anodic-nose는 Fe(OH)₂가 Fe(OH)₃로 변한 것이다.

3% NaCl 용액의 경우 부식이 급속히 증가할 때는 Anodic nose가 3곳에서 나타남을 알 수 있다. 0%, 1%의 경우와는 2번째와 3번째 Nose는 비슷한 Potential에서 생기나 첫 번째의 것은 Cl⁻이온에 의한 다음과 같은 반응으로 나타나는 것으로 생각된다.



3.3.4 Cyclic Potentiodynamic method에 의한 분극 곡선

Cyclic Potentiodynamic Method는 합금을 Screening할 때 임의의 용액에서 일어날 수 있는 부식형태를 예측하는 방법으로 ASTM G-61-86에 구체적인 실험방법이 제시되어 있다. Hysteresis의 형태와 Anodic to Cathodic Transition Potential의 위치, Anodic nose의 유무, Pitting과 Repassivation Potential의 위치 등에 의해서 부식의 형태가 예측된다.

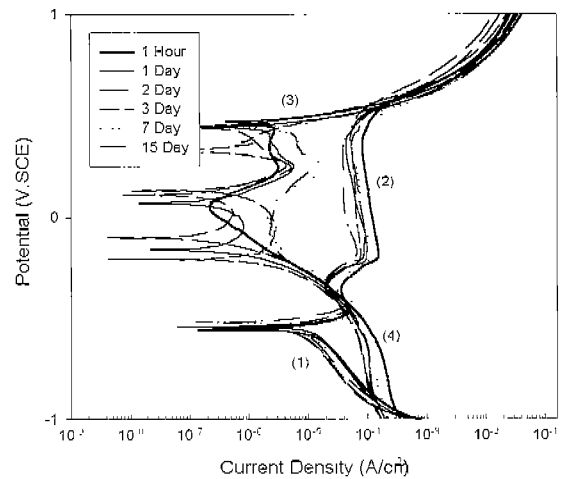


Fig. 11 Cyclic potentiodynamic polarization curves as function of different time at 0% NaCl

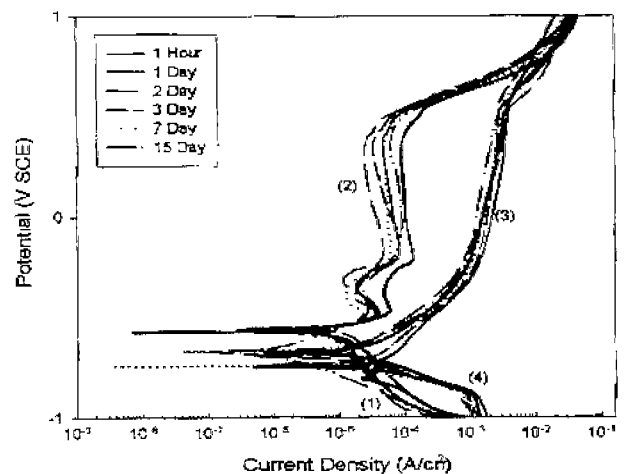


Fig. 12 Cyclic potentiodynamic polarization curves as function of different time at 1% NaCl

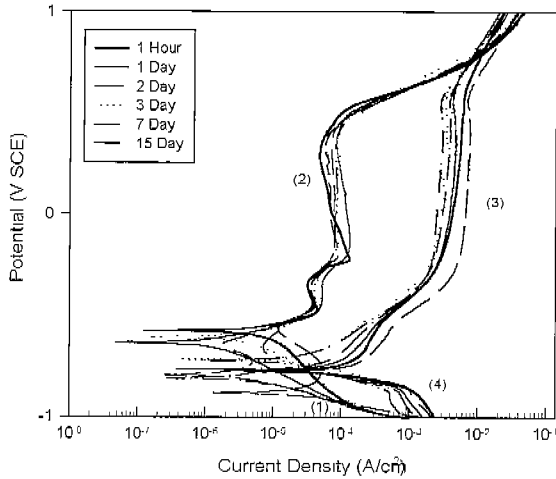


Fig. 13 Cyclic potentiodynamic polarization curves as function of different time at 3% NaCl

Fig. 11 ~ Fig. 13까지는 Cyclic Potentiodynamic method에 의한 분극곡선을 나타낸 것이다. NaCl을 함유하지 않은 경우는 조사된 15일까지 모두 'Positive' hysteresis를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이것은 forward scan시에 형성된 부동태가 안정된 것임을 보여준다. 'Positive' hysteresis 현상과 재부동태 전위 (Repassivation potential: 여기서 약 500mV)가 부식전위보다 높은 곳에 위치해 있으므로 국부부식(Localized corrosion)의 위험은 없다. 그러나 부식전위보다 Anodic to Cathodic Transition 전위가 보다 위에 존재한다는 것은 부식전위로 전위가 내려올 때 형성된 부동태가 쉽게 다시 환원됨을 의미하기 때문에 부식전위 근처에서는 전면부식이 일어날 것임을 알 수 있다. 그리고 부식전위근처에서 전위가 증가할 때 전류가 급격하게 증가하다가 감소하는 'Anodic Nose'가 있는 것으로 보아 부식 전위에서 얼마간의 부식이 진행되고 있다는 것을 알 수 있다.

3.3.5 철근 표면의 육안관찰

육안 관찰 결과를 Photo 2 ~ Photo 4에 나타내었다. NaCl이 들어 있지 않은 시편에서는 침지 시간이 경과하고 분극 실험을 한 후에도 부식 생성물은 관찰되지 않았다. 그러나 Photo 2 ~ Photo 3에서 침지 시간이 경과함에 따라 철근의 rib에서 부식생성물이 관찰되었으며 epoxy coating 된 부분과 노출된 부분과의 경계면에서도 부식 생성물이 관찰되었다. 또한 분극 실험 후의 시편에서도 대부분의 부식은 rib 부분과 coating의 가장자리에서 발생하고 있음을 알 수 있다. Coating의 가장자리에서 발생한 부식은 틈 부식(Crevice corrosion)이며 Rib 부분이 많이 부식한 이유는 주로 철근 제조시 많은 압력을 받고 보관과 운반과정에서 많은 마찰로 인하여 산화피막이 손상을 입은 이유도 있을 것이다.

4. 결 론

(1) 철근 표면에 산화피막이 있는 경우와 없는 경우의 분극곡



Photo 2. Photograph of rebar immersed in 0% NaCl solution after 15 days

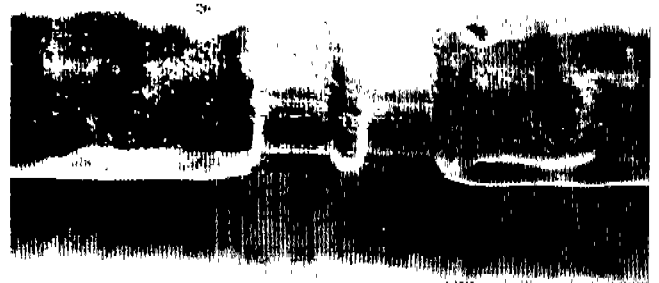


Photo 3. Photograph of rebar immersed in 1% NaCl solution after 15 days



Photo 4. Photograph of rebar immersed in 3% NaCl solution after 15 days

선은 크게 다르게 나타났다. 산화피막이 있는 경우가 부식전위가 높았으며 Anodic-nose도 2개 이상이 나타났다.

(2) 0%와 1%의 NaCl에 철근을 침지한 경우 3일 정도에서 부식 속도가 최대치를 보였다. 그것은 전해질이 산화피막에 침투하여 부식을 촉진시키는 반응과 부동태를 형성하여 부식을 감소시키는 반응의 복합적인 결과로 생각된다.

(3) Potentiodynamic method로 분극실험을 한 결과 침지시간에 따라 3% NaCl 용액에서는 0%, 1%보다 분극곡선의 아래로 이동하여 15일 경과후에는 Anodic-nose가 3개로 나타났다. 이것은 Cl⁻ 이온에 의한 반응 때문으로 사료된다.

(4) Cyclic potentiodynamic 실험의 결과 0%의 용액에서는 부식 전위가 Anodic to Cathodic transition 보다 낮은 곳에서 형성되므로 부식 전위 근처에서는 전면부식이 일어나며 Positive hysteresis 가 나타남에 따라 피팅의 위험이 없음을 알 수 있고 1%와 3%의 경우에는 Negative hysteresis를 나타내므로 부식의 형태가 Pitting임을 알 수 있다.

(5) NaCl이 들어 있는 용액에서는 침지중 Rib에서 틈부식과 Pitting이 발생하였으며 분극 실험 후의 시편에서도 부식은 Rib 부분에 집중되었음을 알 수 있는데 이는 철근의 생산시 Rib 부분이 응력을 많이 받기 때문이며 철근의 운반과 보관중 Rib 부분에서 부분적으로 산화피막이 벗겨진 이유도 있을 것으로 생각된다.

후 기

본 연구 논문은 1998년도 동아대학교 부설 해양자원 연구소의 연구비에 의해 연구된 논문임.

참 고 문 헌

- 고영태 · 박경완(1994). "분극저항 측정법에 대한 고찰", 한국부식학회지, Vol. 23, No. 4, pp 260~266.
- 남상철 · 조원일 · 조병원 · 윤경석 · 전해수(1998). "염분농도에 따른 콘크리트 모사 세공용액에서의 철근 부식 특성", 한국공업화학학회지, Vol. 9, No. 5.
- 장지원 · 조원일 · 이병훈(1996). "갈바니 전류 측정법을 이용한 유사 콘크리트 분위가하에서의 철근부식연구", 콘크리트 학회지, 제8권 2호, pp 163~172.
- 전대회(1995). "실용방식공학", 동화기술 pp 114~116.
- 한국도로공사(1997). "철근의 부식정도와 부착강도에 대한 연구", 한국도로공사 도로연구소, 도로연 97-59-37, pp 74~77.
- 한정섭(1998). "알기쉬운 부식 공학", 반도출판사, pp 33, 216~234.
- Andrade, C., Castelo, V., Alonso, C., Gonzalez, A.(1986). "The Determination of the Corrosion Rate of Steel Embedded in Concrete by the Polarization Resistance and AC impedance Methods", ASTM 906, pp 43~63.
- Avila-Mendoza, J., Flores, J. M, Castillo, U. C.(1994). "Effect of superficial oxides on corrosion of steel reinforcement embedded in concrete", Corrosion, Vol. 50, No. 11, pp 879~884.
- Beavers, J. A., Durr, C. L. and Thompson, N. G.(1998). "Unique interpretations of potentiodynamic polarization technique", NACE, Corrosion 98, Paper No. 300.
- Berke, N. S.(1993). "Corrosion of steel in cracked concrete", Corrosion, Vol. 49, No. 11.
- Broomfield, John P.(1997). "Corrosion Steel in Concrete", E&FN SPON, pp 1~2.
- Capo, T. W.(1987). "Metal handbook", Vol. 13, 9th ed., ASM International, Metals Park, OH, pp 383.
- Flis, J. and Zakrzczymski, T.(1996). "Impedance study of reinforcing steel in simulated pore solution with tannin", J. Electrochem.Soc., Vol 143, No. 8, pp 2458~2464.
- Jones, Denny A.(1996). "Principles and prevention of corrosion", Prentice Hall, 2nd ed., pp 209~220.
- Kumar, P., Mehta, Paulo, Monteiro, I. M.(1993). "Concrete-structure, Properties, and Materials", Prentice Hall.
- Laboratory Corrosion Test and Standards, ASTM STP 866, G. S. pp 65~90.
- Sagoc-Crentsil, K. K. and Glasser, F. P.(1989). "A review of the electrochemical and thermodynamic aspects", Magazine Research, Vol. 41, No. 149, pp 295~209.
- Sandler, O. M. H.(1982). "Metals Handbook", Vol. 5, 9th ed., ASM international, Metel Park, OH, pp 471.
- Schiessl, P.(1998). Corrosion of steel in concrete report of technical comm, 60-CSC.
- Silverman, David, C.(1998). "Tutorial on cyclic potentiodynamic polarization technique", NACE, Corrosion 98, Paper No. 299.
- Slater, J.(1983). "Corrosion of metals in association with concrete", ASTM STP 818.
- Test Method, Tm-01-70 and Tm -01-75, National Association of Corrosion Engineers, Houston.
- Tuutti, K.(1992). "Corrosion of Steel in Concrete", Research Report of the Swedish Cements and Concrete Research Institute at the Institute of Technology.

1999년 12월 3일 원고 접수

2000년 2월 2일 수정본 채택