

# 갈바니電流 測定法을 이용한 유사 콘크리트 분위기하에서의 鐵筋腐蝕연구

Rebar Corrosion Under Simulated Concrete Conditions  
by Using Galvanic Current Measurements

장지원\*      조원일\*\*      이병훈\*\*\*  
Jang, Ji Won   Cho, Won-Il   Lee, Byung Hoon

## 요 약

콘크리트내에 있는 철근의 부식에 영향을 미치는 염소이온, 용접, 굽힘가공 등을 연구할 수 있는 빠르고 간단한 方法인 갈바니 電流測定法을 개발하였다. 철근 부식에 영향을 미치는 主要 因子들에 대해 갈바니 전류측정법, 광학 및 주사전자 현미경을 사용하여 研究하였다. 現場에서 채취한 腐蝕鐵筋을 조사한 결과, 서로 교차하는 철근을 묶은 부분, 철근재료의 결함이 있는 곳, 용접부위에서 심한 국부부식이 관찰되었다. 또, 우선적인 부식이 철근재료의 특정 미세조성 부분에서 집중적으로 일어났다. 현장채취 시편의 부식성질을 갈바니전류 측정결과와 비교하여 연구하였다.

## Abstract

A galvanic current measurement method was developed as a rapid and simple technique to study the effect of chloride concentration, welding, and bending on the rebar corrosion in concrete. Some parameters that were responsible for the corrosion of rebar were identified by using the galvanic current measurement method and optical and scanning electron microscopy. Examination of corroded rebars collected from the field showed severe localized corrosion near grid-intersections, material defects and welded areas in concrete, and preferential corrosion attacks on certain microconstituents of the rebar material. The corrosion behaviors of the field samples are discussed in the light of the galvanic current measurement results.

**Keywords :** rebar corrosion, galvanic cell, materials, chloride, welding, bending.

## 1. 서 론

콘크리트 철근의 腐蝕生成 및 腐蝕速度에 영향을 주는 주요한 인자는 콘크리트의 조성, 콘크리

트의 주위 환경, 콘크리트로부터 발생하는 부식원소 및 철근재료의 결함 등이다. 염소이온은 콘크리트 철근의 부식을 일으키는 주요한 原因으로 널리 알려져있다.

\* 정회원, 한국계면공학연구소, 연구개발부장

\*\* 한국과학기술연구원, 전기화학연구실, 선임연구원

\*\*\* 한국기계연구원, 용접기술연구부, 선임연구원

• 본 논문에 대한 토의를 1996년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 1996년 8월호에 토의회담을 게재하겠습니다.

콘크리트에서의 전기화학적 부식은 철근(rebar)의 不均一成(화학적 조성, 가공 및 용접, 표면결함) 때문에 일어나거나<sup>1)</sup> 또는 콘크리트를 둘러싸고 있는 화학적 혹은 물리적인 環境要素 때문에 일어나게 된다.<sup>2,3)</sup> 이러한 불균일성은 어떠한 특정 조건하에서 심각한 전위차이를 일으킬 수 있으며 결과적으로 부식을 일으키게 된다. 염소이온의 농도차, 구조적 또는 조성결함에 기인하는 macro-cell 부식은 局部腐蝕을 가속화시킨다.

철근의 부식은 매우 복잡하며, 物理的 또는 電氣化學的 因子들의 복잡한 성질과 이들 相互間的 依存性 때문에 개개 부식인자의 기본적 부식기구는 잘 알려져 있지 않다. 지난 이십여 년간에 걸쳐서 철근의 부식을 이해하고 부식측정방법을 진보시키는 등 철근의 부식을 위한 많은 연구노력이 진행되어 왔으나,<sup>4,5)</sup> 아직까지도 철근콘크리트 구조의 열화에 대한 많은 모순된 실험결과와 해석이 보고되고 있다.

철근의 부식속도는 콘크리트 구조를 해체한 후 철근무게 變化를 재어 측정할 수 있으나 이러한 무게 변화 측정에 의한 부식속도 측정 방법은 콘크리트 구조를 물리적으로 破碎하여 철근 시편을 얻어야 한다는 큰 短點이 있다. 따라서 철근의 부식이 전기화학적으로 일어난다는 사실을 이용하여 많은 電氣化學的 부식측정 方法이 개발되어 왔다.<sup>6,7)</sup>

그중에 콘크리트에서 부식을 측정하는 linear polarization법과 polarization resistance법 등이 대표적인데 이러한 측정방법은 對電極과 基準電極의 위치 및 대전극 材料의 종류에 따른 불확실한 요인들에 의해 측정결과가 부정확해지는 短點을 보여주고 있다.

이에 반해 본 연구에서 사용된 갈바니전류 측정법은 상대적으로 장시간에 걸쳐서 부식되는 철근의 부식속도를 in situ 상태에서 連續的으로 測定할 수 있으며, 變動荷重 狀態下에서도 부식 측정이 가능하다는 長點이 있다. 이 방법은 그라인드 매체의 동적 마모 상태하에서의 부식기구에 대한 규명에 이용하여 성공하였다는 보고가 있었다.<sup>6,8)</sup>

본 연구는 유사 콘크리트 조건하에서 철근의 부식속도를 평가하며 철근의 macro-cell 부식을 염

소이온 농도의 함수로서 종합적 해석을 하기 위하여 갈바니전류 測定法을 開發하는데 그 목적이 있다.

## 2. 실험

### 2.1 전기화학측정

콘크리트에서 철근의 부식에 미치는 염소이온의 농도 영향을 조사하기 위하여 갈바니전류 측정법을 선택했다. 실험실적 갈바니셀(beaker-scale 방법)은 두 개의 철근을 염소이온을 함유한 용액과 염소이온을 함유하지 않은 용액에 각각 담그고 이들을 전선으로 연결하여 구성하였다. 갈바니전위와 전류는 Fig. 1(a)에 보인 바와 같은 부식측정 계기를 통하여 수일마다 측정하였다. 내부 無抵抗 電流測定回路(G로 표시)는 전류를 측정하는데 사용하며, 시험용액으로서는 비이커에 담겨있는 500mL 탈이온수에 약 1/8in 크기의 콘크리트 칩 25g을 넣은 다음 CaCl<sub>2</sub>를 각각 0, 0.1, 1, 10%로 변화시켜 사용하였다. 콘크리트 칩이 포화된 용액의 pH는 12.5이었으며, 蒸發損失을 막기 위하여 탈이온수를 최초의 용액높이를 유지하도록 시험기간 동안 계속 첨가하였다. 철근의 化學造成은 분광법으로 조사하여 Table 1에 나타냈다. 직경 1/2in, 높이 1/4in의 철근에 전선을 도전성 에폭시를 사용하여 붙이고 이들을 다시 에폭시 mounting 하여 전극으로 만들었다. 에폭시가 경화된 다음 철근의 아래쪽 표면을 갈아내고 연마하였으며, 내경 1/4in의 Lucite관을 5분에폭시를 사용하여 다른 쪽 표면에 붙였다.

앞의 beaker-scale 갈바니셀 방법의 妥當性을 시험하기 위하여 두개의 철근이 삽입된 콘크리트 블록을 현장에서 채취하여 두 철근 사이에 갈바니전류 측정회로를 연결하였다. 콘크리트 블록의 크기는 2.0in×5.0in×2.5in, 철근의 직경은 1/2in였으며 철근 사이의 거리는 2in이었다. 콘크리트 화

Table 1 Chemical composition of the rebars

C	Mn	P	S	Si	Sn	Cu	Ni	Cr	Mo
0.35	0.72	0.021	0.053	0.03	0.009	0.04	0.04	0.05	0.01

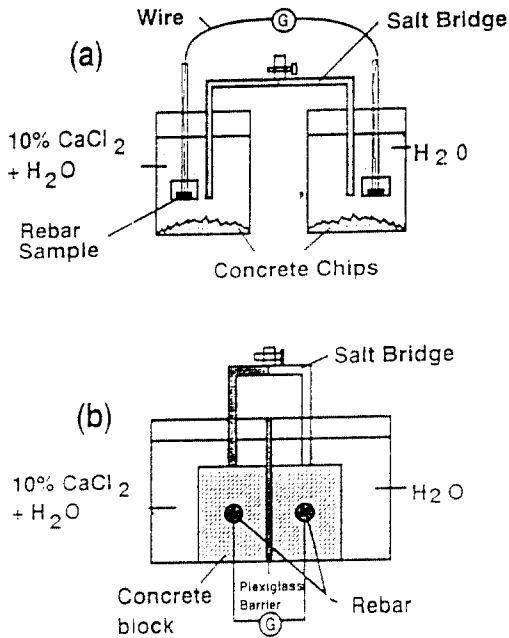


Fig. 1 Schematic representation of experimental set-ups for galvanic current measurements of reinforcements in (a) a simulated concrete environment, and (b) a concrete block

학성분을 분석한 결과 약 1100ppm의 염소이온을 함유하는 것으로 밝혀졌다. Fig. 1(b)에 보인 바와 같이 두 철근 사이에 Plexiglass 배리어를 위치하여 두 부분으로 분리하였으며, 한쪽은 10%의 염화칼슘으로 채우고 다른 한 쪽은 탈이온수로 채웠다. 철근은 서로 전기적으로 단락시켰으며 두 철근사이의 갈바니전류를 시간에 따라 기록하였다.

콘크리트내에 있는 용접 또는 굽힘加工이 된 철근의 갈바니 부식을 조사하기 위하여 Fig. 1(a)의 실험장치에 용접되거나 또는 굽힘가공된 철근을 넣어 실험하였다. 굽힘 철근은 삼점하중굽힘에 의하여 준비하였으며, 1/2in 직경의 철근의 굽힘각은 약 30° 였다. 용접시편의 준비는 수동회복아크 용접법에 의하여 실시하였는데, 직경 1/2in의 철근을 Lincoln E7024(KS E4324) 용접봉을 사용하여 Miller model 330A /BP 용접기로 DC 정극성으로 용접하였다. 용접된 철근 시편은 슬래그를 제거한 다음 갈아내어 평평한 표면을 갖도록 하였

다.

모든 측정은 EG & G model 350A 腐蝕測定裝置를 사용하여 실시하였으며, 포화칼로멜전극(SCE)을 基準電極으로 하여 포화 ammonium nitrate 용액을 함유하는 염나리를 통해 연결되도록 하였다.

## 2.2 현장시편

철근이 콘크리트 블록에 붙어 있거나, 또는 콘크리트 블록에서 떨어져 나온 철근 시편을 미네소타州政府 건물앞에 위치한 I-94 고속도로 橋梁上板과 I-94 고속도로상에 있는 Lowry Hill Tunnel 내부 道路鋪裝으로부터 採取하였다. 철근의 직경은 1/2in였으며, 염소이온의 농도는 1100ppm 이었다. 철근의 부식성질 및 망식부분은 JEOL 840II 주사전자 현미경을 사용하여 철근表面을 관찰하였고 철근斷面은 Olympus microscope model PM-10AD를 사용하여 관찰하였다.

주사전자 현미경 관찰용 철근시편은 10% 염산 용액에 5초 동안 담궈서 철근에 붙어있는 콘크리트를 완전히 제거한 다음 증류수로 씻어내고, 99% isopropyl alcohol을 뿌린 후 공기를 불어 건조하였다. 철근의 단면을 관찰하기위해서 시편을 에폭시로 mounting하여 얼마한 다음 2% Nital 용액으로 애칭한 후 광학 현미경으로 관찰하였다.

## 3. 결 과

### 3.1 갈바니전류측정

철근의 갈바니電位와 電流를 Fig. 1(a)에 나타낸 장치를 사용하여 각기 다른 염소이온 濃度에 대하여 時間變化에 따라서 측정하였으며 그 결과를 Fig. 2에 나타냈다. Fig. 2(a)의 화살표는 시편의 표면에서 노란 腐蝕生成物이 관찰되는 時點을 나타낸 것인데, 이때까지는 염소이온의 농도가 증가할수록 갈바니전류는 큰 것으로 나타났다. 부식 생성물이 나타난 이후에 0, 0.1, 1% CaCl<sub>2</sub>의 농도에서는 갈바니전류가 급격히 증가하였지만, 10% CaCl<sub>2</sub>용액에서는 약간 증가하였다가 감소하는 것

으로 나타났다. 갈바니전위는 10% CaCl<sub>2</sub> 용액에서 가장 活性이 크게 나타났으며, 100일 후에는 불규칙하게 변하는 것으로 나타났다.

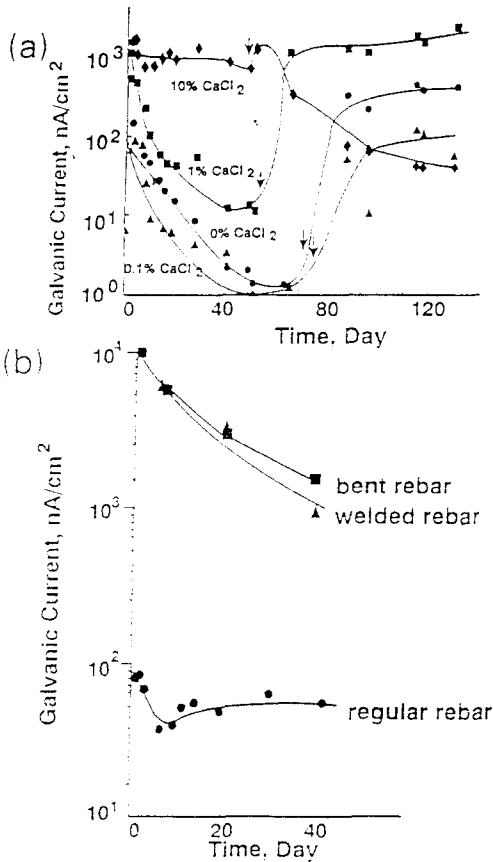


Fig. 2 Galvanic currents of rebars as a function of time (a) at different chloride concentrations, and (b) with welding and bending

갈바니전류 측정시험 후에 철근시편의 표면을 관찰하였으며, 그 결과를 Fig. 3에 나타냈다. 사진에서 왼쪽 편은 철근표면이 염소이온을 함유한 용액 속에 있던 것이며, 오른쪽 편은 염소이온이 없는 용액에 있던 철근이다. 노란 부식 생성물은 왼쪽 편, 즉 염소이온이 있던 용액 속에 있던 시편에서만 발견되는데 이것은 염소를 함유하는 용액에 담궈지는 철근시편이 陽極으로서 작용하며, 염소이온이 없는 용액에 있는 철근은 陰極으로서 작용하기 때문이다. 사진의 오른쪽 편에 보인 음극은

로서 작용하는 시편에 녹이 없는 것으로 미루어 볼때, 본 실험에서 사용된 갈바니셀이 理論的 갈바니셀과 一致함을 보여주고 있다. 또한 이 사진에서 철근시편의 표면에서 부식된 부분이 용액의 염소이온 濃度가 增加할수록 커짐을 알 수 있으며, 결과적으로 갈바니전류가 증가할수록 腐蝕面積이 增加함을 알 수 있다.

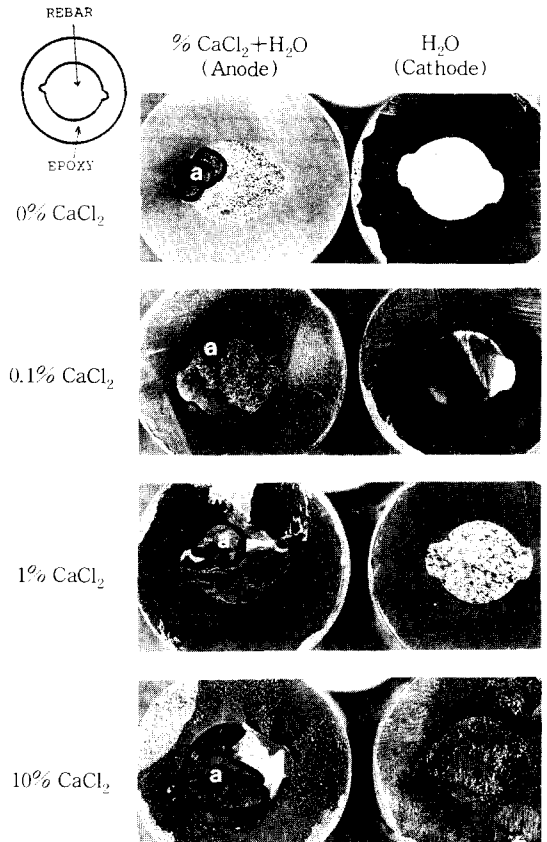
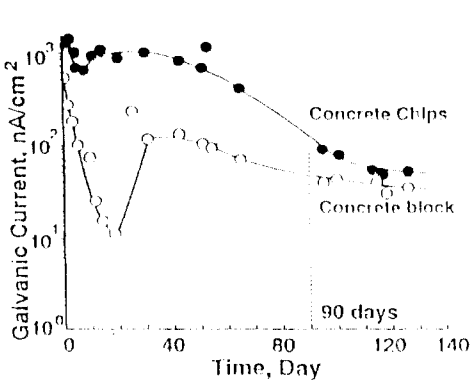
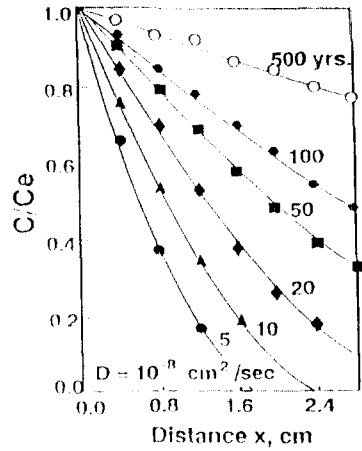


Fig. 3 Corroded areas(indicated by a) on reinforcement surface showing the effect of chloride ion concentration

콘크리트 블록에 삽입된 철근의 갈바니전류를 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 4(a)에 나타냈다. 초기에 갈바니전류는 감소하였다가 다시 증가하였으며, 50일 후에는 점차 감소하여 유사 콘크리트 실험(beaker scale)에서 얻어진 갈바니전류에 접근하였다.



(a)



(b)

Fig. 4 (a) Comparison of galvanic currents obtained by the concrete chip method and the concrete block method(Fig. 1), and (b) chloride movement by diffusion as a function of distance from concrete surface to rebar[Equation(2)]

정상시편, 굽힘시편 및 용접시편에 대한 갈바니 전류의 시간에 따른 변화를 구하였는데, 그 결과를 Fig. 2(b)에 나타냈다. 굽힘시편과 용접시편에서 얻어진 갈바니전류는 시간이 지날수록 감소하는 반면에 정상시편의 경우에는 초기에 감소하였다가 어느 정도 증가하여 일정하게 유지되는 것으로 나타났다. 용접시편과 굽힘시편에서 얻어진 갈바니전류가 정상시편의 경우 보다 100배 가까이 더 큰 것이 주목된다.

### 3.2 부식된 철근의 광학 및 주사전자 현미경 관찰

Fig. 5에는 노란 부식생성물이 형성된 부식 철근의 대표적인 現場試片(a)과 철근의 부식에 의하여 나타난 콘크리트 龜裂(b)을 보여주고 있다. 철근의 심각한 局部腐蝕은 철근교차부에서 발견되었으며(c), 또한 재료결함부(개재물)(d), 용접부 위(e)에서도 국부부식이 발견되었다. Fig. 5(f)는 부식에 의해 본래의 부피보다 반 이상 감소한 부식된 철근을 보여주고 있다.

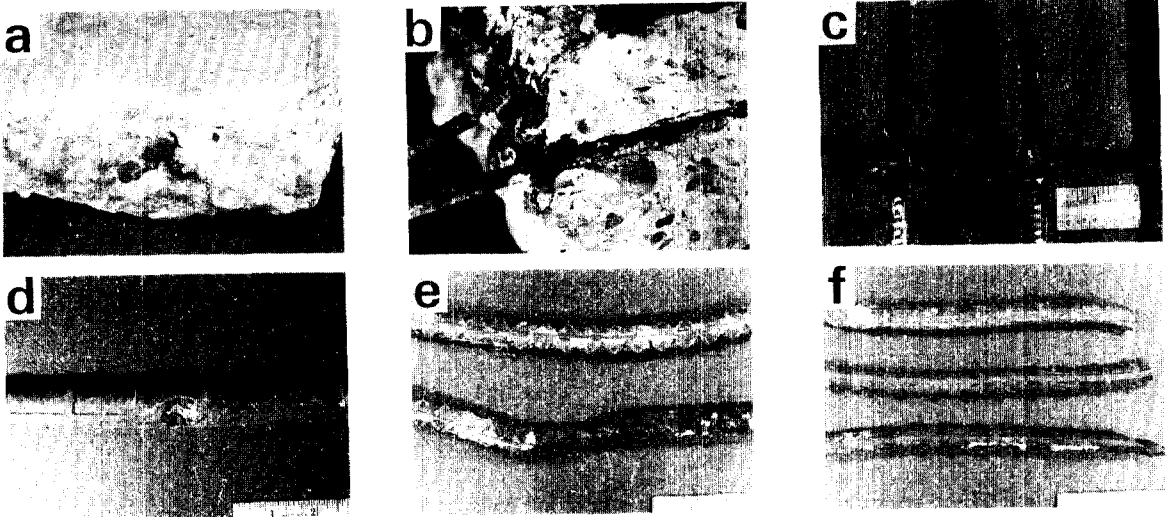


Fig. 5 Corroded reinforcements with and without concrete blocks collected from the field : (a, b) concrete cracks around corroded reinforcements, (c) severe corrosion near grid-intersections, (d, e) localized corrosion near material defects(inclusions) and welded areas, and (f) reinforcement volume changes by corrosion

부식된 철근의 표면을 주사전자 현미경으로 조사하였는데, Fig. 6에서 보듯이 스케일층에서 수많은 날카로운 균열이 발견되었으며(a), 또한 철근 자체에 나타난 不規則한 龜裂이 관찰되었다(b). 腐蝕層과 金屬母材 사이에 空間이 형성되어 있는데(Fig. 6(c)), 이는 염소이온이 침투하여 철근 전체로 퍼져나갈 수 있을 정도로 충분히 넓다. Fig. 6(d)는 또 다른 철근의 부식양상으로서 철근의 부식이 鐵筋材의 微細構造의 罅, 특히 碳化物(cementite)에서 시작되어 傳播된 것을 보여주고 있다.

부식된 철근을 잘라서 그 단면을 광학 현미경으로 관찰하였는데, Fig. 7(a)에서 보듯이 부식된 철근의 표면이 평탄하여도 그 바로 밑에는 심각한 부식이 일어났을 알 수 있다. 통상적인 鐵筋의 材質은 軟鋼이며, 이 연강은 페라이트(ferrite)(Fig. 7(a,b)의 하얀 부분)와 펄라이트(pearlite)(검은 부분) 구조로 이루어져 있다. Fig. 7(b)에서 펄라이트 구조가 우선적으로 부식이 일어나고,

페라이트 구조가 펄라이트 구조보다 더 부식에 강하다는 것을 보여주고 있다. Fig. 7(c)는 分光 필터를 사용하여 얻어진 결과인데, 철근의 부식이 미세구조의 粒界를 따라서 퍼져 나가고 있음을 보여준다.

#### 4. 고 찰

철근의 主材料인 연강에 존재하는 不純物들은 보통 대기나, 中性의 물, 또는 土壤에서는 부식속도에 별다른 영향을 주지 못하지만, 酸性溶液 및 鹽素이온이 있는 경우에는 불순물들이 부식에 심각한 영향을 준다<sup>9)</sup>. 黃成分을 가진 개재물이 존재하는 경우 부식속도는 크게 증가하는데 반하여, 철근에 Cu, Cr 또는 Ni를 소량 첨가하거나 황성분을 줄이면 염소분위기에서의 철근 부식속도는 크게 감소한다.<sup>10)</sup>

연강 미세조직의 主要한 2相 즉, 페라이트와 펄라이트 사이에 형성되는 갈바니셀, 또는 2상과 임

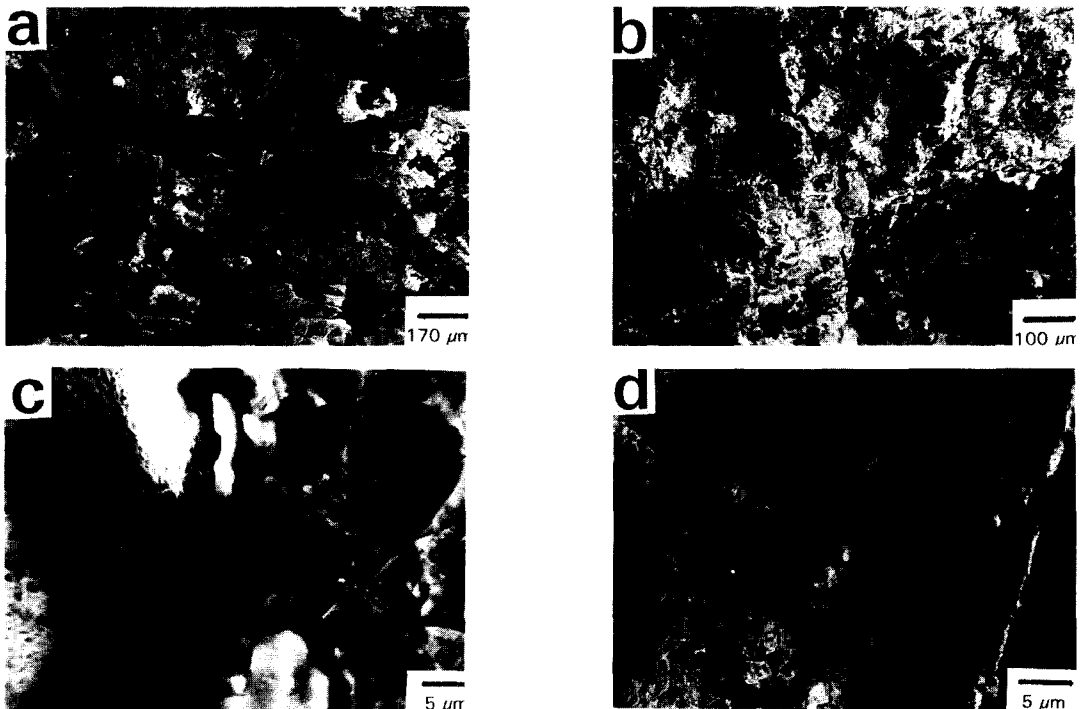


Fig. 6 Surfaces of corroded reinforcement by scanning electron microscopy : (a) sharp cracks on oxide layer, (b) irregular cracks in reinforcement metal matrix, (c) a space between oxide layer and metal matrix, and (d) corrosion initiation and propagation along grain boundaries of reinforcement material

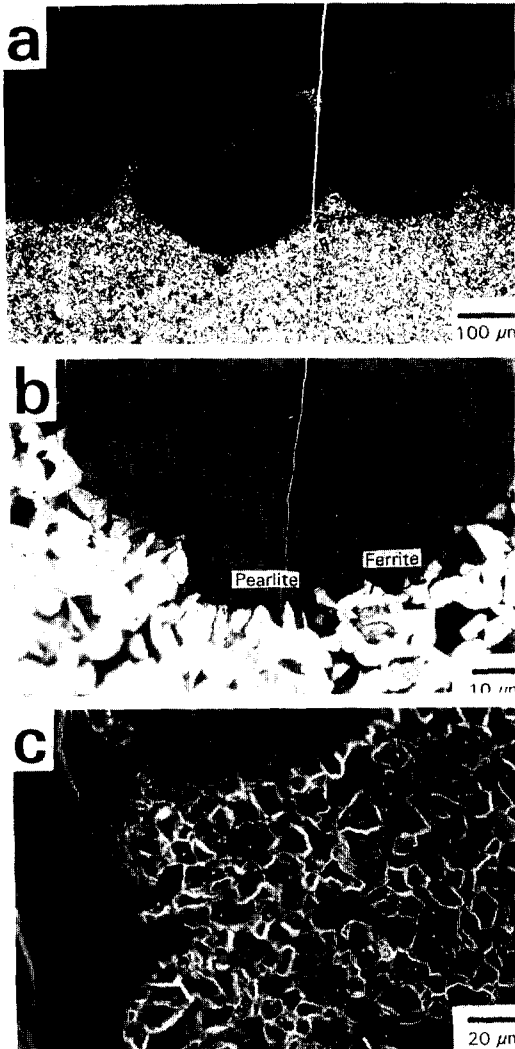


Fig. 7 Cross sections of corroded reinforcement by optical microscopy : (a) severe corrosion beneath the surface, (b) preferential corrosion on pearlite structure, and (c) corrosion propagation along the grain boundaries of reinforcement material

계를 따라 형성되어 있는 개재물 사이에 형성되는 갈바니셀은 Fig. 6과 7에서와 같이 철근의 부식속도를 가속화시킬 수 있다. 軟鋼의 2상인 페라이트와 펄라이트가 전기적으로 연결되면 電位差에 의해 電子가 이들 사이를 移動하게 된다<sup>11)</sup>. 전류가 흐르는 방향은 어느 조성물이 더 活性的인가에 의하여 결정되므로, 더 活성이 큰 조성물은 陽極으로, 조금 더 귀한 조성물은 陰極으로서 작용하게

된다. 갈바니 腐蝕의 驅動力은 이들 조성물 사이에 형성되는 電位差異이다. Fig. 7(b)는 펄라이트가 양극이며 페라이트가 음극으로 작용한다는 것을 암시한다.

겨울철에 사용되는 눈 얼음 제거용 염화칼슘의 사용은 염소를 함유하는 콘크리트와 염소를 함유하지 않은 콘크리트 사이에서 철근 간에 강한 갈바니 부식셀을 형성할 수 있다. 철근 근처에 염소 이온이 있게 되면, 철근의 自然電位가 變하고 이 자연전위 변화에 의해 콘크리트내에 있는 철근 사이에 갈바니 부식셀이 형성된다<sup>11)</sup>. 염소이온이 없는 콘크리트에 있는 많은 철근 面積이 음극으로 작용하거나 철근이 酸素나 大氣에 露出이 되면 갈바니 부식은 加速된다. 또한 갈바니 부식셀은 철근의 금속학적인 결합과 같이 材料의 質의 差異가 존재하는 철근 간의 접촉에 의해서도 형성될 수 있다<sup>10)</sup>.

본 연구에서 사용된 갈바니전류 측정법은 염소 이온에 의하여 오염된 철근과 오염되지 않은 철근 사이에 존재하는 鹽素이온 濃度差異에 의해 갈바니 셀이 형성되어 있음을 보여주고 있으며, 염소 이온에 의해 오염된 철근의 부식속도는 철근 표면에 노란 부식생성물이 나타날 때까지는 염소이온 농도가 높아질수록 증가하고 있음을 보여주고 있다. 그러나 갈바니전류의 크기는 철근 표면의 부식생성물이 많아질수록 감소하였다. 철근 표면을 뒤덮고 있는 腐蝕生成物은 갈바니電流의 커다란 變化를 일으키는 주된 역할을 하는 것으로 사료되며, 앞으로 이러한 성질의 원인에 대한 계속적인 研究가 必要하다. 철근의 局部腐蝕은 金屬學的으로 결합부위, 불연속부등에서 시작되고 있음을 보여주고 있으며, 이러한 결합은 다상계 미세구조, 국부적인 塑性變形, 용접연결부, 미세구조의 입계 및 非金屬 介在物 등일 수 있다<sup>12,13)</sup>.

본 실험에서 철근의 부식에 대한 염소이온농도의 영향을 콘크리트 칩으로 飽和시킨 試驗溶液을 사용한 類似 콘크리트 霧圍氣를 만들어 조사하였다. 이러한 실험실적 설정을 비교하기 위하여, 이들 결과를 콘크리트 블록을 사용하는 다른 실험결과와 比較하였다. 이에 따르면 갈바니전류의 시간 경과에 따른 변화모양이 유사하게 나타났으며, 終

局에는 서로 거의 接近하는 것으로 나타났다(Figure 4(a)). 이러한 비교에 의해, 이와같은 實驗室의 시험이 철근의 腐蝕에 대한 環境要因을 詳細하는 迅速한 試驗法이 될 수 있음을 제시할 수 있다.

부식초기에 나타나는 약간의 갈바니전류의 차이는 콘크리트 블록을 통한 염소이온의 느린 확산에 기인하는 것으로 사료된다. 콘크리트 블록을 통한 鹽素이온의 擴散速度는 Fick's 확산 제2법칙에 따라 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{dc}{dt} = D \frac{d^2c_e}{dx^2} \quad (1)$$

여기서  $c$ 는 시간  $t$ 에서 표면으로부터 거리,  $x$ 만큼 떨어진 곳에서의 염소이온농도이며,  $c_e$ 는 평형에서의 농도(10%)이다. 정상적인 콘크리트에서의 염소이온의 확산계수,  $D$ 는  $10^{-7} \sim 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$ 로 알려져 있으며<sup>15)</sup>, 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} c &= 0 \text{ at } t = 0 (0 < x < \infty) \\ c &= c_e \text{ at } x = 0 (0 < t < \infty) \end{aligned} \quad (2)$$

$$c/c_e = 1 - \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (3)$$

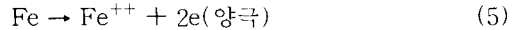
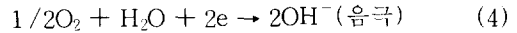
콘크리트 표면에서 철근 까지의 거리는 2.8cm이며, 이러한 거리를 鹽素이온이 擴散해 가기 위해서는 이론적으로는 10년 이상이 所要된다(Fig. 4(b)). 하지만 Fig. 4(a)에 나타난 결과에서는 0.25년(90일)만에 염소이온이 철근에 도달한 것으로 나타났으며, 이러한 차이는 실제 콘크리트에서는 이미 균열이 존재되어 있으며 이 균열을 따라 염소이온의 확산이 급격히 이루어지는 것에 기인하는 것으로 사료된다.

전기화학적 측정을 끝낸 철근 시편의 표면을 Fig. 3에서 보면 시험한 결과, 염소이온이 있는 용액에 담겨진 철근은 양극으로 염소이온이 없는 용액에 있는 것은 음극으로 작용하는 것으로 나타났다. 음극으로 작용한 시편은 부식이 나타나지 않았으며, 이로써 본 실험에 사용된 철근이 理論的 갈바니쌍으로 작용한 것을 證明할 수 있었다.

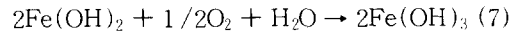
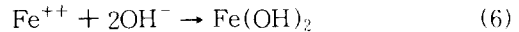
철근에 나타나는 많은 腐蝕生成物은 철근보다 큰 specific volume을 가지며, 부식생성물의 생성에 따른 부피팽창은 콘크리트의 龜裂을 일으킬 수 있는 應력을 誘發한다. 이러한 균열은 염소이온의

침투를 용이하게 하며, 결과적으로 콘크리트 철근의 빠른 부식을 초래하게 된다.

콘크리트 鐵筋의 부식은 수화된 산화물의 형성에 의하여 진행될 수 있으며, 이에 따른 腐蝕反應은 다음과 같이 나타낼 수 있다.



(5)식의 반응에 의해 생성된  $\text{Fe}^{++}$ 는 다음과 같은 반응에 의하여 水化物을 형성한다.



콘크리트에서 수화된 철근산화물은 마그네타이트( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), 헤마타이트( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), 게타이트( $\text{FeOOH}$ )와 같이 다양한데 pH, 산소농도 및 철근의 구성에 따라서 복잡한 화합물계를 형성하게 된다<sup>16)</sup>.  $\text{FeOOH}$ 는  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 나  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 보다 금속표면에 附着成이 더 좋은 것으로 알려져 있으며<sup>17)</sup>,  $\text{FeOOH}$  산화물은 금속기지 표면에 존재하여 금속의 腐蝕速度를 느리게 할 수 있다. Fig. 6(c)에 나타난 산화물은  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 나  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 인 것으로 여겨진다.

도로의 진동에 따른 피로응력과 같은 機械的인 應力은 부식 철근에서 균열을 일으키는 主要原因이며, Fig. 6(a)에서 보는 바와 같이 취약한 스케일 내에 날카로운 균열을 유발시킨다. 금속기지내에서 발견되는 불규칙한 균열 또한 부식에 의해 생성되어 疲勞應力에 의해 전파된 것으로 사료된다<sup>18)</sup>.

철근의 熔接은 부식의 관점에서 특히 注意를 要하는 작업이다. 용접시 금속의 국부적인 加熱 때문에 상변태가 일어나거나 개재물과 같은 제2의 析出物이 形成되고 용접부 주위에 應力이 발생할 수 있는데<sup>19)</sup>, 이러한 것은 심각한 국부적인 電氣化學 性質의 變化를 야기한다. 용접된 철근에서는 용접금속과 열영향부위(HAZ)에 걸쳐서 금속학적인 상변태가 일어나서 전기화학적 특성을 결정하는 중요한 인자인 미세구조와 형상이 변하게 된다. 금속의 미세구조는 冷却速度에 따라서 폭넓게 달라지며, 또한 용접시 가해지는 에너지, 예열정도, 용접비드의 크기에 따라서 변한다. 화학적조



성의 불균일 및 용접 개재물(산화물 및 황화물)을 가진 용접된 금속의 미세구조는 보통 열영향 부위 또는 본래의 금속이 갖는 구조와는 판이하게 달라지게 된다<sup>20)</sup>. 그러므로 용접金屬, 熱影響部位 및 용접 모재의 電氣化學的 特性은 각기 다르게 된다. 용접금속이 용접모재보다 더 活性이 크며, 陽極으로서 작용하게 되는데(Fig. 2(b)), 용접된 철근 부근에서 심각한 局部腐蝕이 나타나는 것을 Fig. 5(e)에서 찾아볼 수 있다.

철근을 굽히면 슬립에 의하여 철근에 소성변형이 일어나게 된다. 철근의 굽힘은 電位理論으로 설명할 수 있으며, 전위가 생성, 재배열되어 소성변형된 주위에 축적되게 된다. 電位密度가 높은 부분은 일반적으로 열역학적으로 不安定하며, 에너지가 높아서<sup>21)</sup> 전기화학적으로 活性을 띠게 된다. 전위밀도의 높고 낮음에 의한 전기화학적 성질의 差異때문에 Fig. 2(b)에 보인 바와 같이 정상적인 철근에 비해서 소성변형된 철근의 腐蝕速度가 100배 이상 높게 나타났다.

## 5. 결 론

1. 유사 콘크리트 분위기에서 철근의 부식에 대한 염소이온농도의 영향을 조사하기 위한 간편하고 빠른 갈바니전류 測定法을 開發하였다.
2. 철근에 노란 부식생성물이 생길 때까지 갈바니電流는 염소이온의 濃度가 높아질수록 增加하였다.
3. 유사 콘크리트 분위기하에서 측정된 철근의 갈바니전류는 콘크리트 블록에 삽입되어진 철근의 갈바니전류와 잘 一致하였다.
4. 갈바니전류 측정법에 의하여 측정된 熔接철근과 굽힘철근의 腐蝕速度는 정상적인 철근에 비해 100배 이상의 큰 부식속도를 나타냈다.
5. 심각한 局部腐蝕이 콘크리트 철근의 그리드-교차부, 재료 결합부 및 용접부 근처에서 발견되었다.
6. 철근의 부식은 일단 발생하면 材料의 粒界를 따라서 전파되었다.
7. 철근의 微細構造의 펄라이트 구조는 콘크리트의 부식환경하에서 페라이트 구조보다 우선적인 腐蝕이 일어났다.

## 감사의 글

본 연구의 수행을 지원하여 준 미네소타대학의 Center for Transportation Studies에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. S. Popovics, T. Simenov, G. Bozhinov, N. Barovsky, Proc. of Corrosion of Rebar in Concrete Construction, London, England, held June 13-14, 1983, pp. 233-237.
2. R. Driver, R. J. Meakins, British Corrosion J., 12 (1977). pp. 115-117.
3. A. Sagues, R. Powers, "Effect of Concrete Environment on the Corrosion Performance of Epoxy Coated Reinforcing Steel," Corrosion/90 Paper no. 311. (Houston, TX : NACE, 1999)
4. C. Andrade, V. Castelo, C. Alonso, A. Gonzalez, "The Determination of the Corrosion Rate of Steel Embedded in Concrete by the Polarization Resistance and AC Impedance Methods," Corrosion Effect of Stray Currents and the Techniques for Evaluating Corrosion of Rebars in Concrete, ASTM STP 906, (Philadelphia, PA : ASTM, 1986), pp. 43-63.
5. K. Tuutti, "Corrosion of Steel in Concrete," Research Report of the Swedish Cements and Concrete Research Institute at the Institute of Technology, (1992).
6. J. J. Pavlica, "Electrochemistry of Pyrrhotite in Flotation," (Master's thesis, University thesis, University of Minnesota, 1974).
7. R. L. Pozzo, I. Iwasaki, J. of Electrochem. Soc., 136 (1989), pp. 1734-1740.
8. J. W. Jang, I. Iwasaki, J. J. Moore, Corrosion, 45 (1989), pp. 402-407.
9. Z. Foroulis, H. H. Uhlig, J. of Electrochem. Soc., 112(1965) pp. 1177-1181.
10. H. H. Uhlig, R. W. Revie, Corrosion and Corrosion Control, 3rd ed., (New York, NY, J. Wiley and Sons, 1985), pp. 114-121.
11. M. G. Fontana, N. D. Greene, Corrosion,

- (New York, NY, McGraw-Hill, 1978), pp. 297-324.
12. W. F. Savage, E. F. Nippes, F. F. Szekeres, *Welding Journal*, 55 (September 1976), 260S-268S.
  13. J. Jang, J. E. Indacochea, *Journal of Materials Science*, 22(1987), pp. 689-700.
  14. C. S. Hartley, M. A. Eisenberg, Proc. of the Int'l Conference, "Dislocation Modeling of Physical System," Gainesville, Florida, held June 22-27, 1980, pp. 373-380.
  15. T. Miyagawa, *Iron and Steel Institute of Japan*, 76 (1990), pp. 1449-1457.
  16. T. Misawa, K. Hashimoto, W. Suetake, S. Shimodaira, Proceedings of the 5th International Congress on Metallic Corrosion (Houston, TX : NACE, 1972), pp. 775-779.
  17. J. Keiser, C. Brown, R. Heidersbach, *Corrosion Science*, 23(1983), pp.251-259.
  18. *Metals Handbook*, 8th ed. , vol. 9, (Metals Park, OH : ASM, 1974). pp. 68-78.
  19. T. P. Hoar, *British Corrosion J.*, 2(1976), pp. 46-48.
  20. M. Henthorne, R. N. Parkins, *British Corrosion J.*, 2(1967), pp. 186-192.
  21. G. P. Ray, R. A. Jarman, *British Corrosion J.*, 15(1980), pp. 226-227.
- (접수일자 : 1996. 3. 8)