



정전류 펄스법을 이용한 콘크리트 내 보강철근의 부식 연구

소형석^{1)*}

¹⁾서남대학교 건축공학과

The Use of Galvanostatic Pulse Transient Techniques for Assessing of Corrosion Rate of Reinforcing steel in Concrete

Hyung-Seok So^{1)*}

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Seonam University, Namwon 590-711, Korea

ABSTRACT An electrochemical transient response technique was used to study the corrosion of reinforcing steel bar in the concrete. Analysis of the transient electrochemical potential response in a corrosion interface to an applied current has enabled the separate components that make up the measured transient response to be isolated. These components display a range of resistances and capacitances, dependent on the corrosion conditions of the reinforcing steel, which may be attributed to the corrosion process, to effects within the concrete cover or to film effects on the surface of the concrete. In this technique, the corrosion rate was evaluated by summing all of the resistances in the separate components to obtain an aggregated corrosion resistance. However, it is possible that not all resistances identified are associated with the corrosion process. The results obtained show that the corrosion rates are significant dependent on the assignment of the separate components to either corrosion or to other processes. The assignment of resistive components associated with the corrosion rate can be clearly identified by taking a series of the transient measurement at different lateral distances from the corroding reinforcing steel. An inappropriate selection of measurement time however may result in an additional resistance, which is not associated with corrosion, being included or part of the resistance associated with corrosion being left out.

Keywords : corrosion, reinforcing steel, concrete, transient, lateral distance

1. 서 론

철근콘크리트구조물에서 보강철근의 부식은 조기 성능 저하와 붕괴의 주요 원인이다. 그러나 부식은 콘크리트 내부에서 보이지 않게 시작되어 은밀하게 진행된다. 만일 보강철근의 부식이 균열이나 녹 발생과 같이 시각적으로 나타났다면, 이를 위한 보수 및 보강조치는 훨씬 많은 비용을 필요로 할 것이며 비효율적일 것이다. 만일 콘크리트 내부에서 보이지 않게 일어나는 보강철근의 부식을 보다 초기 단계에 정확하게 파악할 수 있다면, 관리자는 가장 경제적이고 효율적인 보수 및 보강 전략을 수립할 수 있을 것이다.

최근 전기화학적 방법 (electrochemical method)을 이용한 부식 측정 기술은 비교적 정확할 뿐 아니라 적은 부식양도 짧은 시간 내에 측정이 가능한 비파괴 기술로서 크게 주목받고 있다. 이중 가장 확립되어 있는 방법은 콘크리트 표면에서 보강철근의 부식전위 (corrosion potential)

를 측정하는 자연전위법 (half-cell mapping)¹⁾이다. 이 방법은 철근콘크리트구조물에서 보강철근의 부식 발생 가능성 (ASTM C876)과 그 부위를 현장에서 간단하게 조사 및 파악할 수 있는 방법으로서 현재 가장 널리 이용되고 있다. 그러나 자연전위법은 단지 부식 발생의 가능성만을 나타내는 정성적인 평가일 뿐 부식률과 같이 문제의 심각성을 정량적으로 나타낼 수는 없다.

자연전위법과 함께 연합하여 사용할 수 있는 하나의 방법은 콘크리트의 전기저항 (concrete resistivity)²⁾을 측정하는 것이다. 만일 자연전위법에 의해 “높은 부식 가능성(90% 이상)”으로 조사된 측정 부위가 낮은 콘크리트의 전기저항 값을 나타낸다면, 이는 실제 보강철근의 부식률이 높음을 의미한다. 그러나 이 방법도 보강철근의 부식을 상대적으로 나타내는 간접적인 평가일 뿐 부식률 (즉 부식 속도)을 정량적으로 측정할 수는 없다. 보강철근의 부식률을 직접 정량적으로 측정한다는 것은 이러한 간접적인 측정 기술에 의해 보강철근의 부식이 모호하게 조사되었을 때, 이를 해결할 수 있는 방안으로서 특히 중요한 의미를 갖는다.

보강철근의 부식률을 직접 측정할 수 있는 전기화학 방법에는 분극저항법 (linear polarization resistance)³⁾, 교

*Corresponding author E-mail : sohs01@paran.com
Received July 9, 2007, Accepted August 31, 2007
©2007 by Korea Concrete Institute

류임피던스법 (AC impedance)⁴⁾, 정전류/정전위 펄스법 (galvanostatic/potentiostatic pulse transient response)⁵⁾ 등이 있으며 이중 분극저항법이 가장 대표적이다. 분극저항법 (LPR method)은 철근콘크리트구조물에서 보강철근의 순간 부식률을 직접 측정하기 위해 개발되었으며 현재 실험실에서 가장 많이 사용되고 있다. 이 방법은 보강철근의 부식전위 (E_{corr}) 부근에서 전위 (potential; E)와 전류 (current; I)가 선형적인 관계를 유지한다는 원리를 이용하여 양극 (anode) 혹은 음극 (cathode) 반응의 타펠 (tafel) 기울기로부터 분극저항 (polarization; R_{ct})을 측정하여 부식전류 (corrosion current; I_{corr})를 결정하는 기술이다. 그러나 비록 분극저항법이 자연전위법이나 전기저항법에 비해 보강철근의 부식률을 직접 측정하고 정량적인 값을 제공해 줄 수 있다는 큰 장점을 갖고 있지만, 몇 가지 측정 방법 자체의 불확실성 및 오차로 인해 실제 현장에서 확대 적용되지 못하고 있다. 첫째, 분극저항 R_p 는 보강철근의 표면이 아닌 콘크리트 표면에서 측정된다. 때문에 측정된 분극저항에는 피복 콘크리트의 저항이 포함되어져 있다. 따라서 피복 콘크리트의 저항은 독립적으로 측정되어야 하며 콘크리트 표면에서 측정된 분극저항 값으로부터 반드시 공제되어야 한다. 둘째, 부식전위 (E_{corr})의 안정화를 위해 필요한 시간간격 (t ; delay time)의 부적절한 선택 및 적용은 부정확한 결과를 야기한다. 부식전위의 안정화를 위해 필요한 시간 (t)은 보강철근의 부식 상태에 크게 의존한다. 셋째, 비록 피복 콘크리트의 저항을 공제하여 분극저항 R_p 를 산출하였다 하더라도, 측정된 분극저항에는 보강철근 표면에서의 부식 활동과 관련된 저항뿐 아니라 여러 가지 원인에 기인된 저항 값들이 함께 포함되어져 있다. 예를 들어, 서서히 일어나는 콘크리트 내 이온의 확산저항 (늦은 시상수 (time constant)를 가짐) 혹은 매우 빨리 발생하는 보강철근 표면의 필름 효과 (dielectric film, 빠른 시상수를 가짐) 등이 콘크리트 표면으로부터 측정된 분극저항에 포함되어져 있으며 부식과 관계없는 이들 저항들을 R_{ct} 로부터 분리시킬 수 없다.

한편, 교류임피던스법 (AC impedance)은 직류신호에 의한 분석이 곤란한 경우에도 적용 가능한 방법으로 분극저항 뿐 아니라 전해질 (피복 콘크리트)의 저항이 동시에 측정되어 보강철근의 부식에 대한 구체적인 정보를 제공해 줄 수 있는 매우 유용한 방법이다. 특히 전해질의 저항이 매우 큰 경우나 측정의 특성상 저항을 보정하기 어려운 경우에도 적용할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 이 방법은 장시간 (수 분에서 수 시간까지)의 측정이 요구되며 측정 결과의 평가와 해석이 매우 어렵다는 단점 때문에 현장 조건과 같이 불안정한 부식계에서 특히 적용이 어렵다. 반면 정전류 펄스법 (galvanostatic pulse transient method)은 전술한 많은 어려움들과 결점을 극복할 수 있는 기술로서 보다 최근에 개발된 방법이다. 이 방법은 정전류 분극 저항 측정법 (galvanostatic LPR)과 유사하게 1 mA 이하의 정전류 (galvanostatic

pulse)를 콘크리트 표면으로부터 보강철근에 인가하고 이로 인해 야기된 부식전위의 변화 (transient response)를 시간에 따라 측정한 것이다. 시간의 함수로 나타내어진 부식전위의 변화 곡선은 콘크리트 내 보강철근의 전기화학적 부식 메커니즘, 즉 부식률 평가를 위한 일련의 저항/커패시턴스 (resistance/capacitance) 모델을 구성하는데 사용될 수 있다.

본 연구는 정전류 펄스법을 이용한 콘크리트 내 보강철근의 부식률 평가에 관한 실험 결과를 나타낸 것으로서 정전류 펄스 결과로부터 부식률의 결정, 측정 시간의 영향 등을 중심으로 살펴보았다.

2. 정전류 펄스법에 의한 보강철근의 부식률 측정

정전류 펄스법은 부식경계면 (즉, 콘크리트와 보강철근 표면 사이)에 인가된 전류에 대한 부식전위의 동적 응답을 연구하기 위해 비교적 최근에 개발된 방법이다^{5,6)}. 이 방법에서 미소전류는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 콘크리트 표면에서 보강철근에 인가되고 이로 인해 야기된 부식전위의 응답 (V_t)은 시간에 따라 측정된다. 그리고 측정된 응답전위 (V_t)는 Fig. 2에 나타난 평형 전기회로 (simple Randles circuit)⁷⁾를 얻기 위해 분석된다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 일반적으로 보강철근의 부식은 철근 표면의 부식과 콘크리트의 피복 부분을 대상으로 보강철근 표면에서의 전기적 이중층 (double layer capacitance, C_{dl})과 부식에 관계하는 분극저항 (charge transfer resistance, R_{ct})이 병렬로 연결되고 피복 콘크리트의 저항 (solution resistance, R_{Ω})이 직렬로 연결된 평형 전기회로 (simple Randles circuit) 모델을 주로 이용하고 있다.

인가전류 I_{app} 가 보강철근 (작용 전극)에 인가되었을 때, 주어진 시간 t 에서 보강철근의 분극 전위 V_t 는 Fig. 2의 “simple Randles circuit”에 기초하여 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_t = I_{app}R_{\Omega} + I_{app}R_{ct} \left[1 - \exp\left(\frac{-t}{R_{ct}C_{dl}}\right) \right] \quad (1)$$

적절한 시간 후 응답전위는 최종 안정된 상태 V_{max} 에

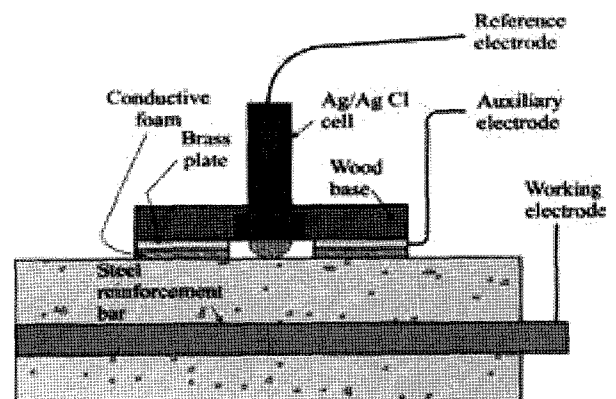


Fig. 1 Galvanostatic pulse monitoring equipment⁶⁾

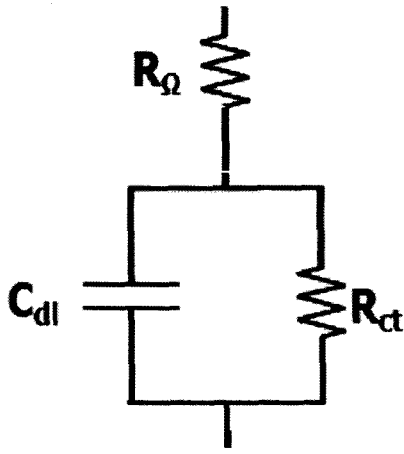


Fig. 2 Simple Randles circuit⁷⁾

도달할 것이다. 때문에 식 (1)은 피복 콘크리트의 저항 R_{Ω} 로부터 분리하여 R_{ct} 와 C_{dl} 을 얻기 위해 식 (2)와 같이 선형관계로 바꾸어 나타낼 수 있다.

$$\ln(V_{max} - V_t) = \ln(I_{app}R_{ct}) - \left(\frac{t}{R_{ct}C_{dl}}\right) \quad (2)$$

즉 시간 t 에 따른 $\ln(V_{max} - V_t)$ 는 y 축의 값이 $\ln(I_{app}R_{ct})$ 이고 기울기가 $1/R_{ct}C_{dl}$ 인 선형그래프로서 R_{ct} 와 C_{dl} 의 산출이 가능하다. 그러나 일반적으로 콘크리트 내 보강철근의 부식은 하나의 저항/커패시턴스 (resistance/capacitance)를 갖는 단순한 모델보다 더 복잡하다. 때문에 콘크리트 내 보강철근과 같은 부식계에서는 Fig. 3에 나타난 몇 개의 저항/커패시턴스 (resistance/capacitance)로 구성된 전기회로 모델이 더욱 적절할 것이다⁵⁾.

시간 t 에 따른 $\ln(V_{max} - V_t)$ 그래프의 선형 영역은 각기 다른 시간 t 에서 저항 R 과 커패시턴스 C 의 성분을 구하는데 이용될 수 있다. 즉 각기 다른 시간에서 구해진 선형 영역으로부터 구성 성분들을 분리할 수 있고 저항과 커패시턴스는 각 분리된 성분으로부터 결정될 수 있다 (Fig. 6). 또한 저항과 커패시턴스의 결과물인 각 성분의 시상수 (time constant)는 R 과 C 로부터 계산될 수 있다. 그리고 분리된 각 성분들은 철근콘크리트 내에서 일어나는 여러 가지 현상들, 즉 부식 과정 혹은 콘크리트 내 이온의 확산 과정이나 철근 표면의 필름 (dielectric film) 효과와 같은 부식과 관계없는 과정들도 모두 포함되어 있다. 때문에 보강철근의 부식률을 보다 정확히 평가하기 위해서는 분리된 각 성분들로부터 부식에 관계없

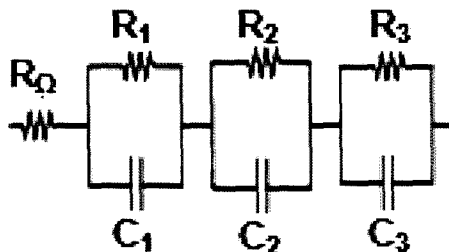


Fig. 3 Complex electrochemical equivalent circuit⁵⁾

는 성분들을 구별하여 부식 과정에 직접 관련하고 있는 저항성분들만을 합산하여 계산된 분극저항 R_{ct} 에 의해 평가되어야 할 것이다.

이를 위해 본 연구에서는 콘크리트 표면에 장치한 보조전극 및 기준전극 (Ag/AgCl)과 보강철근 (작용 전극) 사이의 측면 거리를 증가시키면서 정전류 펄스 실험을 실시하였다. 만일 보강철근으로부터의 측면 이격 거리가 증가되면 참조 전극과 보강철근 사이의 콘크리트 양이 많아지기 때문에 콘크리트 내 부식과 관계없는 성분은 측면 거리의 증가에 따라 증가할 것이고, 반면 부식과 관련한 성분들은 상대적으로 일정하게 남아있을 것이다.

한편, 콘크리트의 피복 부분에 기인된 옴저항 R_{Ω} 는 처음 전류가 인가됨에 따라 순간적으로 증가된 전위의 변화 ($t=0$)로부터 구할 수 있다. 때문에 분극저항 R_{ct} 는 분리된 각 성분으로부터 보강철근의 부식에 관련된 저항성분만을 합산하여 산출할 수 있으며, 부식전류 I_{corr} 은 Stern-Geary⁸⁾이론에 기초하여 평가된 분극저항 R_{ct} 로부터 식 (3)을 이용하여 구할 수 있다. 그리고 보강철근의 부식률, 즉 부식전류밀도 i_{corr} 은 부식전류 (I_{corr})를 전류가 인가된 보강철근의 표면적 (A)으로 나누어줌으로써 정량적으로 산출할 수 있다. 일반적으로 콘크리트 내 보강철근의 분극저항 R_{ct} 와 부식전류밀도 (즉 부식률) i_{corr} , 부식 깊이 p 사이의 관계는 Table 1과 같다⁹⁾.

$$I_{corr} = \frac{B}{R_{ct}} \quad (3)$$

여기에서 B 는 Stern-Geary 상수로서, 보통 부식철근에 대해 25 mV, 부동태 철근에 대해 50 mV의 값이 적용된다⁶⁾.

3. 실험

정전류 펄스법에 의한 보강철근의 부식 측정은 해양환경에 약 12년 동안 폭로된 3개의 독립된 철근콘크리트 슬래브를 대상으로 Table 2의 실험 변수에 대해 각각 수행되었다. Table 2에서 보조전극 및 기준전극 (Ag/AgCl)과 보

Table 1 Typical corrosion rates for steel in concrete

| Rate of corrosion | Polarization resistance, R_{ct} ($k\Omega cm^2$) | Corrosion current density, i_{corr} ($\mu A/cm^2$) | Corrosion penetration*, p ($\mu m/year$) |
|-------------------|--|--|--|
| Very high | $2.5 < R_{ct} < 0.25$ | $10 < i_{corr} < 100$ | $100 < p < 1000$ |
| High | $25 < R_{ct} < 2.5$ | $1 < i_{corr} < 10$ | $10 < p < 100$ |
| Low/moderate | $250 < R_{ct} < 25$ | $0.1 < i_{corr} < 1$ | $1 < p < 10$ |
| Passive | $R_{ct} < 250$ | $i_{corr} < 0.1$ | $p < 1$ |

* Loss of reinforcement section from Faraday's Law, assuming $Fe \rightarrow Fe^{2+}$

Table 2 Experimental parameters

| Parameter (units) |
|--|
| Lateral distance: 0, 100, 200, 300, 400 (mm) |
| Measurement time: 5, 10, 30, 60, 90, 180 (sec) |

강철근(작용전극) 사이의 측면 이격 거리 (lateral distance)에 따른 정전류 펄스 실험은 응답전위 (V_t)의 분석에 의해 분리된 각 저항성분들로부터 부식에 관계없는 성분들을 구별하기 위해 수행되었고, 측정 시간에 따른 정전류 펄스 실험은 부식전위 (E_{cor})의 안정화를 위해 필요한 시간간격 (t ; delay time)의 부적절한 선택 및 적용이 보강철근의 부식률 측정 결과에 미치는 영향을 구명하기 위해 수행되었다.

본 연구에서 측정된 모든 보강철근 (MS1~MS6)은 지름 10 mm, 길이 100 mm였고 배근된 다른 철근들로부터 전기적으로 독립되어 배근되었다. 이는 전류가 인가된 보강철근 표면적의 정확한 계산이 가능함을 의미하며 측정된 모든 보강철근의 표면적은 31.42 cm^2 였다. 슬래브 A에는 MS1과 MS2로 명명된 보강철근 2개가 배근되었고 피복두께는 25 mm였으며, 배합강도는 45 N/mm^2 ($W/C = 60\%$)였다. 슬래브 B에는 MS3와 MS4로 명명된 보강철근 2개가 배근되었으며 피복두께 40 mm, 배합강도 40 N/mm^2 ($W/C = 60\%$)였다. 또한 슬래브 C에는 MS5와 MS6으로 명명된 보강철근 2개가 배근되었고 피복두께 40 mm, 배합강도 40 N/mm^2 ($W/C = 60\%$)였다. 각 슬래브에서 MS1과 MS3, MS5가 배근된 콘크리트 부분에는 부식을 촉진시키기 위해 5%의 염화물이온 (사용 시멘트의 중량비)을 배합시 첨가하였다. 콘크리트의 배합에 사용된 시멘트는 보통포틀랜드시멘트였으며 골재는 25 mm 쇠석과 2.5 mm 강모래를 사용하였다.

정전류 펄스 실험은 Fig. 1의 3전극 분극 방법을 이용하여 수행되었다. 1 mA 이하의 미소 전류는 콘크리트 표면에 설치된 보조전극 ($150 \times 100 \text{ mm}$)으로부터 보강철근(작용 전극)에 인가되고 이에 따라 야기된 보강철근과 보조전극 사이의 전위의 변화 (transient response)는 시간의 함수로 나타내어졌다. Fig. 4와 같이 정전류 인가장치는 1 mA, 0.1 mA, 0.01 mA의 미소전류를 선택하여 인가할 수 있도록 특별히 제작되었으며 인가전류 (I_{app})에 대한 일시적인 전위의 응답 (V)은 16비트 데이터 에퀴지션 장비를 이용하여 측정하였다 (Fig. 4). 측정 시간은 5초에서 180초까지 변화되었고 시간에 따라 변화되는 일시적인 응답전위를 측정하기 위해 1 kHz의 샘플링 비율이 사용되었다. 기존 연구^{5,6)}에 의하면, 이 샘플링 비율은 작은

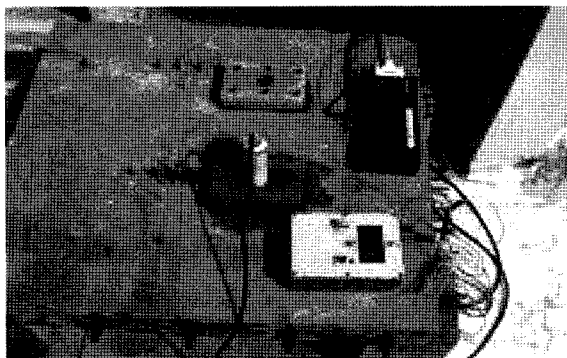


Fig. 4 Test arrangement

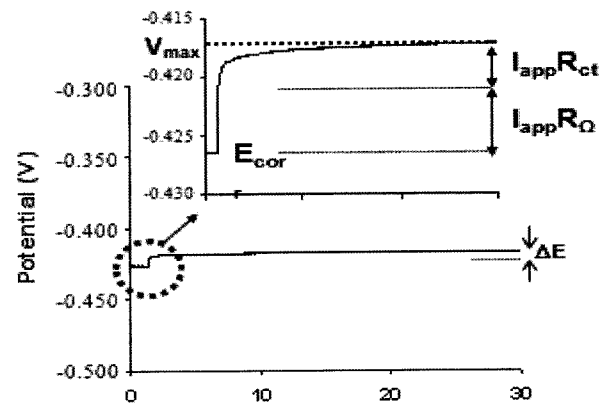
시상수를 갖는 성분의 분석도 가능하다. 인가전류는 Stern-Geary 이론⁸⁾에 기초하여 20~30 mV 이내의 응답전위를 얻을 수 있도록 선택되었으며, 최초의 측정은 항상 Stern-Geary의 선형 영역을 초과하지 않도록 가장 작은 인가전류 0.01 mA로부터 실시되었다.

4. 실험 결과 및 고찰

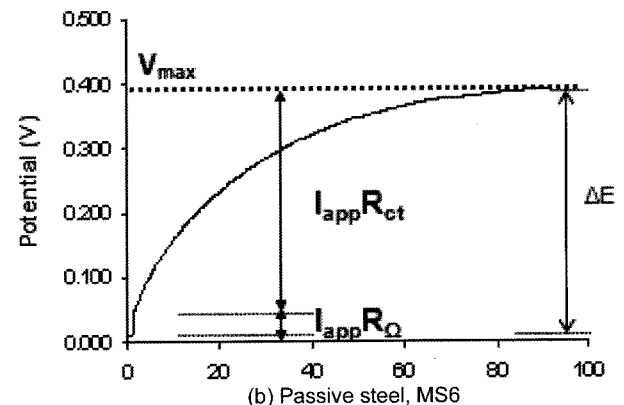
4.1 인가전류에 의한 부식전위의 응답과 분석

Fig. 5는 미소전류의 인가에 의한 보강철근 부식전위의 변화를 부식 철근 (actively corroding steel)과 부동태 철근 (passive steel)의 경우에 대해 각각 나타낸 것이다. Fig. 5에서 볼 수 있는 바와 같이 정전류 펄스법으로부터 측정된 일시적인 응답전위는 부식 상태 (부식률)에 따라 크게 다른 양상으로 조사되었다. 동일한 인가전류로부터 부동태 철근에서의 전위의 변화 (ΔE)는 부식 철근에 비해 매우 컸으며, 이는 정전류 펄스법이 보강철근의 부식 여부를 쉽고 빠르게 구별할 수 있음을 나타낸다. 특히 동일한 인가전류에 대한 응답전위 ΔE 는 보강철근의 부식률이 증가함에 따라 작아지는 경향을 보였다.

Fig. 5에서 전류의 인가에 의해 순간적으로 증대되는 초기 전위의 상승은 피복 콘크리트의 저항 R_{Ω} 의 결과로서 먼저 계산되고 응답전위로부터 공제되었다. 나머지 응답전위는 각기 다른 시상수를 갖는 분리된 성분들을 얻



(a) Actively corroding steel, MS5



(b) Passive steel, MS6

Fig. 5 A typical potential transient response, pulse 0.01 mA

기 위해 분석되었다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 식 (2)를 이용하여 y축의 값이 $\ln(I_{app}R_{ct})$ 이고 기울기가 $1/R_{ct}C_{dl}$ 인 선형 그래프를 얻을 수 있다. 그리고 시간 t에 따른 $\ln(V_{max} - V_t)$ 그래프로부터 몇 개의 선형 구간을 추출 및 분석하여 저항 R과 커패시턴스 C로 구성된 몇 개의 성분을 얻을 수 있었으며, 그 결과는 Tables 3~8에 나타내었다. Tables 3~8에서 보는 바와 같이 본 연구에서는 측정된 응답전위의 분석으로부터 3개 혹은 4개의 R & C 성분을 얻을 수 있었다.

4.2 보강철근의 분극저항 (R_{ct}) 및 부식률 (i_{corr}) 평가

콘크리트 내 보강철근의 부식을 평가할 때, 그 부식률은 Table 1에 나타난 바와 같이 부식전류밀도 i_{corr} 에 기초하여 부동태, 낮은/중간, 높은, 그리고 매우 높은 수준으로 분류할 수 있다. 정전류 펄스 실험 결과로부터 부식전류밀도를 계산하기 위해서는 보강철근 표면에서의 분극저항 R_{ct} 가 반드시 결정되어야 하며 R_{ct} 는 응답전위 (ΔE)의 분석으로부터 얻은 부식에 관련된 저항성분들의 합산에 의해 산출될 수 있다. 그러나 응답전위의 분석으로부터 산출된 각 성분 (R & C)에는 부식과 관련된 저항 성분뿐 아니라 콘크리트 내 이온의 확산저항이나 철근 표면의 필름 효과와 같이 부식과 관계없는 저항 성분들도 함께 포함되어 있다. 때문에 보강철근의 부식률을 보다 정확히 평가하기 위해서는 분리된 각 성분들로부터 부식에 관계없는 성분들을 구별하여 분극저항으로부터 제거되어야 할 것이다. 그러나 분리된 각 저항성분들로부터 부식에 관계없는 성분들을 구별해내는 것은 매우 어려운 문제이다. 일반적으로 교류임피던스법에서와 같이 커패시턴스 (C) 값은 보강철근의 분극저항으로부터 부식에 관계없는 성분들을 구별하기 위해 사용될 수 있다^{6,9)}.

본 연구에서는 응답전위의 분석에 의해 산출된 각 저항성분들로부터 부식에 관계없는 성분들을 구별해내기 위해 콘크리트 표면에 장치한 기준전극 (보조전극 중앙에 설치됨)과 보강철근 사이의 측면 이격 거리를 증가시

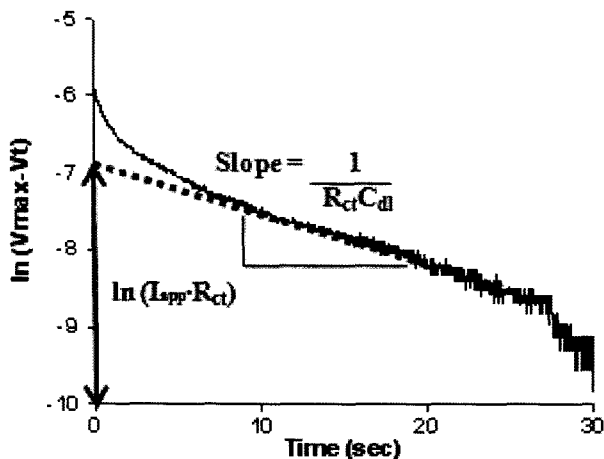


Fig. 6 Plot of $\ln(V_{max} - V_t)$ against time for MS5

키면서 정전류 펄스 실험을 실시하였고, 그 실험 결과는 Tables 3~8에 나타내었다. Tables 3~8에서와 같이 기준전극과 보강철근 사이의 측면 이격 거리에 따른 정전류 펄스 실험 결과는 어떤 저항 성분이 부식 과정에 관련된 성분인지 잘 보여주고 있다. 먼저, 콘크리트 피복 부분의 저항을 나타내는 R_{Ω} 은 측면 이격 거리가 증가함에 따라 크게 증가하고 있으며, 이는 측면 이격 거리의 증가에 따라 많아진 기준 전극 (Ag/AgCl)과 보강철근 사이의 콘크리트 양에 기인된 결과로 판단된다. 또한 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 부식 철근 MS3과 MS5에서의 저항 R_1 성분은 측면 이격 거리가 증가함에 따라 증가되고 있는 반면 R_2 , R_3 및 R_4 는 측면 이격 거리에 관계없이 상대적으로 일정함을 유지했다. 때문에 MS3과 MS5에서 저항 R_1 성분은 부식에 관련된 저항으로 보기 어려우며, 분극저항 산출시 생략되어야 할 것으로 판단된다. 이들 R_1 성분의 커패시턴스 값은 모두 $1,000 \mu F/cm^2$ 이상으로 매우 높았다.

그러나 $100 < C > 1,000 \mu F/cm^2$ 의 유사한 커패시턴스를 갖는 MS1과 MS2의 R_1 성분은 상이한 결과를 나타내었다. MS1의 경우 R_1 성분은 측면 이격 거리가 증가함에 따라 증가하였지만, MS2의 R_1 성분은 측면 이격 거리의 증가에 따라 증가되지 않았다. 이는 $100 < C > 1,000 \mu F/cm^2$ 의 커패시턴스를 갖는 저항 성분이 부식 과정 및 부식에 관계없는 다른 현상 (콘크리트 내 이온의 확산저항 등) 모두와 관련된다고 고려되어진다. 이는 커패시턴스만으로 부식과 관련된 성분을 구별하는데 큰 문제가 있음을 잘 보여주는 결과이다. 비록 교류 임피던스 (AC impedance) 법에서와 같이 커패시턴스의 값을 통해 부식과 관련된 저항 성분들을 구별해 낼 수 있지만, 커패시턴스의 값은 보강철근의 부식 상태나 측정 방법 등 다양한 변수에 의해 변화될 수 있음에 주의해야한다 (Tables 3~8). 본 연구로부터 조사된 모든 보강철근의 커패시턴스 값은 그 부식률 (즉 분극저항)이 증가함에 따라 커지고 있으며, 부식 철근의 경우 $1 \mu F/cm^2 < C > 5,000 \mu F/cm^2$, 부동태 철근의 경우 $1 \mu F/cm^2 < C > 100 \mu F/cm^2$ 로 각각 조사되었다.

한편 Table 9는 측면 이격 거리 0 mm에서 응답전위 (V_t)로부터 분석된 모든 저항 성분들을 합산한 분극저항 ΣR_{total} 과 부식에 관련된 저항으로 평가된 성분만으로 계산된 분극저항 ΣR_{ct} 에 의해 산출된 각 보강철근의 부식률 i_{corr} 을 상호 비교하여 나타낸 것이다. Table 9에서 알 수 있듯이 MS1, MS2, MS3, 그리고 MS5는 Table 1의 부식전류밀도 i_{corr} 에 기초하여 부식 철근으로 분류될 수 있으며, MS4와 MS6은 부동태 철근으로 각각 분류되었다. Table 9에서 ΣR_{total} 는 분극저항법 (LPR method)의 부식률 평가와 같이 모든 저항 성분들의 합산에 의해 평가된 분극저항으로서, ΣR_{total} 에 의해 평가된 부식 철근 MS1, MS3, MS5의 부식률은 ΣR_{ct} 에 의해 평가된 값보다 최대 2.3배까지 낮게 조사되었다. 이는 정전류 펄스 실험으로부터 구한 모든 저항성분들을 합산하여 부식률을 평가할 경우, 부식에 관계없는 저항 성분들까지 포함되어 실제

Table 3 Results for bar MS1, 90s pulse

| Resistance (kΩcm ²) | Lateral distances (mm) | | | |
|---|------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | 0 | 100 | 200 | 300 |
| R _Ω | 15.3 | 25.5 | 49.1 | 58.3 |
| R ₁ (C ₁ , μF/cm ²) | 33.9 (936) | 36.7 (815) | 38.0 (818) | 39.2 (767) |
| R ₂ (C ₂ , μF/cm ²) | 11.9 (313) | 24.3 (185) | 12.4 (230) | 29.7 (134) |
| R ₃ (C ₃ , μF/cm ²) | 7.6 (36) | 14.1 (28) | 5.8 (45) | 20.0 (16) |
| R ₄ (C ₄ , μF/cm ²) | 6.6 (5) | 8.3 (8) | 5.3 (7) | 15.6 (3) |

*Resistances in **bold** thought to be directly associated with corrosion

Table 4 Results for bar MS2, 90s pulse

| Resistance (kΩcm ²) | Lateral distances (mm) | | | | |
|---|------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 |
| R _Ω | 43.5 | 66.0 | 71.5 | 74.7 | 80.6 |
| R ₁ (C ₁ , μF/cm ²) | 52.7 (644) | 58.6 (534) | 63.7 (534) | 54.9 (567) | 53.0 (612) |
| R ₂ (C ₂ , μF/cm ²) | 29.0 (279) | 40.5 (153) | 50.2 (113) | 39.3 (174) | 30.0 (274) |
| R ₃ (C ₃ , μF/cm ²) | 11.3 (23) | 18.4 (17) | 25.1 (13) | 20.4 (20) | 12.0 (27) |
| R ₄ (C ₄ , μF/cm ²) | - | - | - | 14.2 (5) | 14.3 (3) |

*Resistances in **bold** thought to be directly associated with corrosion

Table 5 Results for bar MS3, 90s pulse

| Resistance (kΩcm ²) | Lateral distances (mm) | | | |
|---|------------------------|------------------|-------------------|------------------|
| | 0 | 100 | 200 | 300 |
| R _Ω | 22.3 | 30.8 | 31.8 | 34.6 |
| R ₁ (C ₁ , μF/cm ²) | 14.5 (2080) | 16.7 (1844) | 17.8 (1778) | 18.1 (1738) |
| R ₂ (C ₂ , μF/cm ²) | 9.3 (576) | 8.5 (776) | 7.0 (1081) | 7.0 (943) |
| R ₃ (C ₃ , μF/cm ²) | 3.5 (148) | 4.1 (129) | 3.8 (160) | 3.3 (197) |
| R ₄ (C ₄ , μF/cm ²) | 3.9 (20) | 3.6 (16) | 3.3 (14) | 4.0 (16) |

*Resistances in **bold** thought to be directly associated with corrosion

Table 6 Results for bar MS4, 90s pulse

| Resistance (kΩcm ²) | Lateral distances (mm) | | | |
|---|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | 0 | 100 | 200 | 300 |
| R _Ω | 17.0 | 20.4 | 28.0 | 31.5 |
| R ₁ (C ₁ , μF/cm ²) | 678 (36) | 594 (39) | 601 (40) | 585 (41) |
| R ₂ (C ₂ , μF/cm ²) | 47 (118) | 49 (85) | 51 (75) | 46 (110) |
| R ₃ (C ₃ , μF/cm ²) | 38 (22) | 32 (22) | 29 (22) | 32 (24) |
| R ₄ (C ₄ , μF/cm ²) | 11 (12) | 10 (13) | 10 (12) | 11 (12) |

*Resistances in **bold** thought to be directly associated with corrosion

Table 7 Results for bar MS5, 90s pulse

| Resistance (kΩcm ²) | Lateral distances (mm) | | | | |
|---|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 |
| R _Ω | 18.0 | 31.0 | 43.0 | 56.0 | 75.0 |
| R ₁ (C ₁ , μF/cm ²) | 7.5 (4536) | 7.8 (4042) | 10.0 (3840) | 11.4 (2565) | 13.0 (2166) |
| R ₂ (C ₂ , μF/cm ²) | 5.3 (433) | 5.6 (455) | 4.7 (397) | 5.5 (369) | 5.7 (358) |
| R ₃ (C ₃ , μF/cm ²) | 3.7 (55) | 4.0 (56) | 3.4 (46) | 3.5 (63) | 4.2 (58) |
| R ₄ (C ₄ , μF/cm ²) | 4.0 (7) | 4.0 (9) | 2.7 (10) | 4.7 (15) | 4.3 (9) |

* Resistances in **bold** thought to be directly associated with corrosion

Table 8 Results for bar MS6, 90s pulse

| Resistance (kΩcm ²) | Lateral distances (mm) | | | | |
|---|------------------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 |
| R _Ω | 28.0 | 34.0 | 38.0 | 44.0 | 54.0 |
| R ₁ (C ₁ , μF/cm ²) | 928 (26) | 1041 (25) | 992 (30) | 862 (33) | 913 (32) |
| R ₂ (C ₂ , μF/cm ²) | 65 (65) | 87 (70) | 60 (42) | 51 (54) | 52 (48) |
| R ₃ (C ₃ , μF/cm ²) | 36 (15) | 40 (15) | 24 (16) | 30 (25) | 20 (22) |
| R ₄ (C ₄ , μF/cm ²) | - | - | 11 (4) | 10 (8) | 8 (8) |

* Resistances in **bold** thought to be directly associated with corrosion

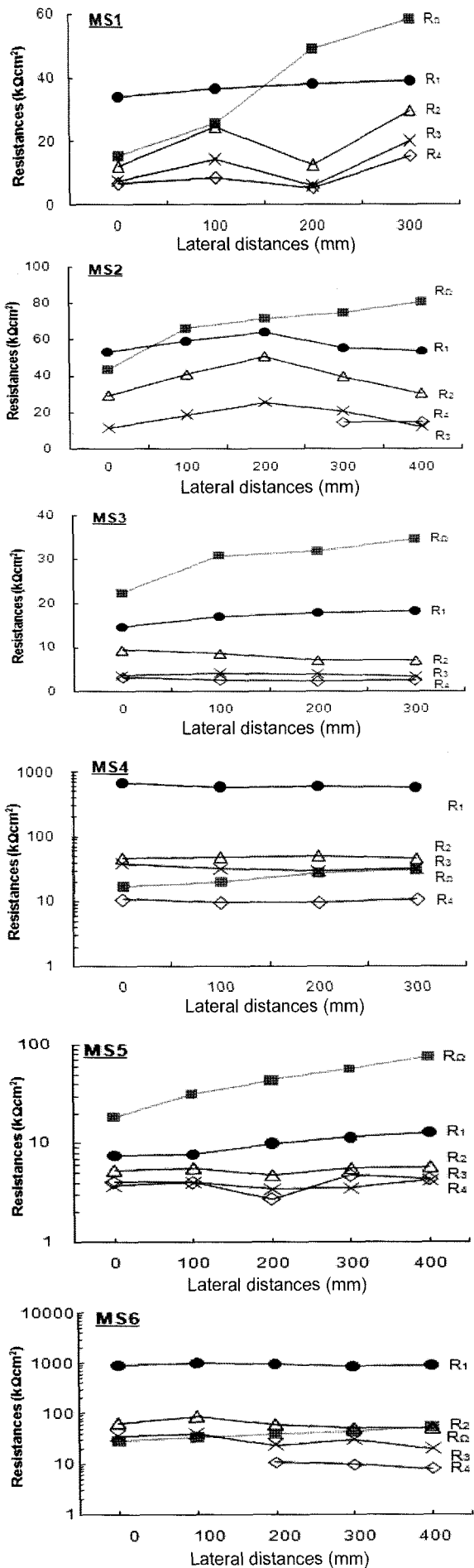


Fig. 7 Variations of resistances at different lateral distances

의 부식 상태보다 크게 과소평가될 수 있음을 보여준다.

한편, Table 9에서 볼 수 있듯이 철근콘크리트구조물 보강철근의 부식률은 정전류 펄스법을 이용하여 정량적으로 평가될 수 있었으며, 배합시 5% NaCl을 함유한 콘크리트에 배근된 MS1, MS3, MS5의 경우 높은 부식률 (Table 1)을 갖는 부식 철근으로서 $0.96 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ($10 \mu\text{m}/\text{year}$), $1.49 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ($15 \mu\text{m}/\text{year}$), $1.94 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ($20 \mu\text{m}/\text{year}$)로 각각 조사되었다. 그리고 MS2의 경우 $0.27 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ($3 \mu\text{m}/\text{year}$), MS4와 MS6은 $0.03 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ($0.3 \mu\text{m}/\text{year}$)과 $0.02 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ($0.2 \mu\text{m}/\text{year}$) 부식률의 부동태 철근으로 조사되었다. 전술한 바와 같이 이들 보강철근의 부식률은 철근콘크리트구조물의 내구연한 예측, 내구설계, 효과적인 보수 및 보강 전략 수립 등을 위한 기술적 자료로서 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

4.3 측정 시간이 부식률 평가에 미치는 영향

정전류 펄스 측정법은 콘크리트 내 보강철근의 부식률을 결정하는 분극저항 R_{ct} 를 개별 성분으로 분리할 수 있다는 큰 장점이 있다. 이는 현재 실험실에서 널리 이용되고 있는 분극저항법에 비해 콘크리트 내 보강철근의 부식 메커니즘에 관한 정보를 더 많이 제공해 줄 수 있을 뿐 아니라 부식률 평가의 정확성을 보다 향상시켜줄 수 있음을 의미한다. 그러나 분극저항법과 마찬가지로 부식전위 (E_{corr})의 안정화를 위해 필요한 적절한 시간 간격 (t ; delay time), 즉 측정 시간의 선택은 이 기술의 현장 적용을 위한 실질적인 어려움 중 하나이다. 부식전위의 안정화를 위해 필요한 시간은 보강철근의 부식 상태 (부식률)에 크게 의존한다. 본 연구에서는 부식 철근과 부동태 철근을 대상으로 측정 시간이 부식률 평가에 미치는 영향을 살펴보았으며 그 결과는 Table 9와 같다. Table 10의 (a)는 부식 철근 MS3에서 측정 시간 (pulse duration)을 5초에서 180초까지 변화시켰을 때 분리된 각 성분에서의 저항 (R) 및 커패시턴스 (C), 시상수 (t)의 변화를 나타낸 것이다. Table 10에서 알 수 있는 바와 같이 부식 철근에서 측정 시간이 부식률 평가에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 판단된다. 그러나 측정 시간이 30초 이상으로 길어짐에 따라 $1,000 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ 이상의 높은 커패시턴스를 갖는 저항성분이 포함되었으며, 측정시간의 증가와 함께 시상수와 커패시턴스는 크게 증가되었다. 때문에 3.2절에서도 살펴본 바와 같이 이 저항 성분은 부식에 관련된 성분이기 보다는 피복 콘크리트 내 이온의 확산저항에 관련된 성분으로 판단되며, 이 성분을 제거하고 계산된 ΣR_{ct} 로부터 부식률 i_{corr} 은 측정 시간에 관계 없이 유사하게 조사되었다. 그러나 부동태 철근 MS4는 부식 철근과는 달리 측정 시간에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. Table 10의 (b)에서 보는 바와 같이 비교적 낮은 시상수를 갖는 부동태 철근의 부식률을 보다 정확히 평가하기 위해서는 부식 상태에 의존하지만, 보통 60s 혹은 그 이상의 측정 시간 (즉 부식전위 (E_{corr})의 안정화

Table 9 Corrosion rates for bars MS1-6 at lateral distance 0 mm

| Bar | R_{Ω} ($k\Omega cm^2$) | ΣR_{total} ($k\Omega cm^2$) | i_{corr} using ΣR_{total} ($\mu A/cm^2$) | ΣR_{ct} ($k\Omega cm^2$) | i_{corr} using ΣR_{ct} ($\mu A/cm^2$) |
|-----|---------------------------------|---------------------------------------|--|------------------------------------|---|
| MS1 | 15.3 | 60.0 | 0.42 | 26.1 | 0.96 |
| MS2 | 43.5 | 93.0 | 0.27 | 93.0 | 0.27 |
| MS3 | 22.3 | 31.2 | 0.80 | 16.7 | 1.49 |
| MS4 | 17.0 | 774 | 0.03 | 774 | 0.03 |
| MS5 | 18.2 | 20.5 | 1.22 | 13.0 | 1.94 |
| MS6 | 28.4 | 1029 | 0.02 | 1029 | 0.02 |

Table 10 Influences of measurement time on the assessment of corrosion rate
(a) Actively corroding steel, MS3

| Measurement Time (s) | R_{Ω} ($k\Omega cm^2$) | R_1 ($k\Omega cm^2$) | C_1 ($\mu F/cm^2$) | t_1 (sec) | R_2 ($k\Omega cm^2$) | C_2 ($\mu F/cm^2$) | t_2 (sec) | R_3 ($k\Omega cm^2$) | C_3 ($\mu F/cm^2$) | t_3 (sec) | R_4 ($k\Omega cm^2$) | C_4 ($\mu F/cm^2$) | t_4 (sec) | R_{ct} ($k\Omega cm^2$) | i_{corr} ($\mu F/cm^2$) |
|----------------------|---------------------------------|--------------------------|------------------------|-------------|--------------------------|------------------------|-------------|--------------------------|------------------------|-------------|--------------------------|------------------------|-------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 5 | 14.9 | 9.1 | 224 | 2.0 | 6.2 | 35 | 0.2 | 2.4 | 6.3 | 0.02 | - | - | - | 17.7 | 1.41 |
| 10 | 14.9 | 10.8 | 372 | 4.0 | 5.8 | 78 | 0.5 | 3.6 | 12.7 | 0.05 | - | - | - | 20.2 | 1.24 |
| 30 | 14.9 | 13.4 | 1120 | 15.0 | 6.3 | 258 | 1.6 | 4.8 | 34.1 | 0.16 | 2.5 | 6.5 | 0.016 | 13.6 | 1.84 |
| 60 | 14.9 | 15.4 | 1418 | 21.9 | 6.3 | 497 | 3.2 | 5.0 | 61.9 | 0.31 | 3.2 | 14.1 | 0.045 | 14.5 | 1.72 |
| 90 | 14.9 | 15.4 | 2113 | 32.5 | 7.8 | 587 | 4.6 | 5.1 | 80.7 | 0.41 | 3.8 | 3.9 | 0.054 | 16.7 | 1.50 |
| 180 | 14.9 | 23.0 | 3975 | 91.6 | 11.8 | 790 | 9.3 | 5.6 | 100 | 0.56 | 4.3 | 14.5 | 0.063 | 21.7 | 1.15 |

*Resistances in **bold** thought to be directly associated with corrosion

(b) Passive steel, MS4

| Measurement Time (s) | R_{Ω} ($k\Omega cm^2$) | R_1 ($k\Omega cm^2$) | C_1 ($\mu F/cm^2$) | t_1 (sec) | R_2 ($k\Omega cm^2$) | C_2 ($\mu F/cm^2$) | t_2 (sec) | R_3 ($k\Omega cm^2$) | C_3 ($\mu F/cm^2$) | t_3 (sec) | R_4 ($k\Omega cm^2$) | C_4 ($\mu F/cm^2$) | t_4 (sec) | R_{ct} ($k\Omega cm^2$) | i_{corr} ($\mu F/cm^2$) |
|----------------------|---------------------------------|--------------------------|------------------------|-------------|--------------------------|------------------------|-------------|--------------------------|------------------------|-------------|--------------------------|------------------------|-------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 5 | 76.2 | 180 | 10.5 | 1.9 | 124 | 2.7 | 0.33 | 48 | 0.9 | 0.04 | - | - | - | 352 | 0.071 |
| 10 | 76.2 | 190 | 18.5 | 3.7 | 152 | 3.9 | 0.60 | 78 | 1.0 | 0.08 | - | - | - | 420 | 0.060 |
| 30 | 76.2 | 231 | 48 | 11.1 | 183 | 9.8 | 1.79 | 126 | 2.0 | 0.25 | 38 | 1.1 | 0.04 | 578 | 0.043 |
| 60 | 76.2 | 341 | 64 | 21.8 | 185 | 19.9 | 3.70 | 146 | 4.0 | 0.58 | 81 | 1.3 | 0.10 | 753 | 0.033 |
| 90 | 76.2 | 344 | 93 | 32.1 | 190 | 28.8 | 5.47 | 158 | 5.5 | 0.87 | 94 | 1.7 | 0.16 | 786 | 0.032 |
| 180 | 76.2 | 345 | 181 | 62.4 | 199 | 52.9 | 10.5 | 213 | 6.4 | 1.36 | 112 | 1.6 | 0.17 | 869 | 0.029 |

*Resistances in **bold** thought to be directly associated with corrosion

를 위해 필요한 적절한 시간)이 필요한 것으로 조사되었다. 그러나 부식 철근 및 부동태 철근 모두에 대해 30s의 측정 시간은 고려되어진다.

5. 결 론

- 1) 본 연구의 실험 결과는 정전류 펄스법이 철근콘크리트구조물 보강철근의 부식률을 짧은 시간 내에 정량적으로 평가할 수 있음을 잘 보여준다.
- 2) 보강철근의 부식률을 결정하는 분극저항 R_{ct} 는 분극저항법 (LPR)과는 달리 정전류 펄스법을 이용하여 개별 성분으로 분리되었다.
- 3) 때문에 분극저항 R_{ct} 에 포함된 부식에 관계없는 저항 성분들은 분리된 각 성분의 분석으로부터 구별되어 제거되었으며 이는 보강철근 부식률 평가의 정확성 및 신뢰성 향상에 크게 기여할 것이다.
- 4) 기준 전극과 보강철근 사이의 측면 이격 거리에 따른 정전류 펄스 실험은 부식 과정에 관계없는 저항으로부터 부식에 관련된 저항 성분을 명확히 구별하는데 이용될 수 있을 것이다.
- 5) 분석된 각 성분에서 커패시턴스 $1,000 \mu F/cm^2$ 이상

을 갖는 저항 성분은 부식과 관련된 저항이기 보다는 콘크리트 내 이온의 확산 효과에 기인된 것으로 판단된다.

- 6) 측정 시간이 부식률 평가에 미치는 영향에서 부식 철근의 경우 그 영향은 크지 않은 것으로 조사되었지만, 측정 시간이 길어짐에 따라 부식에 관계없는 저항 성분이 포함될 수 있음을 나타내었다.
- 7) 비교적 늦은 시상수 (time constant)를 갖는 부동태 철근의 경우 측정 시간에 의한 영향은 매우 컸으며, 부식 철근 및 부동태 철근 모두에 적합한 측정 시간은 30s정도인 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다 (과제번호 M01-2005-000-10067).

참고문헌

1. American Society for Testing and Materials, *Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing*

- Steel in Concrete*, C876-91, ASTM, Philadelphia, 1991.
2. Gowers, K. R. and Millard, S. G., "Measurement of Concrete Resistivity for Assessment of Corrosion Severity of Steel Using Wenner Technique", *ACI Materials Journal*, Vol.96, No.5, 1999, pp.536~541.
 3. Flis, J., Sabol, S., Pickering, H. W., Sehgal, A., Osseo-Asare, A., and Cady, P. D., "Electrochemical Measurements on Concrete Bridges for Evaluation of Reinforcement Corrosion Rates", *Corrosion*, Vol.49, No.7, 1993, pp.601~613.
 4. Gower, K. R. and Millard, S. G., "Electrochemical Techniques for Corrosion Assessment of Reinforced Concrete Structures", *Proceeding of Institute Civil Engineering, Structures and Bridges*, Vol.134, May 1999, pp.129~137.
 5. Gonzalez, J. A., Cobo, A., Gonzalez, M. N., and Feliu, S., "On-Site Determination of Corrosion Rate in Reinforced Concrete Structures by Use of Galvanostatic Pulses", *Corrosion Science*, Vol.43, 2001, pp.611~625.
 6. Law, D. W., Millard, S. G., and Bungey, J. H., "Use of Galvanostatic Pulse Measurements on Active Reinforcing Steel in Concrete to Assess Corrosion Rates", *British Corrosion Journal*, Vol.36, No.1, 2001, pp.75~80.
 7. Randles, J. E. B., "Kinetics of Rapid Electrode Reactions", *Discussion of the Faraday Society*, Vol.1, No.1, 1947, pp.11~19.
 8. Stern, M. and Geary, A. L., "Electrochemical Polarisation: I. Theoretical Analysis of the Shape of Polarization Curves", *Journal of the Electrochemical Society*, Vol.104, No.1, 1957, pp.56~63.
 9. Broomfield, J. P., *Techniques to Assess the Corrosion Activity of Steel-Reinforced Concrete Structures*, ASTM STP 1276, eds. N. S. Berke, E. Escalante, C. K. Nmai, D. Whiting (West Conshohocken), PA, ASTM, 1996, pp.91~106.

요 약 본 연구는 정전류 펄스법을 이용하여 콘크리트 내 보강철근의 부식률을 정량적으로 평가한 실험 결과를 나타낸 것이다. 콘크리트와 보강철근의 부식 경계면에서 미소전류의 인가에 의해 변화되는 부식전위 (ΔE)를 분석함으로써 보강철근의 분극저항 R_{ct} 는 저항/커패시턴스 (resistance/capacitance) 모델에 기초하여 개별 성분으로 분리되었다. 분리된 각 성분에는 부식 과정과 관련된 저항뿐 아니라 콘크리트 내 이온의 확산저항 등과 같은 부식에 관계없는 저항 성분들도 포함되어 있었다. 참조 전극과 보강철근의 측면 이격 거리에 따른 일련의 실험 결과는 부식 과정에 관계없는 저항 성분들로부터 부식에 관련된 저항 성분을 명확히 구별할 수 있음을 잘 보여주고 있다. 만일 보강철근의 부식률이 부식에 관계없는 저항 성분들까지 포함된 분극저항에 의해 평가된다면, 보강철근의 부식률은 실제의 부식 상태보다 최대 2.3배까지 과소평가될 수 있는 것으로 조사되었다. 측정 시간이 부식률 평가에 미치는 영향은 부식 철근의 경우 크지 않았지만, 측정 시간이 길어짐에 따라 부식에 관계없는 저항성분이 포함될 수 있음을 보였고, 비교적 낮은 시상수 (time constant)를 갖는 부동태 철근의 경우 측정 시간에 큰 영향을 받는 것으로 조사되었다.

핵심용어 : 부식, 보강철근, 콘크리트, 부식전위, 측면 이격 거리