

부식전위 기준에 의한 철근콘크리트 구조물의 부식진단의 위험성에 관한 고찰

정진아[†]

한국해양대학교, 선박운항과

(2015년 4월 17일 접수, 2015년 6월 29일 수정, 2015년 6월 29일 채택)

Consideration on the Risk of Corrosion Assessment in Reinforced Concrete Structure by Corrosion Potential Criterion

Jin-A Jeong[†]

Department of Ship Operation, Korea Maritime & Ocean University, Busan, 606-791, Korea

(Received April 17, 2015; Revised June 29, 2015; Accepted June 29, 2015)

Corrosion of steel reinforcement is a major factor in the deterioration of harbour and bridge structure. Steel corrosion in concrete must be checked for assessing the condition of a reinforced concrete structure. There are several ways how to measure the corrosion condition of reinforced concrete, but the corrosion potential measurement is a very simple, rapid, cost-effective and non-destructive technique to evaluate the severity of corrosion in reinforced concrete structure, therefore commonly used by engineers. However some particular situations may not relate to the reinforcement corrosion probability and a simple comparison of the corrosion potential data with the ASTM C876 Standard on steel reinforcement corrosion probability could be meaningless and not give reliable informations because of environment factors as oxygen concentration, chloride content, concrete resistance. Therefore this paper explains the risk of corrosion assessment in reinforced concrete structure and how many factors can affect the reliability of the corrosion potential data.

Keywords : steel reinforcement, corrosion potential, oxygen, chloride, concrete resistance

1. 서론

철근콘크리트의 부식은 부두, 교량과 같은 콘크리트 구조물의 열화를 일으키는 주된 원인이 되기 때문에 철근콘크리트 구조물의 내구성을 파악하기 위해서는 철근의 부식 상태를 반드시 진단해야 한다¹⁾. 철근콘크리트의 부식상태를 진단하기 위하여 여러 가지 방법들이 소개되고 있다. 그 중 가장 많이 사용되고 있는 부식전위 측정법은 단시간에 측정이 가능하고 경제적이며, 콘크리트를 절개하지 않는 비파괴 조건에서 진단할 수 있는 장점들이 있기 때문에 철근콘크리트 구조물의 부식을 평가하기 위한 대표적인 방법이 되었다²⁾.

부식전위 (corrosion potential) 측정법은 콘크리트 속에 있는 철근의 부식상태를 전위측정으로 진단하는 방법으로 보통 자연전위 (half-cell potential) 측정법이라고도 한다. 이 방법은 토목 및 건축 관련 산업에 종사하는 엔지니어

들에게 보편적으로 가장 널리 사용되고 있는 진단법이다³⁾. 측정된 부식전위 데이터는 콘크리트 구조물의 보수, 보강, 품질 보증 및 내구수명을 예측하는 자료로 사용된다. 그러나 철근콘크리트의 부식전위는 콘크리트에 매립된 철근표면의 응력, 거칠기, 흠, 형상과 같은 금속의 구조적인 측면에서의 인자들과 콘크리트의 통기상태, 온도, 수분 함량 및 염분 농도와 같은 콘크리트의 환경적인 측면에서의 인자들에 의해 많은 영향을 받기 때문에 부식전위 측정법에 의해 철근콘크리트의 부식을 진단하고 평가하기 위해서는 금속의 구조적인 측면과 콘크리트의 환경적인 측면들을 충분히 고려해야한다⁴⁾. 따라서 본 연구에서는 철근콘크리트의 부식전위에 영향을 미치는 인자들이 부식전위 측정결과에 의해 평가된 부식 진단기준의 신뢰도에 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 연구하였다.

[†] Corresponding author: jina@kmou.ac.kr

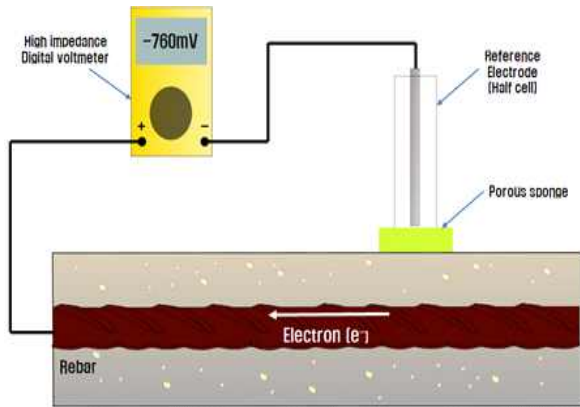


Fig. 1. Schematic view on corrosion potential measurement of reinforced steel in concrete.

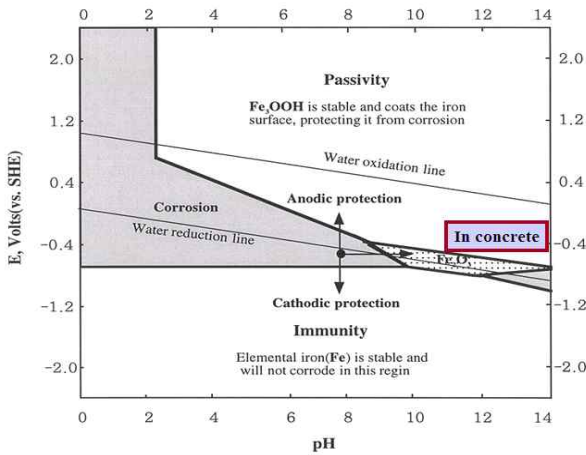


Fig. 2. Pourbaix diagram for iron.

2. 철근콘크리트의 부식전위 측정 방법

콘크리트를 파괴하지 않고 철근콘크리트의 부식상태를 진단하는 가장 간단한 방법은 철근의 부식전위를 측정하는 것이다. 금속이 각종 부식성 환경에 노출되면 금속은 환경

과 평형을 이루어 안정화되려고 하는 성질을 가지고 있다. 즉, 금속이 주변 환경과 평형이 되어가는 현상을 부식이라고 할 수 있는데 금속이 평형상태로 이동할 때의 전위의 변화를 기준전극 (reference electrode)을 이용하여 측정하는 것이다⁵⁾. 일반적으로 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 철근이 매립되어 있는 콘크리트 표면에 황산동 기준전극 (copper/copper sulphate reference electrode), 염화는 기준전극 (silver/silver chloride reference electrode)이나 카로멜 기준전극 (mercury/mercurous chloride reference electrode)으로 철근의 부식전위를 측정할 수 있다. 기준전극은 고저항 전위차계 (high impedance potentiometer)의 (-)단자에 연결하고, 철근을 (+)단자에 연결하여 기준전극에 대한 철근의 전위를 측정한다. 그리고 철근콘크리트는 Fig. 2와 같이 부식전위와 pH와의 상관관계를 나타낸 도표 (pourbaix diagram or pH-potential diagram)를 통해서 철근이 부식상태, 부동태상태, 불활성상태 중 어느 영역에 있는지를 평가할 수 있다⁶⁾. 보통 콘크리트 환경에서 철의 전위는 -400mV/SHE 부근이고 pH는 대략 12~13 정도이므로 부동태 (passivation)영역에 존재한다. 즉 철근표면에 부동태 피막이 형성되어 철근이 부식으로부터 보호되고 있음을 알 수 있다.

미국에서는 1970년대에 실질적인 부식전위 측정에 의해 Table 1에 표시한 바와 같이 ASTM C876 standard 기준을 제시하였으며, 철근콘크리트의 부식거동에 대한 가능성을 평가하고 있다⁷⁾. 일반적으로 철근콘크리트의 부식전위가 황산동기준전극을 기준으로 -200 mV 보다 높게 나타나는 경우 부식이 발생하지 않을 확률이 90 % 이상이고, -350 mV 이하시 부식의 발생확률이 90 % 이상이라고 간주한다.

그러나 콘크리트 속에 염소이온이 함유되어 있으면 염소이온에 의해 철근표면에 형성되어 있는 부동태 피막이 파괴되기 때문에 Fig. 2를 적용할 수 없고, 염소이온을 함유한 용액과 같은 환경인 Fig. 3을 이용하여 부식상태를 진단해야한다⁸⁾. 염소이온을 함유한 용액에서는 pH가 6 이하에서는 철근표면에 부동태 층이 형성되지 않기 때문에 전면부식이 발생되며, pH가 6 이상에서는 염소이온의 농도에 따라

Table 1. ASTM criteria for corrosion of steel in concrete for different reference electrodes

Probability of corrosion activity	CSE	SCE	Ag/AgCl/KCl (1.0 M)	Ag/AgCl/KCl (sat.)
> 90% probability of no corrosion occurring	more positive than -200mV	more positive than -126mV	more positive than -117mV	more positive than -81mV
Probability of corrosion uncertain	-200 to -350mV	-126 to -276mV	-117 to -267mV	-81 to -231mV
> 90% probability of corrosion occurring	more negative than -350mV	more negative than -276mV	more negative than -267mV	more negative than -231mV

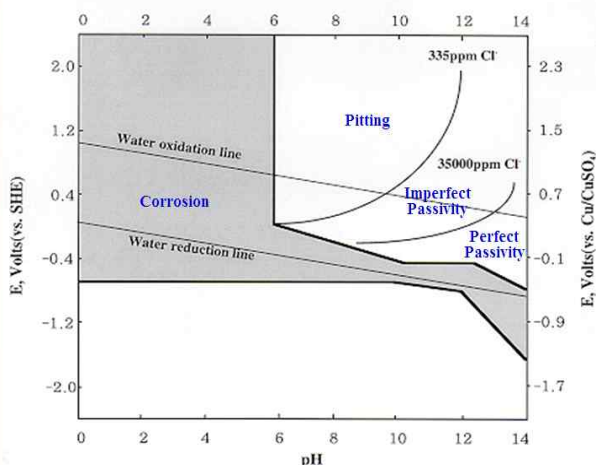


Fig. 3. Pourbaix diagram illustrating the corrosion behaviour of iron in solutions with chloride.

공식영역, 불완전부동태 영역, 완전부동태영역으로 세분화되어 부식이 진행되며, 염소이온의 농도가 증가함에 따라 공식영역이 확대된다.

3. 부식전위에 영향을 미치는 요인들

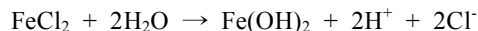
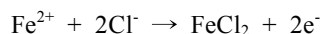
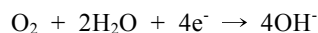
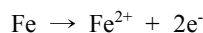
부식전위 측정데이터를 분석할 때에는 염소 이온의 농도, 탄산화, 용존 산소의 함유량, 콘크리트의 비저항, 그리고 기타 부식전위에 상당한 영향을 미치는 요인들을 반드시 고려해야만 한다. 부식전위를 분석함으로써 철근콘크리트 구조물의 부식상태를 진단하고 평가하는 것은 상당히 복잡하다⁹⁾. 예를 들어 조밀한 재질의 콘크리트를 사용하거나, 콘크리트 충전제, 부식억제제와 같은 화학 첨가물을 사용하거나, 고로 슬래그 (blast furnace slag), 플라이 애쉬 (fly ash) 등과 같은 폐자재를 사용하는 등 콘크리트의 배합 재료 및 설계기술이 상당히 다양화되고 진보하였기 때문에 부식전위 측정법에 의해 진단평가를 할 때에는 철근의 부식전위에 영향을 미치는 복잡한 요인들을 이해하고 고려해야 한다¹⁰⁾.

이 같은 경우 단순히 부식전위를 비교함으로써 철근콘크리트의 부식 가능성을 평가하는 ASTM C876 Standard와 같은 부식전위 기준은 더 이상 적용할 수 없게 된다. 예를 들면, 부식전위 기준에서는 더욱 천한 값의 부식전위가 일반적으로 철근이 부식되었을 가능성이 높다는 것을 제시하고 있다. 그러나 이러한 일반적인 규칙이 항상 유용한 것만은 아니다. 즉 여러 가지 요인들이 철근콘크리트의 부식전위 수치를 더욱 귀한 값이나 천한 값으로 변화시킬

수 있기 때문이다. 그리고 여러 가지 인자들에 의해 철근의 전위가 -350 mV/CSE 이하로 낮게 변화되었다도 반드시 이 전위 결과가 철근부식의 심각성과 밀접한 관계가 있는 것만은 아니다.

3.1 염소이온 농도의 영향

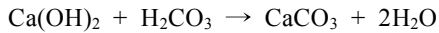
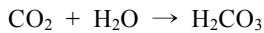
콘크리트 속에 존재하는 염화물은 수용액에 이온상태로 세공용액 (pore solution) 내에서 자유롭게 이동하는 수용성염화물 (water soluble chloride)과 이온화되지 않고 염으로 결속되어 있는 산용해성염화물 (acid soluble chloride)로 분류 된다. 이들 염화물들은 콘크리트 속으로 침투하게 되어 철근표면에 형성된 부동태 피막을 파괴하여 철근부식을 촉진시킨다. 철근콘크리트 구조물에 함유될 수 있는 염화물로는 염화나트륨 (NaCl), 염화칼륨 (KCl), 염화칼슘 (CaCl₂), 염화마그네슘 (MgCl) 등이 있다. 염소 이온 농도의 증가는 철근부식을 가속화시키는 가장 심각한 요인이기 때문에 콘크리트 구조물 건설시 이러한 염분으로 인한 철근부식의 영향을 최소한으로 억제하기 위해 콘크리트 재료중의 염소이온 총량을 규제하고 있으며 프리스트레스 콘크리트 (prestress concrete)나 염해 (salt damage)의 염려가 우려되는 환경에서는 염화물량의 규제를 더욱 엄격하게 적용하고 있다¹¹⁾. 여기서 염소이온은 콘크리트의 조직을 이완시키고 철근표면에서 부동태 피막이 상대적으로 불균일한 곳에 흡착하여 피막을 국부적으로 파괴시켜 부식으로 인한 균열이 수직적으로 작용하여 철근표면이 움푹 파이는 공식을 발생시킨다.



이때 철근표면에서는 철이 용해되어 녹이 발생되고, 콘크리트속의 염소이온은 화학반응으로 인해 소멸되지 않고 계속적으로 반복 반응하여 부식생성물을 증가시키고 부식을 가속화시킨다¹²⁾. 이러한 염소 이온에 의한 부식은 부식전위를 상당히 낮은 천한 값으로 변화시켜 철근을 부식시킨다. 염소이온에 의해 철근의 전위가 낮아지는 것은 ASTM C876 Standard 전위기준에서 제시하는 부식성 확률과 일치한다.

3.2 탄산화의 영향

콘크리트 내부의 철근이 부식으로부터 보호되는 이유는 철근의 부동태화를 촉진하는 콘크리트의 강알칼리성 환경 때문이다. 시멘트의 30 % 이상이 수산화칼슘 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)으로 존재하기 때문에 pH가 12.5 이상 상승하게 된다. 이와 같이 수산화칼슘에 의해 철근표면에 얇게 형성된 부동태 산화피막이 용존산소와 물, 기타 부식인자들을 억제하는 물리적 장벽으로 작용하기 때문에 콘크리트와 같은 강알칼리 환경에서는 부식이 억제된다. 그러나 대기 환경의 이산화탄소 (CO_2)가 콘크리트 내부에 침투하면 이산화탄소는 콘크리트 내부의 세공용액에 용해되어 탄산을 형성하고 수산화칼슘과 다른 시멘트 수화물과 반응하여 불용성의 탄산칼슘을 생성함에 따라 콘크리트 환경은 탄산화 (carbonation)가 진행된다.



(Soluble) High Alkalinity \rightarrow

(Insoluble) Low Alkalinity

탄산화가 진행되면 콘크리트의 pH가 10 이하로 떨어지게 되어 부동태 능력이 약해지므로 철근표면에 형성된 부동태 피막이 파괴되어 철근은 더 이상 피막으로부터 보호되지 못하게 된다¹³⁾. 이러한 경우 부식전위는 그다지 크게 변화되지 않지만 철근의 부식속도는 크게 증가하게 된다.

3.3 용존산소의 영향

철근콘크리트의 부식전위 데이터는 콘크리트와 철근사이 계면에서의 용존산소농도에 의해 크게 영향을 받는다. 콘크리트 내부 철근표면에서의 산소농도가 감소하게 되면 철근의 부식전위 값이 더욱 천한 값으로 떨어지게 된다. 그러므로 부식전위가 천한 값으로 측정되었다더라도 반드시 철근이 부식되었다고 볼 수 없다. 예를 들어, 수심이 깊은 곳의 철근콘크리트에서는 염분이 풍부하여도 용존산소가 거의 없기 때문에 철근에 부식이 발생하지 않지만 부식전위는 낮게 나타난다. 그리고 산소가 침투하기 어려운 조밀한 콘크리트의 피복 내부에 있는 철근의 경우도 상대적으로 산소의 침투가 용이한 콘크리트에서보다 부식전위가 훨씬 낮은 값으로 측정된다. 즉 천한 수치의 부식전위가 측정되었다도 철근이 부식되었다는 가능성이 반드시 높은 것이 아니라는 것을 의미한다.

3.4 콘크리트 비저항의 영향

측정된 철근의 부식전위 데이터에는 콘크리트의 높은 비저항으로 인해 상당한 오차가 포함될 수 있다. Fig. 1에서와 같이 철근의 부식전위를 측정할 경우 측정된 부식전위 값은 고저항 전위차계 내부 저항 양단간의 전위차를 의미한다. 콘크리트의 비저항에 의한 오차를 배제한 철근의 부식전위를 측정하기 위해서는 첫 번째 전기전도성이 양호한 액체로 콘크리트 표면을 적셔서 콘크리트의 비저항을 감소시키는 방법이 있고, 두 번째 내부 저항이 높은(약 20M Ω 이상) 전위차계를 사용하는 방법이 있다. 부식전위를 측정하기 위한 기준전극을 철근과 바로 인접한 콘크리트 표면에 위치하는 것도 콘크리트 비저항을 최소화하는 방법이 될 수 있다.

3.5 콘크리트 피복두께의 영향

콘크리트는 다공성 재질이기 때문에 염소이온, 이산화탄소, 용존산소 및 수분 등과 같은 부식을 발생시키는 인자들이 콘크리트 표면으로부터 확산에 의해 콘크리트 내부로 침투하고 철근이 배근된 위치까지 도달하게 되어 철근부식을 발생시킨다¹⁴⁾. 아스팔트 콘크리트 같이 침투성이 낮거나 콘크리트의 피복두께가 두꺼운 콘크리트는 부식성 인자들이 침투하는 것을 막기 위한 물리적 장벽을 제공하는 역할을 하고 부식작용과 관련된 이온들의 확산 속도를 억제한다. 그리고 침투성이 낮은 콘크리트는 콘크리트와 철근과의 경계면에서 용존산소의 농도가 낮기 때문에 철근의 부식전위가 더욱 낮은 천한 값으로 변하게 된다. 이 경우도 부식전위 기준에 제시되어 있는 철근의 부식 가능성이 높다는 기준과는 상반된다.

3.6 부식억제제의 영향

부식억제제를 사용하는 것으로 인해 철근의 부식전위가 변화하는 것은 상당히 복잡한 관계가 있다. 부식억제제는 양극 부식억제제와 음극 부식억제제가 있기 때문에 어떤 것을 사용하느냐에 따라 부식전위의 결과는 상반되기 때문이다. 즉 양극 부식억제제는 강한 산화제이다. 현재 상업용 제품으로 유통되고 있는 질산칼륨계 부식억제제의 경우 철근의 부식전위를 더욱 높은 귀한 값으로 변화시키게 되어 부식속도를 상당히 감소시키는 역할을 한다. 즉 질산칼륨계 부식억제제를 사용한 철근콘크리트 구조물에서 측정된 부식전위 수치는 부식억제제를 사용하지 않은 철근콘크리트 구조물에서 보다 부식전위가 높게 나타난다.

그러나 양극 부식억제제와는 대조적으로 음극 부식억제제는 철근부식을 감소시키기 위해 철근의 부식전위를 더욱 낮은 천한 값으로 변하게 한다. 또한 양극, 음극 혼합 부식억제제를 사용하는 경우도 있다. 이러한 경우 철근의 부식전위는 +, - 양쪽 방향으로 변할 수 있기 때문에 혼합 부식억제제가 철근의 부식전위에 어떠한 영향을 미치는지 명백히

확인하여 부식전위 측정결과에 부식억제제의 화학적 특성을 반드시 반영해야 한다. 그러므로 철근콘크리트 구조물에 부식억제제를 사용했을 경우에 부식전위 측정 결과에 의하여 부식상태를 정확히 진단하기 위해서는 반드시 사용한 부식억제제의 영향에 관하여 고려해야 한다.

3.7 에폭시 코팅 철근 및 용융아연도금 철근의 영향

에폭시 코팅 철근 (epoxy coated rebar)이나 용융아연도금 철근 (galvanized rebar)의 경우에는 철근의 부식전위에 의한 부식가능성 평가기준을 적용할 수 없다. 에폭시 코팅 철근의 경우 부식전위를 측정하기 위한 전기 회로가 형성되지 않기 때문에 철근자체의 안정된 전위 값을 측정할 수 없다. 경우에 따라서 안정된 전위가 측정되는 경우도 있지만 이러한 경우는 에폭시 코팅부분에 결함이나 손상부위가 발생되거나 에폭시 코팅이 누락된 철근표면에 의해 전위가 측정되는 것이다. 용융아연도금 철근의 경우, 일반적으로 갈바닉 금속으로 사용되는 아연이 철근을 부식으로부터 방지된다. 용융아연도금 철근이 사용된 철근콘크리트에서 측정된 부식전위의 수치는 철근의 부식전위가 아니라 철근과 표면에 코팅된 아연의 혼합전위가 측정된 것이다. 그러므로 ASTM C876 Standard 부식전위 기준에서 제시한 철근의 부식전위에 대한 단순한 비교는 적용할 수 없는 것이다. 그러나 이러한 용융아연도금 철근의 경우에도 부식전위의 변화를 장기간 동안 모니터링 함으로써 철근의 부식상태를 확인할 수 있다.

3.8 유기코팅의 영향

철근콘크리트 표면에 유기코팅 (organic coatings)이나 유기물이 함유된 몰탈 (Mortar)로 그라우트 (grout) 처리를 했을 경우, 측정된 철근의 부식전위 값은 코팅이나 그라우트 자체의 높은 저항으로 인해 철근콘크리트의 부식전위 측정 자체가 불가능하거나 측정이 되더라도 데이터에 오류가 많이 포함되어 있기 때문에 측정결과를 신뢰할 수 없게 된다. 그러나 코팅이 제거된 부위나 손상된 부위에서는 오차가 배제된 철근의 부식전위가 측정될 수 있지만 유기코팅의 경우에도 산소의 침투성이 매우 낮기 때문에 산소결핍에 의해 철근의 부식전위가 낮은 천한 값으로 변하게 되므로 전위 측정결과를 분석할 때에는 반드시 이러한 사항들을 고려해야 한다.

3.9 음극방식시스템의 영향

음극방식시스템의 경우 아연이나 알루미늄과 같은 전위가 낮은 금속을 철근과 전기적으로 연결시키는 희생양극식 음극방식과 티타늄 (Ti)이나 백금 (Pt) 등과 같은 불용성 양극과 직류 전원공급장치 (DC power supply unit)를 철근과 전기적으로 연결하여 강제로 방식전류를 인가시키는

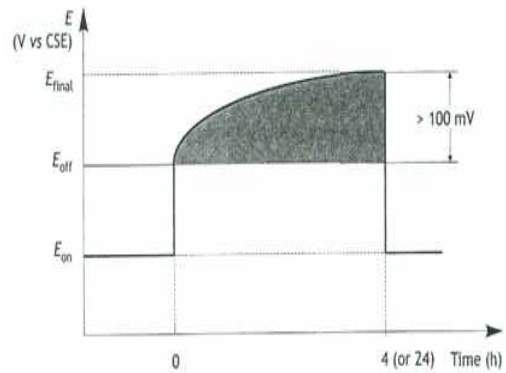


Fig. 4. Potential decay during an instant-off measurement of ohmic interference.

외부 전원식 음극방식으로 대별되는데 이미 교량이나 항만 시설등과 같은 구조물의 방식을 위해 많이 적용되고 있다¹⁵⁾. 이러한 음극방식시스템의 경우 철근에 방식전류를 공급하여 철근의 전위를 안정영역으로 음극 분극 시키기 때문에 철근의 부식전위를 측정함으로써 철근의 부식상태를 확인할 수 없다. 만약 철근콘크리트 구조물에 음극방식 시스템을 적용한 경우에는 Fig. 4에서와 같이 음극방식시스템 작동을 중단하고, 24시간, 적어도 4시간 이상 그대로 방치하여 철근표면에서 전위의 역분극 (depolarization)이 종료되고 난 시점에서 부식전위를 측정해야 한다. 그리고 다른 철근콘크리트 구조물이 인접해 있는 경우에는 음극방식시스템에 의한 누설전류가 유입될 수 있다. 이러한 경우에도 철근의 부식전위는 귀한 값으로 높아지거나 천한 값으로 낮아지는 등 전위의 변화가 큰 폭으로 변동하게 되어 안정화되지 않기 때문에 측정된 부식전위는 신뢰할 수 없다.

4. 결론

최근에 건설되고 있는 철근콘크리트 구조물의 경우, 콘크리트의 재료가 다양화되고 배합설계기술의 향상과 보수, 보강기술이 발달함에 따라 단순한 부식전위 측정법에 의한 철근콘크리트의 부식 진단은 여러 가지 요인들에 의해서 신뢰성이 떨어진다. 즉 측정된 부식전위가 기준전위 이하인 경우 부식 가능성이 더욱 높다는 것을 나타내지만, 이것은 측정하는 사람이나 측정 장비, 그리고 노출 환경조건에 따라서 해석하기 좋은 쪽으로 이용될 수 있기 때문에 단시간에 부식전위를 측정하는 것만으로 철근콘크리트의 부식을 평가하는 것에는 한계가 있다. 철근콘크리트의 부식상태를 진단하기 위한 부식전위 기준은 다양한 많은 요인들에 의해서 다르게 평가될 수 있으며, 여러 가지 요인이 복합적으로 작용하기 때문에 진단결과에 오류를 범할 수 있다. 그러므로 신뢰성이 높은 진단결과를 얻기 위해서는 여러 가지 사항들

을 고려하여야 한다.

- 1) 현재의 부식전위 측정값만으로 부식가능성을 판단하기 보다는 부식전위를 장기간 모니터링 하여 그 경향을 파악하는 것이 더욱 신뢰할 수 있는 진단결과를 얻을 수 있다.
- 2) 부식전위 측정법을 통해서 철근콘크리트 구조물의 부식 손상을 진단하기 위해서는 부식전위 측정시 발생할 수 있는 오류를 범하지 않도록 경험이 풍부한 부식 전문 엔지니어에 의한 현장 측정 및 진단이 필요하다.
- 3) 콘크리트의 재질과 철근의 배근 설계, 콘크리트 피복의 두께, 사용된 혼화제의 기본 정보, 과거 보수 및 보강 이력, 육안 검사결과, 염소이온 농도 측정 결과, 탄산화 점검결과, 온도, 그리고 콘크리트의 비저항 측정결과들은 부식전위에 영향을 미치는 중요한 사항이기 때문에 철근콘크리트의 부식전위 데이터를 분석할 때 반드시 이들의 상관관계를 고려해야 한다.
- 4) 부식전위의 측정법은 철근콘크리트의 정성적인 부식상태를 판단하기 위한 방법이기 때문에 구조물의 안전성 평가 및 내구수명을 예측할 수 있는 정량적인 부식량을 확인하기 위해서는 부식전위뿐만 아니라 부식속도의 측정이 추가적으로 필요하다.

후 기

본 연구는 중소기업청에서 지원하는 2014년도 산학협력 기술개발사업(No. C0186315)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

References

1. N. J. Carino, *J. Perform. Constr. Fac.it*, **13**, 96 (1999).
2. S. K. Verma, S. S. Bhadauria, and S. Akhtar, *J. Constr. Eng.*, **834572**, 11 (2013).
3. H. Song and V. Saraswathy, *Int. J. Electrochem. Sci.*, **2**, 1 (2007).
4. J. Jeong and K. Kim, *Corros. Sci. Tech.*, **11**, 77 (2012).
5. C. Jin, J. Jeong and E. Kyoung, *Corros. Sci. Tech.*, **11**, 6 (2012).
6. T. Parthiban, R. Ravi, and G. T. Parthiban, *Adv. Eng. Softw.*, **37**, 375 (2006).
7. ASTM Standard C876-91, Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, Annual Book of ASTM Standards, **03.02**, 432 (1994).
8. B. Pradhan and B. Bhattacharjee, *J. Mater. Civ. Eng.*, **21**, 543 (2009).
9. Gu Ping and J. J. Beaudoin, *Construction Technology Update*, **18**, 1 (1998).
10. H. Xu, Z. Chen, B. Xu, and D. Ma, *The Open Civil Engineering Journal*, **6**, 1 (2012).
11. B. Elsener, *Constr. Build. Mater.*, **15**, 133 (2001).
12. R. R. Hussain, *Measurement*, **44**, 274 (2011).
13. G. K. Glass, B. Reddy, and N. R. Buenfeld, *Corros. Sci.*, **42**, 2013 (2000).
14. Y. S. Kim, S. J. Park, D. Hwangbo, and M. C. Shin, *Corros. Sci. Tech.*, **11**, 26 (2012).
15. L. Bertolini, F. Bolzoni, A. Cigada, T. Pastore, and P. Pedferri, *Corros. Sci.*, **35**, 1633 (1993).