



02

염해 및 철근부식에 대한 비파괴 평가기법의 적용성 연구

Applicability of Nondestructive Test Methods in Assessing Chloride-induced Corrosion of Steel in Concrete

백승우 Seung-Woo Paek
삼성중공업(주)
E&S사업부 과장

정민선 Min-Sun Jung
한양대학교 건설환경플랜트
공학과 박사후연구원

황준필 Jun-Pil Hwang
한양대학교 건설환경플랜트
공학과 박사후연구원

안기용 Ki Yong Ann
한양대학교
건설환경플랜트공학과 교수

1. 머리말

콘크리트내 철근의 부식상태를 평가하는 방법은 피복 콘크리트를 쪼아내고 노출된 철근을 관찰하여 평가하는 방법과 초음파 탐상, 적외선 계측, 방사선 투과시험과 같은 비파괴 시험법으로 크게 구분된다. 또한, 근래 들어 철근부식과정의 전기화학적 반응의 특징을 이용한 전기화학적 기법도 널리 활용되고 있다. 본 원고에서는 콘크리트 구조물에서 철근의 부식상태를 정성적 혹은 정량적으로 측정할 수 있는 전기화학적 비파괴 시험법에 대해 상세히 살펴보고, 그 장·단점 등을 종합적으로 분석하고자 한다.

2. 철근부식 비파괴 시험

2.1 자연전위법

자연전위법은 조합전극과 시료금속의 전위차를 계측하여 부식의 가능성을 평가하는 정성적인 방법이다. 자연전위법은 원리 및 측정이 단순하고, 고가의 측정 장비를 요하지 않으므로 현재 가장 널리 사용되고 있는 방법 중 하나이며, 1977년 ASTM C 876 Standard Test Method for Half-Cell Potential of Reinforcing Steel in Concrete에 규격화되었다. 콘크리트 내부의 자연전위 측정은 <그림 1>과 같이 철근을 양극에 조합전극을 음극단자에 접촉하며, 다수의 위치에서 철근의 전위를 측정한다. 이 방법에 사용되는 표준 조합전극은 포화카로멜(SCE), 포화황산동전극(CSE), 포화염화은전극(SSCE) 등이 있으며, ASTM C 876¹⁾에 따르면 측정 전위에 따른 부식 확률은 <표 1>과 같다.

자연전위법은 부식가능성을 나타내는 내부철근의 자연전위 값이 다양한 환경에 따라 상이한 결과로 나타날 수 있으며, 이 방법은 단지 부식발생의 가능성만을 나타내는 정성적인 평가로 부식속도 예측과 같은 정량적 부식평가를 할 수 없다는 단점이 있다.

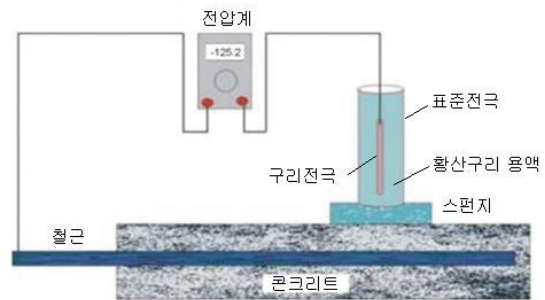


그림 1. 자연전위법 측정 개요

표 1. 자연전위법에 의한 측정값과 부식확률의 관계

측정값		부식확률
mV Vs. SCE	mV Vs. CSE	
< -426	< -500	극심한 부식
< -276	< -350	90% 이상의 부식 확률
-126 to -275	-350 to -200	중간 정도의 부식
> -125	> -200	10% 이하의 부식 확률

2.2 표면전위법

표면전위법에서는 2개의 전극이 사용되며, 한쪽은 콘크리트 표면의 특정위치에 고정시키고 다른 쪽의 전극을 콘크리트 표면에 일정간격으로 이동시켜 전위차를 매핑한다. 이 방법을 통한 부식평가에 있어 인접한 두 측정점의 전위 구배가 50mV/30cm 이상인 장소는 부식 활성 장소로 판정된다. 이 방법은 콘크리트내 철근에 직접적으로 측정단자를 연결하여야 하는 자연전위법과는 달리 철근과의 별도 측정단자를 마련할 필요가 없다는 장점이 있다<그림 2>.

2.3 선형분극저항법

선형분극저항법은 콘크리트내 철근의 부식속도를 평가하는데 가장 널리 쓰이는 방식이다. 이 방법은 신속히 결과를 얻을 수 있고, 콘크리트내 일부 철근에 전기적 연결만 하는 비파괴성 시험으로 정확한 콘크리트 구조물의 부식상태 평가가 가능하다. 또한 전위차를 통한 부식상태를 정성적으로 평가하는 자연전위법에 비해 부식속도를 정량적으로 평가할 수 있는 시험방법이다.

선형분극저항법에서 철근은 평형전위에 의해 교란된다. 철근의 전위를 ΔE만큼 변화시키면 일정 시간 후 미소전류 ΔI가 발생하고, ΔE가 선형 Stern-Geary 범위인 10-30mV내에서는 전위와 전류 사이에 선형관계가 성립하여 다음의 식과 같이 분극저항 R_p를 구할 수 있다²⁾.

$$R_p = \Delta E / \Delta I \dots\dots\dots (1)$$

또한, 부식속도 I_{corr}은 다음의 식으로부터 구할 수 있다.

$$I_{corr} = B / R_p \dots\dots\dots (2)$$

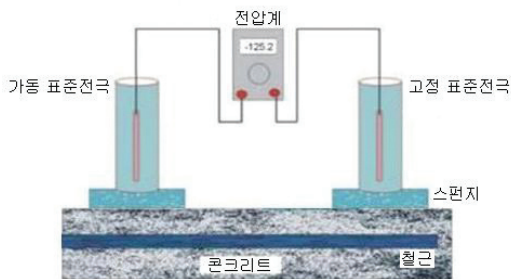


그림 2. 표면전위법 측정 개요

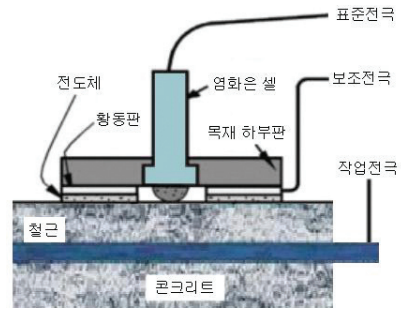


그림 3. 선형분극저항법 측정 개요

여기서, B는 Stern-Geary 상수로서 콘크리트 내부 강재의 부식에서는 25 mV가 일반적으로 사용된다. 부식 전류밀도 i_{corr}는 다음의 식으로 계산이 가능하다.

$$i_{corr} = I_{corr} / A \dots\dots\dots (3)$$

여기서, A는 분극화된 철근의 표면적을 나타낸다.

기존의 선형분극저항법에서는 <그림 3>과 같이 교란이 콘크리트 표면의 보조전극을 통해 이루어지며, 분극화된 철근의 표면적은 보조전극의 연직하단 투영면적을 의미한다. 그러나 보조전극으로부터 나온 전류는 구속되지 않으며, 수평으로 넓게 퍼지려는 경향이 있다. 이는 분극화된 철근 표면적 계산시 오류를 발생시켜 정확한 부식전류 밀도값의 평가가 어렵게 한다.

콘크리트 표면에서 보조전극에 의해 철근에 가해지는 전류를 보조전극의 연직 투영면적으로 제한하고자 내부 보조전극을 둘러싼 이차 보조 가드링 장치가 개발되었다. 외부 가드링 장치의 역할은 구속된 전류가 정해진 영역외에서 내부 보조전극에 의한 전류의 교란을 방지하도록 하는 것이다. 구속 전류를 적정 수준으로 유지하기 위해 두개의 센서 전극이 내부와 외부 보조전극사이에 위치하게 되며, 이들 센서 전극사이에 전위차는 지속적으로 모니터링되고, 이러한 전위 차이를 유지시킬 수 있는 구속전류값이 결정된다³⁾. <그림 4>는 가드링 장치의 개념도를 나타낸다.

2.4 교류 임피던스법

최근 AC 임피던스법이 콘크리트내 철근의 부식을 정량화하는 비파괴 기술로서 널리 활용되고 있다. AC 임피던스법에서는 직류분극 대신 10 kHz ~ 10 mHz 범위의 교류전압을 인가하여 분극시킨다. 교류전압에 대한 응답

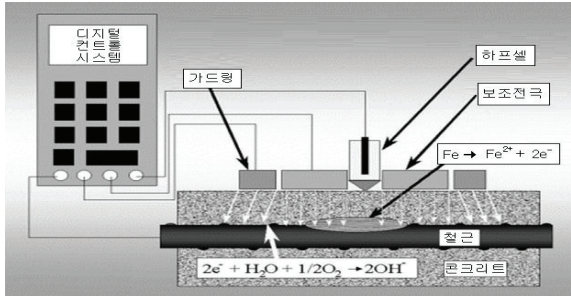


그림 4. 가드링 장치 개요

은 하나의 복잡한 임피던스로, <그림 5>에서 보는 바와 같이 저항을 나타내는 실수부(Z')와 전하량 혹은 인덕티브를 나타내는 허수부(Z'')로 구성된다. 그리고 주파수에 따른 임피던스의 변화를 분석하여 철근의 부식경계면에 형성된 등가 전기회로(equivalent circuit)를 <그림 5>와 같이 결정할 수 있다.

일반적으로 등가 전기회로는 분극저항 R_p 와 병렬의 커패시턴스 C_{dl} , 그리고 직렬로 연결된 피복콘크리트의 저항(R_s)으로 구성되며, 임피던스 값은 식(4)에 의해 결정될 수 있다.

$$Z = 1/R_p + j\omega C_{dl} \dots\dots\dots (4)$$

여기에서, Z = 임피던스(Ω), R_p = 분극저항(Ω), $\omega = 2\pi f$ (rad/s)로 각속도, f = 주파수(Hz), C_{dl} = 커패시턴스($\mu F/cm^2$)를 의미한다.

<그림 5>에 나타난 바와 같이 Z' 와 Z'' 을 이용하여 분극저항 R_p 를 지름으로 하는 반원을 그릴 수 있다. 그리고 반원은 측정된 기준전극과 내부철근 사이의 피복콘크리트의 저항 R_s 에 의해 차감되며, 반원 꼭지점에서의 주파수 f 는 측정되고, C_{dl} 은 식(6)으로부터 산출될 수 있다.

$$C_{dl} = 1/(2\pi R_p f) \dots\dots\dots (5)$$

교류 임피던스법은 직류신호에 의한 분석이 곤란한 경

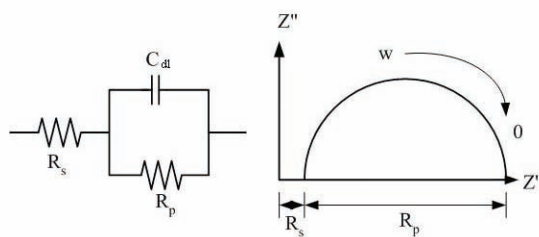


그림 5. 콘크리트내 강재에서의 Nyquist Plot

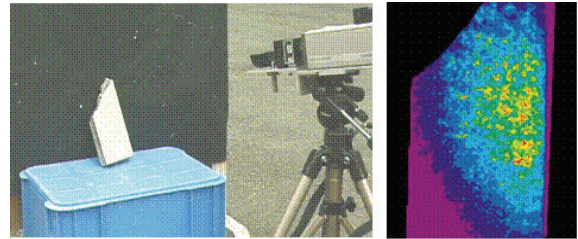


그림 6. 다중 스펙트럼 카메라를 이용한 염분 측정

우에 적용가능한 방법으로 분극저항뿐 아니라 전해질(피복콘크리트)의 저항이 동시에 측정되어 철근부식에 관련된 구체적인 정보를 제공해 줄 수 있는 방법이다. 그러나 이 방법은 측정결과를 얻는데 장시간이 소요되며, 측정 결과의 평가와 해석 등이 매우 어렵기 때문에 현장에서 적용하기에 제약이 따른다.

2.5 적외선 서모그래프

적외선 온도장치는 콘크리트내 염분량 데이터를 얻기 위해 도입된 신기술로, 이 시스템은 근접 적외선 측정기, 이미징 분광기, 근접 적외선 CCD(Charge-Coupled Device) 카메라로 구성된다. 분광기를 통해 분산된 적외선은 CCD 카메라내 감광소자내 파장의 형태로 기록된다. <그림 6>은 다중 스펙트럼 카메라를 통한 측정결과를 보여주고 있다⁴⁾. 염화나트륨이 콘크리트의 표면에 흡착되면 각 구성요소의 특성을 나타내는 특정 물질을 통해 전자기파가 반사된다. 이러한 이론에 근거하여 염화나트륨의 경우 1,640 nm의 전자기파가 특성 스펙트럼으로 얻어진다. 이 기술은 콘크리트 표면의 염분량을 측정하는 비파괴 시험법으로서 매우 효과적인 기술이 될 수 있을 것이다.

<그림 7>은 서모그래프에 의해 측정된 염소이온 겉보기 확산계수의 예측값을 나타낸다⁵⁾. 이 방법은 염소이온 확산계수와 콘크리트의 열소산 특성과의 상관관계를 통

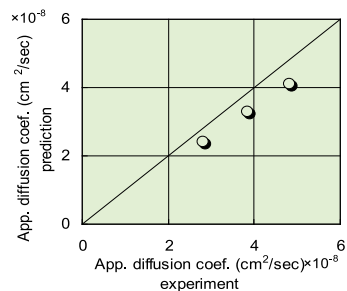



그림 7. 서모그래프를 이용한 겉보기 확산계수의 예측

해 구현되며, 현재 연구개발이 진행 중이다. 염소이온 겉보기 확산계수를 코어 채취 혹은 드릴링을 통해 얻은 시편으로부터 얻은 프로파일에 의해 구하던 기존의 방식에 비해 이 기술은 비파괴 시험으로 겉보기 확산계수를 구할 수 있다는 점에서 효과적인 시험법이 될 수 있을 것이다.

3. 맺음말

본 고에서는 콘크리트 구조물의 염분침투 및 철근 부식을 공용 중 모니터링할 수 있는 비파괴 기법에 대해 살펴 보았다. 염해 및 탄산화로 인해 발생하는 콘크리트 구조물의 철근부식은 그 초기에는 균열만을 유발하지만 향후 피복 콘크리트의 박리/박락 등을 초래하여 중국에는 구조물의 안전성에도 큰 영향을 미치므로 지속적인 관찰 및 대책 수립이 필요하다. 그러나 철근부식은 일반적으로 균열이 발생한 후에 육안 관찰이 가능하므로 이 시기에는 보수·보강 등의 대책 수립이 용이하지 않으며, 초기 발견 후 대책 수립하는 것에 비해 어려므로 비효율적이다. 따라서 구조물의 공용 개시 후 앞서 살펴본 여러 비파괴 시험에 의해 지속적인 구조물의 성능 모니터링을 통한 유지관리를 수행하는 것이 좋다. 또한 철근 부식을 평가하는 시험법에 비해 염분 침투량에 대한 비파괴 모니터링은 아직 초기 단계에 머물러 있으므로 이에 대한 관련분야 연구자들의 지속적인 연구개발이 필요할 것이다. 

참고문헌

1. ASTM C876-91, Standard Test Method for Half-cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, 1999.
2. Stern, M. and Geary, A. L., Electrochemical Polarization: I. A Theoretical Analysis of the Shape of Polarization Curves, *Journal of the Electrochemical Society* 104, 1957, pp. 56 ~ 63.
3. Milliard, S. G., Law, D. W., Bunsey, J. H., and Cairus, J., Environmental Influences on Linear Polarization Corrosion Rate Measurements in Reinforced Concrete, *NDT & E International*, Vol. 34, 2001, pp. 409 ~ 417.
4. Sato, D., Measurement Technique of Acquiring Sodium Chloride Concentration by Using Near-infrared Spectrum, *Proceedings of JSCE Annual Conference*, Vol. 56, 2001, pp. 844 ~ 845.
5. Kato, Y., Prediction of the Resistance Performance of the Substance Movement by Using Thermograph, *Proceedings of JSCE Annual Conference*, Vol. 58, 2003, pp. 825 ~ 826.

담당 편집위원 : 권성준(한남대학교) jjuni98@hannam.ac.kr



백승우 박사는 연세대학교 토목공학에서 염해를 받는 콘크리트 구조물의 확률론적 내구성 설계에 관한 연구로 박사학위를 취득하였고, 2009년부터 삼성중공업에서 근무하고 있다. 주 관심 연구 분야는 염해 및 탄산화의 내구성 설계, 고내구성 콘크리트, 해상 부유식 콘크리트 구조물, 해상풍력 콘크리트 하부구조 등이다.
sw.pack@samsung.com



정민선 박사는 연세대학교 토목공학에서 산중화능력법을 이용한 콘크리트 중의 철근부식 예측에 관한 연구로 박사학위를 취득하였고, 2012년부터 한양대학교 건설환경플랜트공학과에서 Post Doctor로 재직하고 있다. 주 관심 연구 분야는 염해를 받는 콘크리트 구조물의 내구성 및 산중성화를 통한 부식 임계치 산정, 6가 크롬 침출을 고려한 친환경 콘크리트 등이다.
msjcivil@gmail.com



황준필 박사는 연세대학교 토목환경공학과에서 콘크리트 구조물에서 발생하는 가스 배출 및 유해이온 침출 저감에 관한 연구로 박사학위를 취득하였으며, 한양대학교 건설환경플랜트공학과 박사후연구원으로 재직 중이다. 주로 콘크리트의 환경영향성 평가에 관한 연구를 수행하고 있다.
yellowjp@hanyang.ac.kr



안기용 교수는 영국 Imperial College 건설환경공학과에서 콘크리트의 철근부식 임계 염화물농도에 관한 연구로 박사학위를 취득하였으며, 현재 한양대학교 건설환경플랜트공학과 교수로 재직 중이다. 주로 콘크리트의 내구성 및 환경영향성 평가에 관한 연구를 수행하고 있다.
kann@hanyang.ac.kr