

온도 영향을 고려한 RC 구조의 반 전위 및 OCP의 상관성 분석

Relationship Analysis between Half Cell Potential and Open Circuit Potential Considering Temperature Condition

윤용식¹ · 권성준^{2*}

Yong-Sik Yoon¹ · Seung-Jun Kwon^{2*}

(Received March 7, 2022 / Revised March 17, 2022 / Accepted March 17, 2022)

The corrosion potential in concrete varies greatly with exposure and concrete mix conditions. In this study, RC (Reinforcement Concrete) samples were prepared considering cover depth, chloride concentration, and W/C(water to cement) ratio as variables, and HCP(Half Cell Potential) was measured, which evaluated comparative potential between embedded steel and concrete surface. In addition, OCP(Open Circuit Potential) was measured using buried steel and CE(Counter Electrode). Agar and NaOH solution were used as ion exchange materials and Hg/HgO was used for RE(Reference Electrode), which was more sensitive to temperature than HCP. Among the influencing factors, the exposure period and chloride concentration had a relatively greater effect than cover depth and w/c ratio. Additionally, the entire measured HCP and OCP showed a clearly linear relationship with increasing cover depth and w/c ratio. Through multiple regression analysis, the relationship between HCP and OCP was quantified, and an improved correlation was obtained with temperature effect.

키워드 : 반 전위, 개방전위, 피복 두께, 염화물 농도, 온도, 물-시멘트 비

Keywords : HCP, OCP, Cover depth, Chloride concentration, Temperature, Water to cement ratio

1. 서론

콘크리트는 경제적이고 내구성이 확보된 대표적인 건설재료로서 활발히 사용되어 왔다. 콘크리트 구조물은 콘크리트의 취약한 인장응력으로 인해 철근 또는 텐던으로 보강하여 구조물의 하중을 지지하도록 설계되고 있으며, 다양한 혼화재료를 사용하여 구조적, 내구성 성능을 개선하고 있다. 그러나 노출 환경에 따라 염화물 이온 및 황산염 이온의 침투, 탄산화에 따른 pH 저감, 수분의 주기적인 건조 반복을 통하여 보강재로 사용되는 철근에서 부식이 발생하게 된다(Broomfield 1997; Yoon et al. 2018; Li et al. 2011). 콘크리트 구조물 내의 철근 및 텐던은 인장력에 주로 저항하며, 부식이 발생할 경우, 어느 수준까지는 철근의 Swelling effect로 인해 부착력이 증가하지만(Chung et al. 2008), 임계 부식량을 넘

어서는 경우 슬립이 발생하여 구조물의 안전성에 큰 문제를 야기한다. 매립된 보강재의 부식 문제는 막대한 경제적 손실을 야기하고 있으며(Yang et al. 2020), 사용기간의 증가에 따라 부식이 진전되므로 초기에 부식 개시를 판단하는 연구는 매우 중요하다. 많은 연구에서 염해 및 탄산화에 따른 철근부식에 대한 모델링 및 제어 기구에 관한 연구가 진행되었으며 최근 들어서 BIM (Building Information Modeling) 또는 공학적 불확실성 (engineering uncertainties)과 연계되어 부식 예측 및 내구수명 평가에 대한 연구가 진행되고 있다(Maekawa et al. 2009; Thomas and Bamforth 1999; Song and Saraswathy 2006; Win et al. 2004; Ishida et al. 2009; Kwon et al. 2009; Tsai et al. 2019). 그러나 부식개시에 대한 평가는 대부분 비파괴 기법(NDT: Non-Destructive Technique)에 의존하므로 많은 한계를 가지고 있다.

* Corresponding author E-mail: jjuni98@hannam.ac.kr

¹한남대학교 토목환경공학과 박사후연구원 (Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea)

²한남대학교 토목환경공학과 교수 (Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea)

NDT는 구조물을 파괴하지 않거나 일부를 채취하여 구조물의 성능을 평가하는 기술로 많은 분야에서 사용되고 있으며, 철근의 부식 가능성을 평가하는 분야에도 적용되고 있다. 이러한 기법은 콘크리트 자체의 전기전도도 및 내부 철근과의 전위 차이를 평가하여 부식 가능성을 평가한다. 주로 비저항 측정, 분극저항 측정, 임피던스 측정, HCP(Half Cell Potential) 측정 방법이 사용되고 있다(Alonso et al. 1988; Adams and Cawley 1989; Kim et al. 2014; Andrade and Alonso 1996). 또한 최근에는 적외선 열화상을 이용한 부식 감지(Maierhofer et al. 2006; Baek et al. 2012) 및 반고체 복합재를 사용한 부식 거동 평가로 발전하고 있다(Karthick et al. 2017; Karthick et al. 2014).

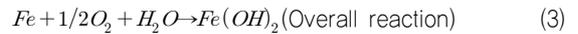
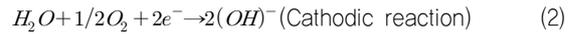
구조물을 시공할 때 매립된 철근에 정착되는 모니터링 센서의 경우, 준공 초기부터 부식 전위 또는 부식 전류를 측정하여 좀 더 정량적인 부식 거동(potential and corrosion density)의 평가가 가능하다. 이는 매립된 철근에 연결된 기준 전극(RE: Reference Electrode), 부식 전극(WE: Working Electrode), 대극 전극(CE: Counter Electrode) 간의 전위차를 이용하여 콘크리트 내부의 철근 또는 텐던의 부식 가능성을 평가하는 것이다. 많은 연구에서 이산화망간(MnO₂) 또는 관련 복합재와 폴리머를 사용하여 배근된 철근 위치에 이러한 센서 조합을 설치하고 이후 외부에서 상대 전위(OCP: Open Circuit Potential)를 측정하여 철근의 부식을 평가해왔다(Karthick et al. 2017; Karthick et al. 2014). 그러나 매립된 철근과 관련 측정 전극이 안전하다 하더라도, 매립된 센서가 사용수명이 다하거나 높은 농도의 열화 이온 침투로 인해 내부 매질이 과포화 될 경우에는 처리할 수 있는 방법이 없다.

본 연구에서는 기존의 연구를 참고하여(Lee and Kwon 2021), 이온 전달 물질인 한천(Agar)을 기반으로 한 교체 및 조정이 가능한 센서 시스템을 제작하였다. 이러한 센서는 내부에 부식 전극과의 결선만 되어 있으면, 센서를 외부에서 교체할 수 있다는 장점을 갖고 있다. 또한 가장 보편적으로 사용되는 HCP 측정 장비를 사용하여 물-시멘트 비, 피복 두께, 상부주입 염수의 농도를 고려하여 제조된 시편에 대하여 OCP(OCP: Open Circuit Potential) 및 HCP의 변화를 분석하였다. 상부 주입 염수의 건조-습윤 조건을 고려하여 내부 철근의 부식을 촉진시켰으며, 3 수준의 물시멘트비를 가진 콘크리트 시편에 대하여 두 측정값의 변화를 분석하였다. 두 측정 값 간의 상관성을 정규화를 기반으로 한 다중회귀분석을 통해 평가하였으며, 측정 시의 온도 조건을 고려하여 외부 온도에 따른 두 결과 값 간의 개선된 상관성을 확인하였다.

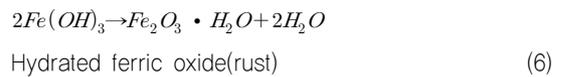
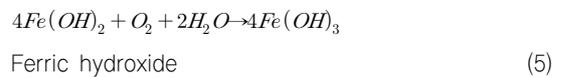
2. 내부 매립 철근의 부식 기구 및 부식 전위 평가

2.1 내부 매립 철근의 부식발생기구 및 부식 형태

콘크리트의 내부에는 Na(OH) 및 CaCl₂ 등 다양한 이온이 존재하며, 일부는 해리된 상태로 존재한다. 공극수의 pH는 콘크리트의 강알칼리성으로 인해 12.0 이하를 유지한다고 알려져 있으며, 이 조건에서는 철근 표면이 부동태 피막(passive film)을 통하여 부식으로부터 보호된다(Broomfield 1997; Yoon et al. 2018). 그러나 수화물의 침출, pH 감소, 음이온 침투를 통해 부식이 발생할 수 있으며, 음이온 중 염화물 이온(Cl⁻)은 높은 반응성으로 인해 빠르게 부식을 야기하는 인자로 알려져 있다. 철근부식의 산화 및 환원 반응은 Eq. (1)~(3)과 같이 나타낸다(Yoon et al. 2018; Lee and Zielske 2014).



산소가 충분한 산화 반응에서는 수산화철이 형성되며, 이 과정은 Eq. (4)~(6)과 같다.



흔히 녹(rust)으로 알려진 수산화 화합물은 철근의 부식이 증가함에 따라 철근과 콘크리트 간의 slip을 야기할 뿐만 아니라 철근의 체적 증가를 야기하여 콘크리트 표면의 균열 및 박락을 야기한다. 전술된 부식기구 이외에도 인접한 철근 또는 텐던에서는 Crevice corrosion과 Macro corrosion이 발생하기 쉽다(Lee and Zielske 2014; Permech et al. 2015). 특히 Post tension 텐던의 경우 RC 구조와 다르게, 덕트 내의 공동부 및 그라우트 품질 저하에 따라 Macro cathod 영역과 Small macro-anode 영역이 발생하므로 복잡한 부식기구가 형성된다. 특히 시멘트 내의 황 이온, 상부로부터의 제설제 및 수분의 이동, 조악한 그라우트 영향 등 다양한 부식 원인이 있으며, 소선이 서로 인접해 있으므로 Macro-micro의 복

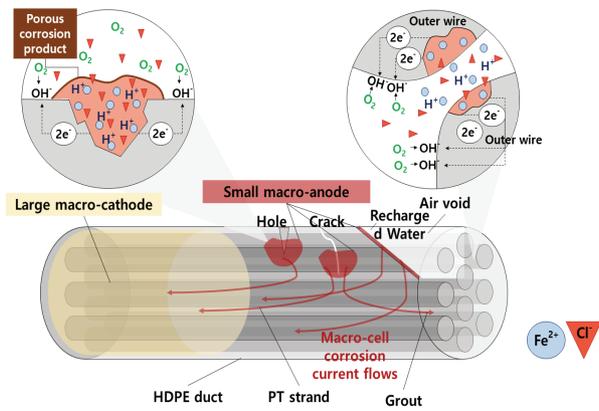


Fig. 1. Corrosion mechanism of pitting, crevice, and macro corrosion

잡한 부식기구가 동시에 발생한다. Fig. 1에서는 다양한 부식기구의 개요도를 나타내고 있다.

2.2 부식전위 평가를 위한 OCP 및 HCP 측정

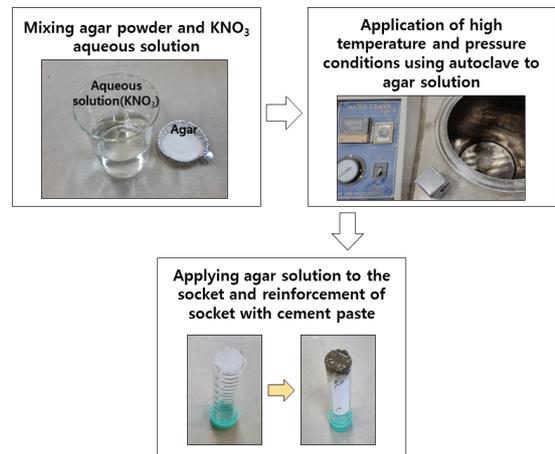
2.2.1 OCP 측정을 위한 센서 조립

본 연구에서는 교체형 센서의 제작을 위해 이온 전달물질로 한천을 사용하였다. 한천은 세포 배양에 널리 활용되는 물질로 유기 용매에 녹지 않으며, 내화학적 특성이 우수하다. 기존의 연구결과를 이용하여(Lee and Kwon 2021; Duffó et al. 2009; Shao and Feldman 2007), 1 M의 KNO₃ 수용액에 한천(10 wt%)을 녹인 뒤, 소켓 끝에 적용시켜 철근 부식 평가 소켓을 제작하였다. 또한 성형 최적비율(물:시멘트=1:4)을 선정 후 해당 배합 비로 시멘트 페이스트를 제작하여 소켓 하부의 이온교환막을 보호하였다. 상세한 제조과정은 기존의 문헌에 제시되어 있으며(Lee and Kwon 2021), Hg/HgO 전극을 사용하여 1 M의 NaOH 수용액을 작동 용액으로 사용하였다. Fig. 2에서는 제작된 센서의 제작 과정과 초기 영점조정과정을 나타내었다.

2.2.2 Half Cell Potential 측정

HCP 측정은 OCP 측정 방법의 일부로서 전극간의 전위를 측정하는 것이 아니라, 콘크리트 모재와 매립된 철근의 전위를 평가하는 방법이다. Linear Polarization과 같이 철근의 부식전위 및 전류를 정량적으로 평가할 수는 없지만, 부식가능성을 정성적으로 평가한다. 또한 우수한 현장적용성과 명확한 부식발생확률 기준을 가지고 있으므로 많은 연구에서 사용되고 있다.

철근 부식 개시시기 평가를 위해 많이 사용되는 반 전위 측정 방법은 철근과 조합전극을 도선으로 전압계의 단자에 접속하고 콘크리트 표면에서 철근의 위치 따라 조합전극을 이동시켜 다수의



(a) Fabrication process of OCP sensor



(b) Photos for agar-based sensor and calibration

Fig. 2. Fabrication process and the related photos for OCP measurement

Table 1. Corrosion condition related to half-cell potential (ASTM C876)

Corrosion potential(E_{corr}) values		Corrosion probability (%)
(mV vs. SCE [*])	(mV vs. CSE ^{**})	
$E_{corr} > -125$	$E_{corr} > -200$	10 (low risk of corrosion)
$-126 \leq E_{corr} \leq -275$	$-200 \leq E_{corr} \leq -350$	Intermediate
$E_{corr} < -276$	$E_{corr} < -350$	90 (high risk of corrosion)
$E_{corr} < -426$	$E_{corr} < -500$	Severe corrosion

*Ag/AgCl, **Cu/CuSO₄ half cell

점에서 철근의 전위를 측정한다. Table 1에 ASTM C 876의 HCP 결과 기반 부식평가 기준을 나타내었다.

3. OCP 및 HCP 측정을 위한 RC 시편 제작 및 촉진 부식 시험 방법

3.1 시편제작 및 사용재료

3.1.1 RC 시편의 제작

RC 시편을 대상으로 한 6개월간의 장기 부식 모니터링 실험을

위하여 300 mm × 200 mm × 130 mm의 직육면체형 몰드를 제작하였다. 시편 제작 시 3수준의 피복 두께(30 mm, 45 mm, 60 mm)를 고려하였으며, 철근 중앙부에 부식을 유도하기 위해 중앙부 250 mm를 제외한 나머지 철근을 에폭시로 코팅하였다. OCP를 측정하기 위해서 매립된 철근과 10 mm 간격을 두고 SUS mesh를 설치하였으며, 같은 거리에 소켓형 agar 센서를 설치하였다. WE (Working Electrode)로 작용하는 철근과 CE(Counter Electrode)로 작용하는 SUS mesh에 전선을 결속하고 납땀과 에폭시 코팅을 하였으며, 콘크리트 타설 후 시험체 외부에서 전극을 연결할 수 있도록 제작하였다. Fig. 3에서는 몰드의 전경 및 내부 결선 상태를 나타내었다.

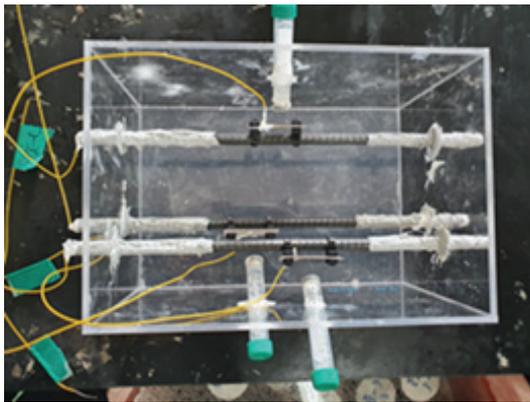


Fig. 3. RC samples and wire connection for OCP measurement (Lee and Kwon 2021)

3.1.2 콘크리트 배합 및 사용 재료

RC 시편 제작을 위해 OPC(Ordinary portland cement) 시멘트를 사용하였으며, 공기량 4.5 %, 물-시멘트 비(W/C: Water-Cement ratio) 0.4~0.6, 슬럼프 600 mm를 고려한 콘크리트 배합을 수행하였다. Table 2에서는 콘크리트 배합표를, Table 3 및 Table 4에서는 시멘트의 특성과 골재의 특성을 나타내었다. 본 연구에서 사용한 콘크리트 배합은 목표 공기량 4.5 %, 슬럼프 600 mm를 만족하였다. 또한 설계강도는 30 MPa(W/C: 0.4), 24 MPa(W/C: 0.5), 21 MPa(W/C: 0.6)으로 설계되었으며 이를 만족하였다.

Table 2. Mix proportions for the test (Lee and Kwon 2021)

No.	W/C	Unit weight (kg/m ³)				
		Water	Cement	Sand	Gravel	Admixtures
1	0.4	180	450	712	966	3.15
2	0.5	180	360	779	974	2.52
3	0.6	180	300	837	966	2.10

Table 3. Chemical and physical properties of OPC (Lee and Kwon 2021)

Chemical compositions (%)							Physical properties	
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Ig. loss	Specific gravity	Blaine (cm ² /g)
21.96	5.27	3.44	63.41	2.13	1.96	0.79	3.16	3,214

Table 4. Physical properties of fine and coarse aggregates (Lee and Kwon 2021)

Types	Items	G _{max} (mm)	Specific gravity	Absorption (%)	F.M.
Sand		-	2.58	1.01	2.90
Gravel		20.00	2.64	0.82	6.87

F.M : Fineness Modulus

3.2 부식 촉진을 위한 상부 주입 염수의 건조습윤 반복 시험 및 OCP/HCP 측정 주기

내부 철근의 부식을 촉진 시키고자 3 수준의 염화물 이온 농도 (0.0 %, 3.5 %, and 7.0 % of wt.)를 고려한 염수를 상부로 주입 후 존치시켜 염화물 이온의 1방향 침투를 유도하였다. 콘크리트 시편의 초기 성능 발현을 통한 장기적인 모니터링을 위하여 콘크리트 타설 후 4주의 기건 양생을 거친 후 상부 염수의 건조 반복을 시작하였다. 인공 염수를 2주간 상부에 존치시킨 후 제거한 뒤, 이후 습윤 상태의 OCP/HCP를 동시에 측정하였다. 이후 2주간 건조 상태를 유지시킨 후 OCP/HCP를 측정하였다. 염수 존치 상태에서의 2주(습윤), 염수 제거 상태에서의 2주(건조)를 1 Cycle로 하여 총 2 Cycle(8주)을 진행하였다. 초기 8주간의 건조반복을 진행한 이후부터는 측정 Cycle을 변화시켰는데 6주간의 염수 존치 후 습윤 상태의 OCP 및 HCP를 측정한 후 2주간의 건조 상태를 유지 후 두 값을 측정하는 것을 1 Cycle로 설정하여 이를 반복 수행하였다.

OCP 측정 시 1 M의 NaOH 수용액을 매개체로 활용하였으며, 정전위 측정 장치(Potentiostat: VERSASTAT3, AMTEK)를 사용하였다. 부식 발생 대상인 철근을 부식전극(WE)으로, SUS mesh를 대응 전극(CE)으로, 소켓의 외부에서 삽입하는 Hg/HgO를 기준 전극(RE)으로 활용하여 OCP를 측정하였다. HCP는 전용 측정 장비(Profometer, proceq)를 사용하여 측정하였으며, 철근위치에서 콘크리트 표면 3개소를 측정하여 그 평균값을 사용하였다. Fig. 4에서 OCP 및 HCP의 측정사진을 나타내었다.



(a) OCP measurement



(b) HCP measurement

Fig. 4. The plots for OCP and HCP measurement

4. 부식 촉진 기간에 따른 OCP 및 HCP의 변화 거동 분석

4.1 촉진 부식 기간에 따른 OCP 및 HCP 평가

Fig. 5~7에서는 물-시멘트 비에 따른 OCP와 HCP의 측정결과를 나타내었다. 아래의 그래프들에서 점선은 OCP 데이터를, 실선은 HCP 데이터를 의미한다. 물-시멘트 비의 증가, 염화물 이온농도의 증가, 재령의 증가에 따라 부식전위는 감소하므로 부식 가능성(corrosion feasibility)이 증가하였다. 또한 시간의 증가에 따라 지속적으로 상부로 부터의 염화물 침투가 증가하고 수분이 유입됨에도 측정값이 일부 증가하는 이유는 1) 부분적인 포화도의 감소, 2) 표면에 발생된 부식 생성물에 따른 전위 값 개선, 3) 측정시의 온도 변화 등으로 분석할 수 있다.

초기 측정 시 국부적인 환경에 따른 영향으로 초기 값의 변화가 크게 발생하였다. 초기 값을 “0”으로 설정하고 HCP 및 OCP의 변화량을 고려하여 누적 값을 고려하면 좀 더 명확한 부식 경향을 분석할 수 있다. 먼저 초기 값을 “0”으로 설정하여 변화량을 고려한 후 조건별 모든 기간에서의 변화량의 합을 고려하여 HCP 및

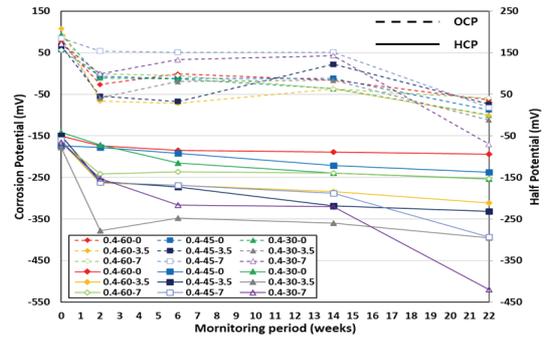


Fig. 5. Measured OCP and HCP with period (W/C 0.4)

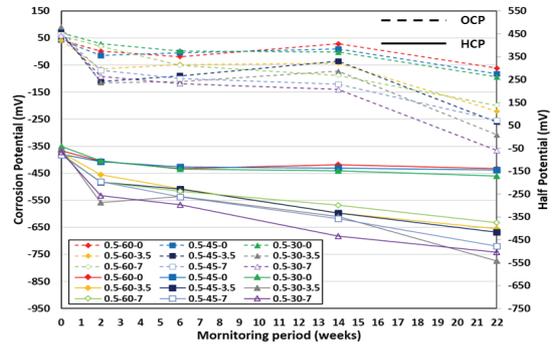


Fig. 6. Measured OCP and HCP with period (W/C 0.5)

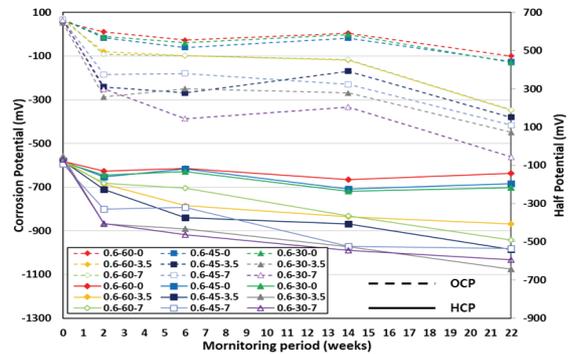


Fig. 7. Measured OCP and HCP with period (W/C 0.6)

OCP 거동을 평가한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 모든 경우에서 상부 주입 염수의 염화물 농도가 증가할수록, 피복 두께가 낮을수록 높은 HCP 및 OCP 값이 평가되었는데, HCP 경우 뚜렷한 선형성을 확인 할 수 있었다.

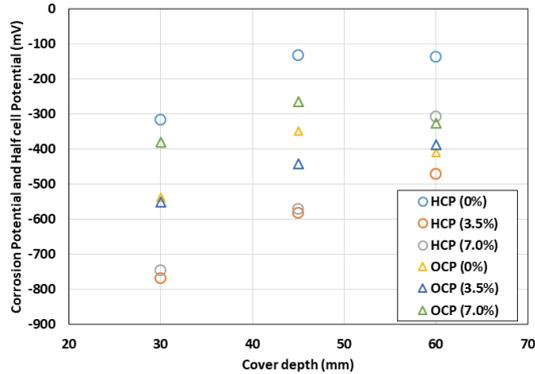
OCP의 경우 철근이 부식이 발생된 순간까지는 전압의 변화를 측정할 수 있으나, 부식이 진행된 후 오히려 전위 값이 증가하는 경향이 발생할 수 있는데, 표면의 산화물이 부식발생을 일부 억제하기 때문이다. 물-시멘트 비가 0.4인 경우, HCP 및 OCP의 최소 값은 -769 mV 및 -552 mV로 평가되었다. 물-시멘트 비가 증가할수록 부식 경향은 명확하게 평가되었는데, 0.5인 경우, HCP에서

는 -1227 mV로, OCP에서는 -970 mV로 최소 값이 평가되었다. 물-시멘트 비 0.6에서는 전체적으로 결과 값이 모두 감소하였는데, -1794 mV 및 -1793 mV로 HCP와 OCP에서 최소 값이 평가되었다. 또한 염화물 농도 3.5 % 이상에서는 큰 경향 차이가 발생하지 않았다. 또한 Fig. 8에서 각 물-결합재 비 및 염수 농도 조건에서 3 수준의 피복 두께에 의해 평가된 조건별 3개의 HCP 및 OCP 값의 합을 염화물 농도 및 피복 두께에 대하여 도시하면 Fig. 9와

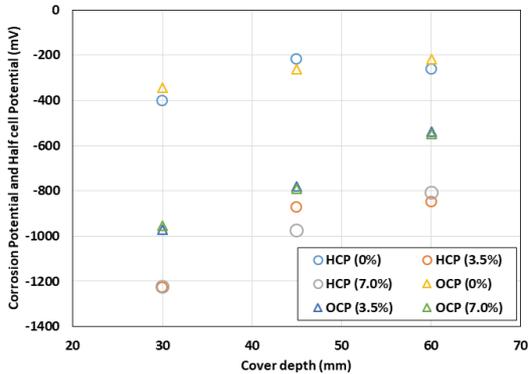
같다. 물-시멘트 비 및 피복 두께에 대한 HCP 및 OCP는 모두 선형으로 평가되었다.

4.2 온도 특성에 따른 부식전위의 변화 거동 분석

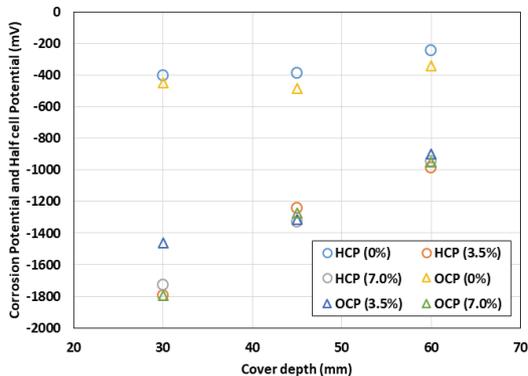
일반적으로 온도가 증가할수록 RC 구조 내부 철근의 부식전위 값이 감소하는데, 이는 아레니우스법칙에 근거한 분자 이동에 근거한다. 염화물 이온의 온도의존성 확산에 대해서는 많은 연구가 진행되어 있는데, 지수함수 형태로 모델링하여 확산계수의 온도의존성을 정량화하고 있다(Dhir et al. 1993; Matsumura et al. 2008; So et al. 2014). 그러나 콘크리트 내부 철근의 부식발생에 대해서는 pH, 이온의 해리 등 많은 고려사항이 있으므로 정량적인 모델이 없는 상태이며, 본 연구에서는 실험적으로 온도의 증가에 따른 부식전류 및 전위의 증가를 평가하였다(Park and So 2016). 22주간 모니터링 기간 중 측정 시점(총 5회)의 온도는 21 °C, 26 °C, 19.5 °C, 13 °C, 3.5 °C로 관측되었다. Fig. 5~7에 따르면 4회와 5회차의 측정에서 HCP 및 OCP 값들의 급격한 기울기가 평가되지 않았는데, 이는 온도가 낮아짐에 따라 부식전위가 일부 상승한 것



(a) W/C 0.4

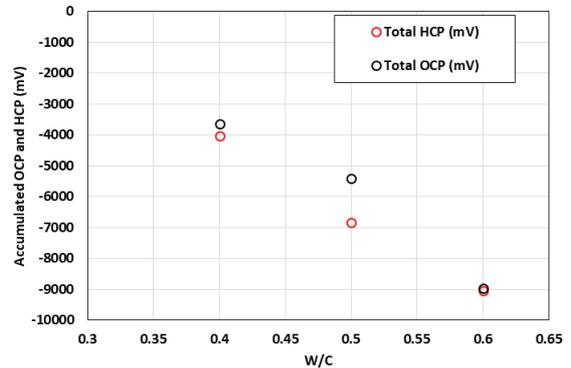


(b) W/C 0.5

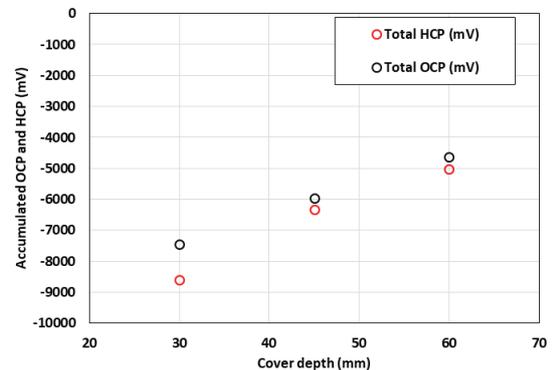


(c) W/C 0.6

Fig. 8. The results of HCP and OCP with adjustment of initial data



(a) Potentials with W/C ratios for 22 weeks



(b) Potentials with cover depth for 22 weeks

Fig. 9. Total HCP and OCP with w/c and cover depth

으로 평가된다. 추후 동일한 조건에서 온도만 변화시켜서 추가적인 실험을 할 필요가 있다.

OCP의 경우 콘크리트 내부에 결선된 철근(WE)과 SUS(RE)에 대한 전위를 직접 측정하고 소켓전극의 매질을 NaOH를 액상으로 사용하므로 더욱 온도에 민감할 것으로 사료된다. 기존의 연구에서도 반고체형 MnO₂ 센서를 통한 전위 값 보다 액상형 매질을 사용한 경우, 온도에 따른 부식전위 거동이 크게 변화함을 알 수 있다 (KIBSE 2020).

4.3 부식 조건에 따른 OCP 및 HCP의 관계식 도출

HCP 및 OCP의 관계를 도출하기 위해 결과 값을 HCP로, 영향 인자를 OCP, 물-시멘트 비, 피복 두께, 상부 주입 염수의 염화물 농도, 측정기간, 온도로 정의하여 회귀분석을 수행하였다. 각 입력 값 간의 편차가 크므로 각 입력범위의 최대 값 및 최소 값을 통하여 각 인자를 정규화 하였다. 다중회귀분석을 통하여 도출된 결과는 Table 5에 나타내었다. Table 5에서 첨자 n은 입력 값 중 최대 값으로 나누어진 값을 의미하며 변수 A에 대해 정규화된 A_n은 Eq. (7)과 같다.

각 인자의 영향도는 촉진 부식 기간과 염화물 농도에서 비교적 크게 평가되었는데, 비례상수는 0.096~1.148 수준이었다. 물-시멘트 비 및 피복 두께는 0.076~0.089 수준의 비례상수를 갖고 있으며, 상대적으로 낮은 영향을 나타내었다. Table 5에서는 온도를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 회귀분석 결과를 나타내었으며, 온도를 고려한 경우, 상관계수는 0.932에서 0.934로, 결정

Table 5. Results of multiple regression analysis for HCP

$$HCP_n = C + X_1(WC_n) + X_2(CD_n) + X_3(Cl_n) + X_4(P_n) + X_5(OPC_n) + X_6(T_n)$$

Parameter	W/O temp.	With temp.
C	-0.07514	0.046131
X ₁	-0.07927	-0.08879
X ₂	0.076797	0.079753
X ₃	-0.11474	-0.11838
X ₄	-0.09583	-0.15616
X ₅	1.147748	1.101971
X ₆	-	-0.10426
Correlation factor	0.932	0.934
Determination const.	0.869	0.872

HCP_n: Normalized HCP, W/C_n: Normalized water to cement ratio, CD_n: Normalized cover depth, Cl_n: Normalized chloride concentration of artificial brine, P_n: Normalized test period, OPC_n: Normalized OCP, T_n: Normalized temperature

계수는 0.869에서 0.872로 관계성이 향상되었다. 또한 회귀분석에 의해 예측된 HCP 값과 부식 모니터링을 통해 측정된 HCP 값을 비교 분석 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 물-결합재 비가 낮고 상부 주입 염수의 농도가 낮을수록 평가 및 예측된 HCP가 높은 값을 나타내어 0.7이상의 구간에 밀집되는 경향을 나타내었으며 부식 발생에 용이한 영향 인자를 갖는 조건에서는 HCP 값이 크게 감소하여 낮은 구간에 HCP 값이 평가되었다. 또한 본 연구의 회귀분석 결과는 초기 모니터링 결과가 다수를 차지하고 있기에 HCP 값이 높은 구간에서 밀집되어있는 것으로 사료된다.

$$A_n = \frac{|A_{act} - A_i|}{A_{max} - A_i} \tag{7}$$

여기서, A_{act}는 시료값, A_i 초기값으로 조정된 0, A_{max}는 변수 값중 최대값을 의미한다.

5. 결론

본 연구에서는 약 6개월간의 촉진 염해 조건에 노출된 RC 시편을 대상으로 피복 두께, 상부 주입 염수의 염화물 농도, 물-시멘트 비를 고려하여 HCP 및 OCP를 측정하였으며, 온도의 영향을 고려하여 상관성을 분석하였다. 본 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 물-시멘트 비 및 상부 주입 염수의 염화물 이온 농도가 증가할수록 그리고 피복 두께가 낮을수록 HCP 및 OCP 값은 감소하였다. 물-시멘트 비 0.4인 경우, 평균 HCP 및 OCP의 최소 값은 -769 mV 및 552 mV로 평가되었다. 0.5인 경우, HCP에서는 -

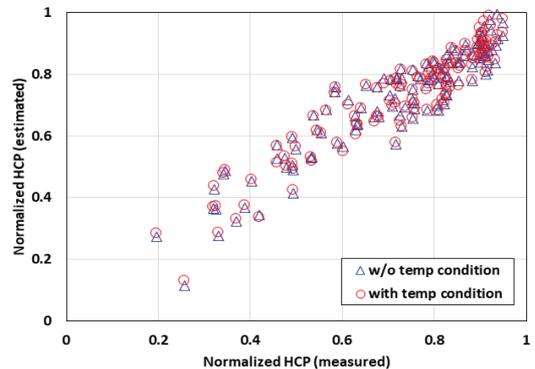


Fig. 10. Relationship between HCP and OCP with temperature conditions

- 1227 mV로, OCP에서는 -980 mV로, 0.6에서는 -1794 mV 및 -1793 mV로 HCP과 OCP가 감소하였다.
2. 초기 값을 조정된 후 동일 조건의 시험 값을 누적하여 HCP 및 OCP를 분석한 결과, 피복 두께의 증가에 따라 부식 저항성이 선형적으로 개선되었으며, 해당 HCP 및 OCP의 누적 변화는 염화물 농도에 상관없이 물-시멘트 비 및 피복 두께에 따라 선형적으로 변화하였다. 온도변화에 따라 OCP는 HCP보다 민감하게 변화하였는데, 이는 액상 매질인 NaOH이 실외에 노출되어 더욱 민감한 것이 원인으로 판단된다.
 3. 부식 인자를 고려한 다중회귀분석을 수행한 결과 HCP과 OCP는 밀접한 관련성을 보이고 있으며, 온도를 고려할 경우, 두 상관성이 약간 높아짐을 알 수 있었다. 또한 존치기간 및 염화물 농도의 영향이 물-시멘트 비 및 피복 두께보다 비교적 크게 평가되었다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 정부의 지원으로 한국연구재단 중견연구자지원사업의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다(NRF-2020R1A2C2009462).

References

Alonso, C., Andrade, C., González, J.A. (1988). Relation between resistivity and corrosion rate of reinforcements in carbonated mortar made with several cement types, *Cement and Concrete Research*, **18(5)**, 687–698.

Adams, R.D., Cawley, P. (1989). Defect types and non destructive testing techniques for composites and bonded joints, *Construction and Building Materials*, **3(4)**, 170–183.

Andrade, C., Alonso, C. (1996). Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site, *Construction and Building Materials*, **10(5)**, 315–328.

Broomfield, J.P. (1997). *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair*, E&FN, London, 1–15.

Baek, S.H., Xue, W., Feng, M.Q., Kwon, S.J. (2012). Nondestructive corrosion detection in RC through integrated heat induction and

IR thermography, *Journal of Non Destructive Evaluation*, **31(2)**, 181–190.

Chung, L., Kim, J.H.J., Yi, S.T. (2008). Bond strength prediction for reinforced concrete members with highly corroded reinforcing bars, *Cement and Concrete Composites*, **30(7)**, 603–611.

Dhir, R.K., Jones, M.R., Elghaly, A.E. (1993). PFA concrete: exposure temperature effects on chloride diffusion, *Cement and Concrete Research*, **23(5)**, 1105–1114.

Duffó, G.S., Farina, S.B., Giordano, C.M. (2009). Characterization of solid embeddable reference electrodes for corrosion monitoring in reinforced concrete structures, *Electrochimica Acta*, **54(3)**, 1010–1020.

Li, F., Yuan, Y., Li, C.Q. (2011). Corrosion propagation of prestressing steel strands in concrete subject to chloride attack, *Construction and Building Materials*, **25(10)**, 3878–3885.

Ishida, T., Iqbal, P.O., Anh, H.T.L. (2009). Modeling of chloride diffusivity coupled with non-linear binding capacity in sound and cracked concrete, *Cement and Concrete Research*, **39(10)**, 913–923.

Kwon, S.J., Na, U.J., Park, S.S., Jung, S.H. (2009). Service life prediction of concrete wharves with early-aged crack: probabilistic approach for chloride diffusion, *Structural Safety*, **31(1)**, 75–83.

Kim, Y.Y., Kim, J.M., Bang, J.W., Kwon, S.J. (2014). Effect of cover depth, w/c ratio, and crack width on half cell potential in cracked concrete exposed to salt sprayed condition, *Construction and Building Materials*, **54(15)**, 636–645.

Karthick, S.P., Muralidharan, S., Saraswathy, V., Thangavel, K. (2014). Long-term relative performance of embedded sensor and surface mounted electrode for corrosion monitoring of steel in concrete structures, *Sensor and Actuators B: Chemical*, **192**, 303–309.

Karthick, S.P., Kwon, S.J., Lee, H.S., Muralidharan, S., Saraswathy, V., Natarajan, R. (2017). Fabrication and evaluation of a highly durable and reliable chloride monitoring sensor for civil infrastructure, *RSC advances*, **7(50)**, 31252–31263.

KIBSE. (2020). Investigation and Monitoring Academic Service for Inner Ring Road PSC Box Girder Bridge Tendon – Final Report, Korean Institute of Bridge and Structural Engineers, Seoul [in Korean].

Lee, S.K., Zielske, J. (2014). An FHWA special study: post-tensioning tendon grout chloride thresholds, Federal Highway Administration, FHWA-HRT-14-039.

Lee, S.S., Kwon, S.J. (2021). Characteristics of OCP of reinforced

- concrete using socket-type electrodes during periodic salt damage test, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, **25(4)**, 28–36 [in Korean].
- Maierhofer, C., Arndt, R., Röllig, M., Rieck, C., Walther, A., Scheel, H., Hillemeier, B. (2006). Application of impulse-thermography for nondestructive assessment of concrete structures, *Cement and Concrete Composites*, **28(4)**, 393–401.
- Matsumura, T., Shirai, K., Saegusa, T. (2008). Verification method for durability of reinforced concrete structures subjected to salt attack under high temperature conditions, *Nuclear Engineering and Design*, **238(5)**, 1181–1188.
- Maekawa, K., Ishida, T., Kishi, T. (2009). *Multi-Scale Modeling of Structural Performance*, Taylor Fr, London, 322–325.
- Perme, S., Lau, K., Lasa, I., Paredes, M. (2015). “Material and corrosion evaluation of deficient PT grout with enhanced sulfate concentrations,” *NACE Corrosion 2015*, NACE CORROSION, Houston, TX, USA, 5828.
- Park, S.S., So, B.T. (2016). A study on correlation between accelerated corrosion test and long-term exposure test according to the temperature condition, *Journal of Recycled Construction Resources*, **4(2)**, 203–208 [in Korean].
- Song, H.W., Saraswathy, V. (2006). Studies on the corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground granulated blast-furnace slag—an overview, *Journal of Hazardous Materials*, **138(2)**, 226–233.
- Shao, X.M., Feldman, J.L. (2007). Micro-agar salt bridge in patch-clamp electrode holder stabilizes electrode potentials, *Journal of Neuroscience Methods*, **159(1)**, 108–115.
- So, H.S., Choi, S.H., Seo, C.S., Seo, K.S., So, S.Y. (2014). Influence of temperature on chloride ion diffusion of concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **26(1)**, 71–78 [in Korean].
- Thomas, M.D., Bamforth, P.B. (1999). Modelling chloride diffusion in concrete: effect of fly ash and slag, *Cement and Concrete Research*, **29(4)**, 487–495.
- Tsai, Y.H., Wang, J., Chien, W.T., Wei, C.Y., Wang, X., Hsieh, S.H. (2019). A BIM-based approach for predicting corrosion under insulation, *Automation in Construction*, **107**, 102923.
- Win, P.P., Watanabe, M., Machida, A. (2004). Penetration profile of chloride ion in cracked reinforced concrete, *Cement and Concrete Research*, **34(7)**, 1073–1079.
- Yoon, Y.S., Ryu, H.S., Lim, H.S., Koh, K.T., Kim, J.S., Kwon, S.J. (2018). Effect of grout conditions and tendon location on corrosion pattern in PS tendon in grout, *Construction and Building Materials*, **186**, 1005–1015.
- Yang, K.H., Lim, H.S., Kwon, S.J., Kim, J.H. (2020). Repair cost estimation techniques for reinforced concrete structures located at the seashore: Considering various probabilistic service life functions and actual mix proportions, *Construction and Building Materials*, **256**, 119469.

온도영향을 고려한 RC 구조의 반 전위 및 OCP의 상관성 분석

콘크리트 내의 부식전위는 노출환경 및 배합에 따라 크게 변화한다. 본 연구에서는 피복 두께, 염화물 농도, 물-시멘트 비를 변수로 하여 RC 시편을 제조하였으며, 철근과 표면과의 전위차를 평가하는 HCP 측정을 수행하였다. 또한 매립된 철근과 상대전극을 이용하여 OCP의 측정하였다. 한천과 NaOH 수용액을 이온교환물질로, Hg/HgO를 기준전극으로 사용하여 OCP를 측정하였는데, HCP에 비하여 온도에 더욱 민감하게 작용하였다. 영향 인자 중 존치 기간 및 염화물 농도는 피복 두께 및 물-시멘트 비보다 상대적으로 큰 영향을 가지고 있었다. 또한 전체 측정된 HCP 및 OCP는 피복 두께 및 물-시멘트와 뚜렷한 선형관계를 나타내었다. 다중회귀분석을 통하여 HCP와 OCP의 관계를 정량화하였으며 온도를 고려하여 개선된 상관성을 도출하였다.