

주기적 염해 시험에 따른 소켓 타입 전극을 활용한 철근 콘크리트의 OCP 특성

이상석¹, 권성준^{2*}

Characteristics of OCP of Reinforced Concrete Using Socket-type Electrodes during Periodic Salt Damage Test

Sang-Seok Lee¹, Seung-Jun Kwon^{2*}

Abstract: It is known that buried rebars inside concrete structures are protected from corrosion due to passive layer. It is very important to delay the timing of corrosion or evaluate a detection of corrosion initiation for the purpose of cost-beneficiary service life of a structure. In this study, corrosion monitoring was performed on concrete specimens considering 3 levels of cover depth(60 mm, 45 mm, and 30 mm), W/C(water to cement) ratio(40.0%, 50.0%, and 60.0%) and chloride concentration(0.0%, 3.5%, and 7.0%). OCP(Open Circuit Potential) was measured using agar-based socket type sensors. The OCP measurement showed the consistent behavior where the potential was reduced in wet conditions and it was partially recovered in dry conditions. In the case of 30 mm of cover depth for most W/C ratio cases, the lowest OCP value was measured and rapid OCP recovery was evaluated in increasing cover depth from 30 mm to 45 mm, since cover depth was an effective protection against chloride ion ingress. As the chloride concentration increased, the effect on the cover depth tended to be more dominant than the that of W/C ratio. After additional monitoring and physical evaluation of chloride concentration after specimen dismantling, the proposed system can be improved with increasing reliability of the corrosion monitoring.

Keywords: OCP(Open Circuit Potential), Corrosion monitoring, Agar sensor, Cover depth, W/C, Chloride concentration

1. 서 론

1930년대부터 RC(Reinforced Concrete) 구조물 내 강재 부식에 대한 연구가 활발히 수행되어왔다. 콘크리트 내부의 철근은 부동태 피막으로 보호되고 있으며, 부동태 피막으로 인해 철근은 부식으로부터 보호된다고 알려져 있다. 그러나 외부로부터의 염화물 이온의 침투, 황산염 이온에 의한 산화, 탄산화에 따른 pH 저감 등으로 내부의 매립된 철근은 부식이 발생하게 된다(Jang, 2003; Broomfield, 1997). RC(Reinforced Concrete) 부재 내의 철근은 인장력에 주로 저항하며, 부식이 발생할 경우, 3.0%~5.0%의 부식량 수준까지는 오히려 부착력이 철근의 팽창압으로 인해 증가하게 된다(Chung et al., 2008; Dinakar et al., 2007). 임계 부식량을 초과할 경우, 슬립이 발생하여 구조체로서 하중을 지지할 수 없으므로 부식 발생 시기를 지연시키거나 초기 부식 시점을 평가하는 것은 매

우 중요하다.

다공질 매체인 콘크리트의 부식 제어 및 발생 기구에 대해서는 염해 및 탄산화에 대하여 많은 연구가 진행되어 왔다(Johannesson and Utgenannt, 2001; Steffens et al., 2002; Arya et al., 1990). 또한 최근 들어 내구성능과 관련된 철근 부식에 대한 중요성이 커지면서 부식의 모니터링 또는 부식 개시 평가(Corrosion Detection)에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

일반적으로 이러한 기법은 비정상 상태에서의 저항을 이용한 측정(비저항 측정, 분극저항 측정, 임피던스 측정)방법이 사용되고 있으며(Lopez and Gonzalez, 1993; Naish et al., 1990; Lim, 2012; Alonso et al., 1988; Song and Saraswathy, 2006), 적외선 열화상을 이용한 부식 감지 또는 반전위 측정을 이용한 부식 조건 평가 등 다양한 방법으로 평가되고 있다(ASTM C879-09., 2009; Kwon and Park, 2012; Beak et al., 2012).

구조물의 시공과 함께 설치되는 부식 모니터링 센서의 경우 준공 초기부터 부식 전위 또는 부식 전류를 측정하여 좀 더 정량적인 부식 환경에 대한 평가가 가능하다. 이러한 센서는 특정 매질을 가진 기준 전극(RE: Reference electrode), 부식 전극(WE: Working electrode), 대극 전극(CE: Counter electrode) 간의 전위차를 이용하여 시멘트 기반 재료 내부의 철근 또는 텐

¹정회원, 한남대학교 건설시스템공학과 석사과정

²정회원, 한남대학교 건설시스템 공학과 교수

*Corresponding author: jjuni98@hannam.ac.kr

Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea)

•본 논문에 대한 토의를 2021년 9월 30일까지 학회로 보내주시면 2021년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

던의 부식 가능성을 평가한다.

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., 2014; Karthick et al., 2017). 그러나 매립된 철근과 관련 측정 전극이 안전하다 하더라도, 매립 센서가 사용수명이 다하거나 높은 농도의 이온 침투로 인해 내부 매질이 과포화될 경우에는 처리할 수 있는 방법이 전무하다.

따라서 본 연구에서는 새로운 이온 전달 물질인 한천(Agar)을 이용하여 외부에서 매립하고 교체 및 조정이 가능한 센서를 제작하였다. 한천은 콘크리트와 같은 높은 염기 환경에서 매우 안정적인 물성을 나타내며 시멘트로부터 전극을 보호하고, 이온들을 안정적으로 투과시키는 것으로 알려져 있다. 또한 건조되었더라도 수분의 재주입을 통해 안정적으로 이온 이동이 가능한 것으로 알려져 있다(Shao and Feldman, 2007). 액상의 전달 매개 전극은 고상의 이산화망간 센서보다 민감하게 부식 전위를 평가할 수 있을 뿐 아니라, 측정 시마다 영점 조정을 할 수 있으므로 신뢰성 있는 부식 정보를 제공하게 된다. 가장 큰 장점은 내부에 부식 전극과의 결선만 되어 있으면, 센서를 외부에서 교체가 가능하다는 점이다.

본 연구에서는 새롭게 제작된 Agar 센서를 소켓 형식으로 제작하고 이를 콘크리트 철근 위치에 설치하여 축진 염해 기간의 증가에 따른 부식 전위(OCP: Open Circuit Potential)를 평가하도록 한다. 이를 위해 다양한 조건의 콘크리트와 피복 두께를 가진 시편이 제조되었으며, 3 가지 수준의 염화물 농도를 고려하여 건조/습윤 반복 실험을 수행하였다. 소켓 형식 센서에서 평가된 OCP와 염화물 농도, 그리고 콘크리트 특성을 고려하여 부식 유도 모니터링 기간에 따라 분석되었다.

2. 한천(Agar) 기반 소켓 형식 센서의 제조

2.1 소켓 제작 방법

Fig. 1(a)와 같이 직경 100 mm의 투명 아크릴을 이용하여

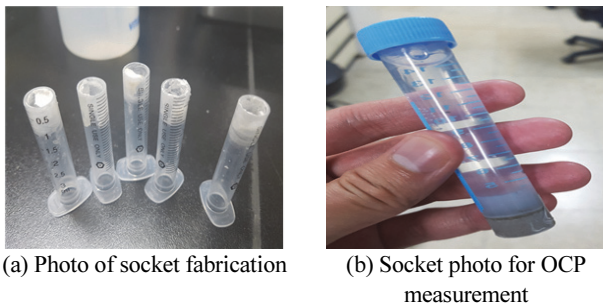
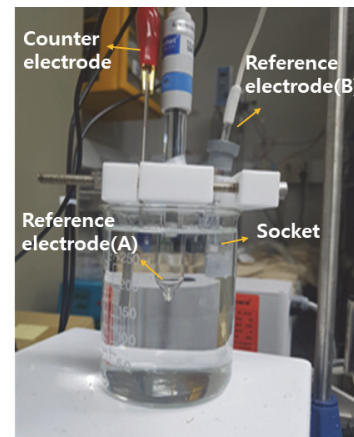


Fig. 1 Photo of socket fabrication and OCP socket

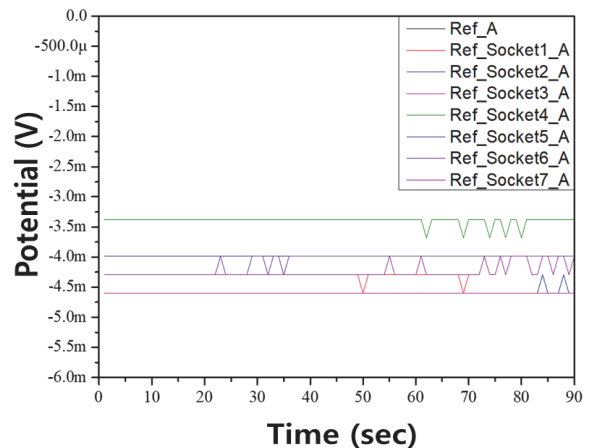
소켓을 제조하였다. 기준 전극을 삽입할 소켓 하단부에는 1 M의 KNO₃ 수용액에 한천(Agar)을 녹여 4 mm의 이온 교환막을 만들었다. 선행 연구 및 사전 실험을 통해 한천은 기존의 이산화망간으로 제작된 센서 대비 내구성능에서 큰 장점을 갖고 있다. 또한 콘크리트 타설 시 인가되는 압력으로부터 센서를 보호하기 위해 소켓 하부에 시멘트 페이스트를 부착하였다. 완성된 OCP 측정용 소켓은 Fig. 1(b)에 나타내었으며 RC 시편 제작 시 매립하여 적용하였다.

2.2 소켓의 전위차 검증

Fig. 2(a)에서는 제작된 소켓의 재현성 평가를 위한 Hg/HgO 기준 전극 사용 시 OCP(Open Circuit Potential) 측정 전경을 나타내었다. OCP는 전압이나 전류를 인가하지 않았을 때, 자연적으로 발생하는 전극 간의 전압 차이를 의미한다. 실험 방법으로는 Fig. 2(a)와 같이 부식 챔버(Chamber) 내에 소켓 타입 기준 전극과 기존의 기준 전극을 위치시킨 후, 부식 용액을 넣고 일정 시간 간격으로 OCP를 측정하였다. 부식 용액이 증



(a) Photo of OCP measurement experimental



(b) OCP measurement results for multiple sockets

Fig. 2 OCP measurement experimental and results

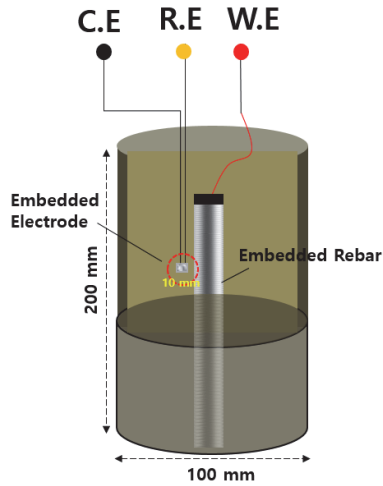


Fig. 3 Schematic diagram of embedded electrode concrete

발하면 증류수를 추가로 넣어 이온 농도와 수위를 일정하게 유지하였다. Fig. 2(b)에서는 복수의 소켓을 이용한 OCP 측정 결과를 도출하였으며, Fig. 2(b)에서 나타낸 바와 같이 소켓 간의 큰 전위 차이 없이 높은 재현성을 나타냄을 확인하였다. 또한 본 연구의 교체 가능형 전극의 경우 기존 매립형 전극의 OCP 측정값과 유사한 측정값을 보였다(Karthick et al., 2018). 그러나 Fig. 3과 같은 매립형 센서의 경우 설치 시 단선의 문제가 존재하며 장기간 동안 성능유지가 어렵다. 제안된 외부 교체형 센서의 경우, 사용기간 동안 외부에서 전극 교체가 가능하고 환경에 따른 전극의 영점 조절이 가능하므로 장기간 성능을 유지할 수 있는 장점을 가지고 있다.

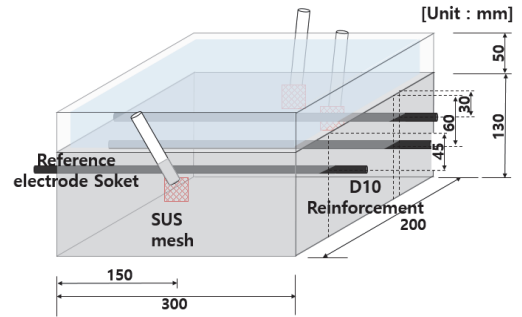
3. 사용재료 및 실험 계획

3.1 사용재료 및 배합

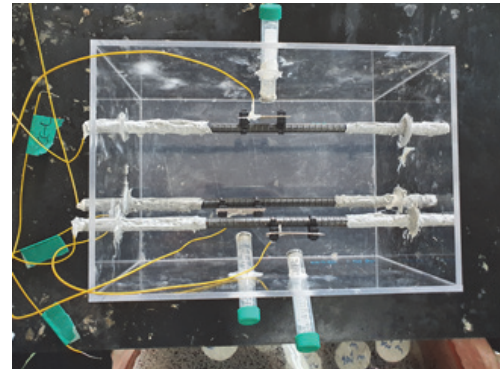
3.1.1 시험체 제작

장기 부식 모니터링 실험을 위한 콘크리트 시편을 제작하기 위해 Fig. 4(a)와 같이 300 mm × 200 mm × 130 mm의 직육면체형 몰드를 제작하였다. 피복두께의 변화에 따른 부식 거동을 평가하기 위해 3 가지 수준(30 mm, 45 mm, 60 mm)의 피복두께를 고려하였다. 또한 Fig. 4(b)와 같이 매립된 철근의 일정 부분(중앙부 150 mm)에서만 부식을 유도하기 위해 부식 유도부를 제외한 끝단 부위를 에폭시로 코팅하였다.

기준 전극 삽입을 위한 소켓을 각 철근이 매립된 위치의 측면부 중앙 지점에 설치하였다. 측정 시 기준이 될 전극 값을 얻기 위해 각 철근의 부식 유도부에서 10 mm 간격을 두고 SUS mesh(50 mm × 50 mm)를 설치하였으며 SUS mesh에 전선을 납땜 후 에폭시로 연결하여 콘크리트 타설 후 시험체 외부에서 전극을 연결할 수 있도록 제작하였다. 또한 철근 양단에서



(a) Schematic diagram of mold with embedded steel



(b) Photo of mold with socket type sensor and steel

Fig. 4 Mold schematic diagram and photo



Fig. 5 Steel with centered hole

발생하는 국부 부식(Local corrosion)을 제어하기 위해 Fig. 5와 같이 철근에 길이 방향으로 홈을 가공하여 전선을 연결 후 납땜 및 에폭시 코팅으로 고정하였다.

3.1.2 콘크리트 배합 및 사용재료

본 연구에서는 물-시멘트 비에 따른 OCP 변화를 고찰하기 위해 3 가지 수준의 물-시멘트 비(40.0%, 50.0%, 60.0%)를 고려한 콘크리트 배합을 수행하였다. 콘크리트 타설 시 기준 전극 및 소켓의 탈락을 방지하고자 고유동 콘크리트 배합을 설계하였으며 배합표는 Table 1에 나타내었다. 또한 Fig. 6에 고유동 콘크리트 타설 전경을 나타내었다. 사용된 철근은

Table 1 Mixture proportions of concrete

Mix.	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)				Admixtures
			W	C	S	G	
A	40.0	43.0	180	450	712	966	3.15
B	50.0	45.0	180	360	779	974	2.52
C	60.0	47.0	180	300	837	966	2.10

W: Water, C: Cement, S: Sand, G: Gravel

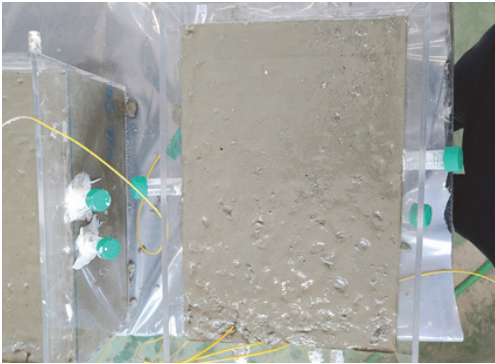


Fig. 6 Photo for high-flow concrete pouring

SD400, D10을 사용하였으며, 각 배합의 공기량 및 슬럼프는 4.5%, 180 mm으로 설계하였다.

3.2 실험방법

3.2.1 건조/습윤 염수 주입 실험 개요

장기 모니터링에 따른 RC 시편의 부식 거동을 평가하기 위해 염화물 농도, 피복두께, 물-시멘트 비를 시험 변수로 하여 부식 모니터링을 수행하였다. 철근 콘크리트 시편 상부에 존치되는 염수의 경우 3 가지 수준(0.0%, 3.5%, 7.0%)의 농도를 고려하였으며 3.1절에 나타난 바와 같이 3 가지 수준의 피복 두께 및 물-시멘트 비를 고려하였다.

첫 번째 OCP 측정은 콘크리트 타설 후 4주의 기건 양생을 거친 후 수행되었다. 이후 각 조건에 따른 염수를 2주간 주입한 후 습윤 상태의 OCP를 측정하고, 다시 2주간의 건조 상태를 유지 후 OCP를 측정하는 것을 1 Cycle로 하였다. 이와 같이 2 Cycle(8주)을 유지한 뒤, 측정 주기를 6주간의 염수 존치 후 습윤 상태의 OCP 측정 후, 2주간의 건조 후 건조 상태 OCP 측정을 1 Cycle로 변경하였다. 측정 주기에 대한 내용을 Fig. 7에 나타내었다.

3.2.2 OCP 측정 방법

본 연구에서 1 M의 NaOH 수용액을 매개체로 활용하여 OCP를 측정하였다. 정전위 측정 장치(Potentiostat: VERSASTAT3, AMTEK)를 이용하여 OCP를 측정하였으며 부식이 발생하는

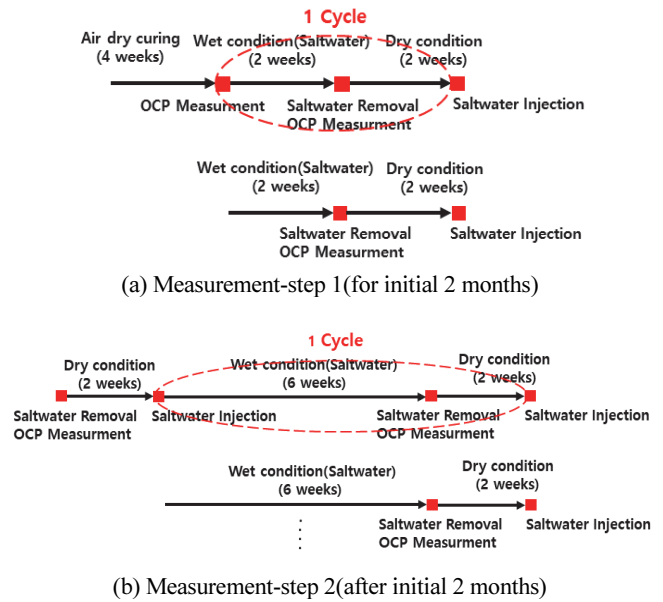
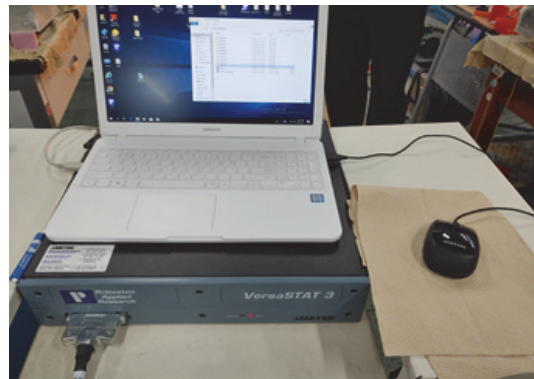
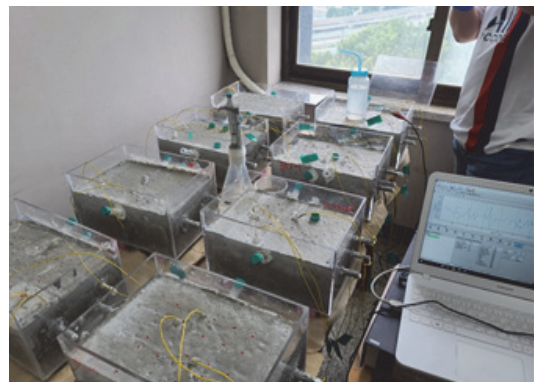


Fig. 7 OCP measurement cycle for corrosion monitoring



(a) Potentiostat: VERSASTAT3, AMTEK



(b) Photo of OCP measurement

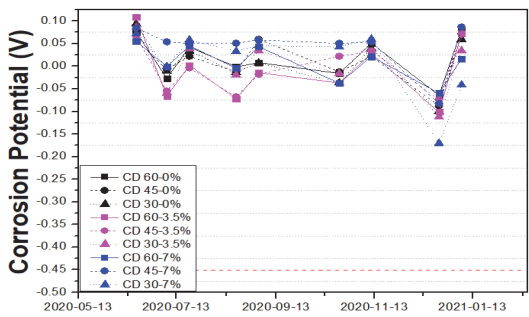
Fig. 8 Photos of measuring equipment and the test samples

대상인 철근의 부식 전위(WE)를 대용 전극(CE)으로 활용하는 SUS mesh와 기준 전극(RE)을 활용하여 측정하였다. Fig. 8에서는 정전위 측정 장치 및 OCP 측정 전경을 나타내었다.

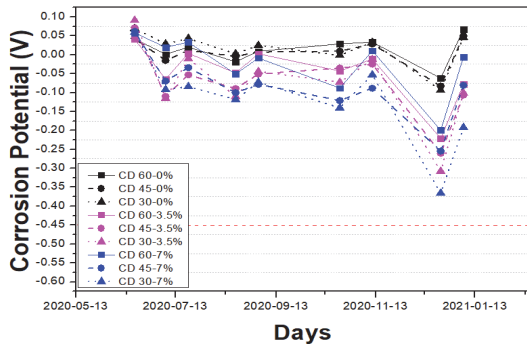
4. 노출 환경 및 배합에 따른 OCP 거동

4.1 철근 위치(피복두께)에 따른 OCP 변화

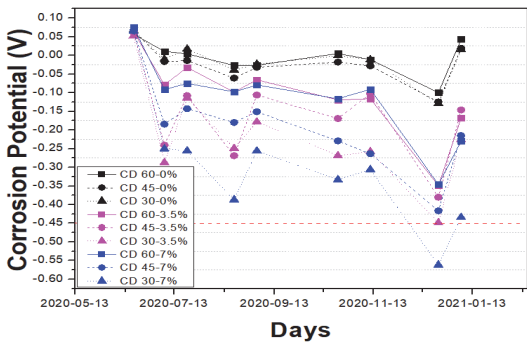
Fig. 9에서는 3 가지 수준의 염화물 농도 및 피복두께(30 mm, 45 mm, 60 mm)를 고려한 OCP 거동을 나타내었다. 피복두께가 커질수록 OCP의 변동 폭이 상대적으로 작아지는 경향을 확인할 수 있었다. 건조 조건 시에는 전류의 흐름을 제어하는 비저항이 매우 커지므로 습윤 조건에서보다 상대적으로 낮은 OCP 및 부식 전위가 측정되었다. 건조 조건에서보다 습윤 조건에서 물-시멘트 비가 높은 시편의 경우 공극 구조가 크고 자유수량이 많아 물-시멘트 비가 낮은 시편의 경우 보다 더 큰 OCP 변동성을 확인하였다. 측정 시 습윤 조건에서는 전위가



(a) W/C 40.0%



(b) W/C 50.0%

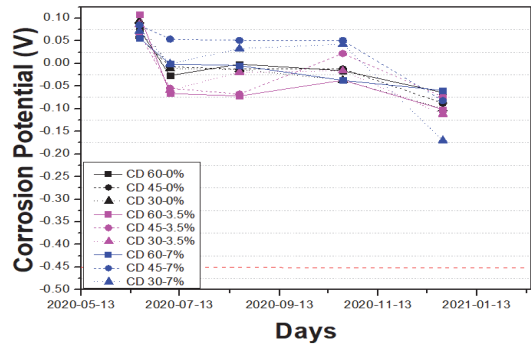


(c) W/C 60.0%

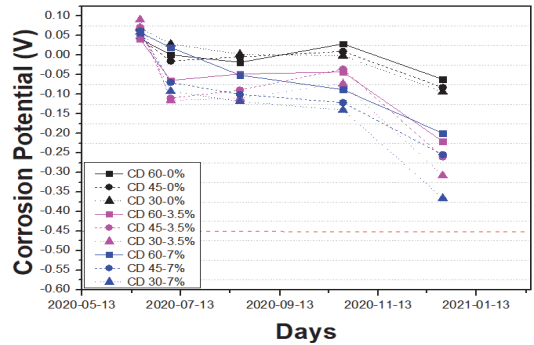
Fig. 9 OCP variation with cover depth and chloride concentration

감소하고 건조 조건에서는 감소된 전위가 회복되는 거동을 나타냈기 때문에 감소되는 거동만을 평가하고자 습윤 상태에서의 OCP 측정 결과만을 정리하여 Fig. 10에 나타내었다.

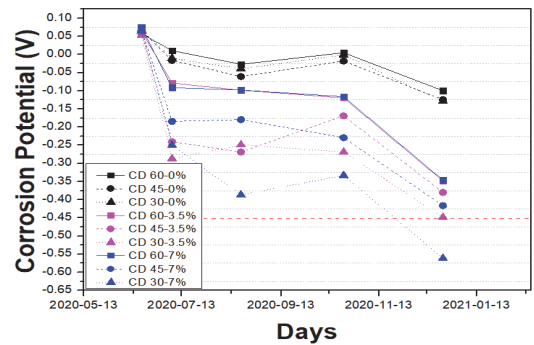
Fig. 10에서는 물-시멘트 비 40.0%, 50.0%, 60.0%에서의 피복두께를 고려한 OCP 거동을 나타내었다. 모든 물-시멘트 비의 피복두께 30 mm에서 가장 낮은 OCP가 측정되었다. Fig. 10(c)의 물-시멘트 비 60.0%의 경우 염화물 농도 0.0%에서는 안정적인 OCP 거동을 보였지만 염화물 농도 3.5%에서는 임계 부식 전위(-0.45 V)에 근접한 거동을, 염화물 농도 7.0%에서는 임계 부식 전위를 넘어서는 측정값을 보였다. 부식 모니터링 결과 물-시멘트 비가 증가함에 따라 피복두께가 작아질



(a) W/C 40.0%



(b) W/C 50.0%



(c) W/C 60.0%

Fig. 10 Wet condition OCP variation with cover depth and chloride concentration

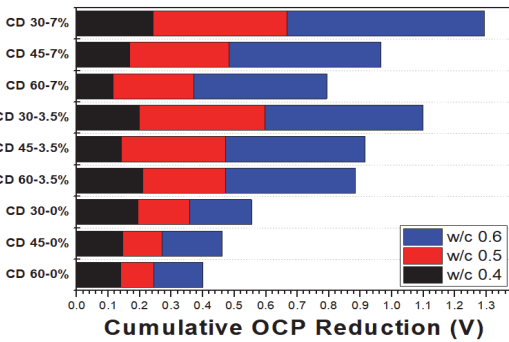


Fig. 11 OCP cumulative reduction value

수록 염화물 농도에 영향을 많이 받는 경향을 보였다.

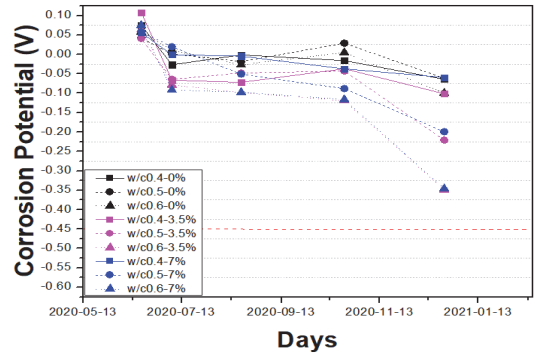
물-시멘트 비가 낮은 시편의 경우 상부에 염수가 주입된다 할지라도 안정적인 부식 모니터링 결과가 나타났으나, 물-시멘트 비가 높은 경우에는 상부 염수에 의한 영향이 뚜렷하게 측정되었다. 모든 조건에서 대체로 피복두께의 감소와 물-시멘트 비 증가로 OCP가 크게 감소하는 결과가 나타났다. 또한 물-시멘트 비가 가장 높은 조건에서는 모니터링 시작 후 9개월 만에 임계 부식 전위(-0.45 V)에 도달하는 경우가 발생하였다. 이는 물-시멘트 비가 높은 배합의 경우 공극 구조가 커지고 수화물에 의한 염화물 흡착이 적으므로 부식 가능성이 크게 평가된다. 또한 공극내의 자유수량이 많아지므로 OCP값이 크게 평가된다(Kim et al., 2014; Park et al., 2018).

Fig. 11에서는 최초 측정값에서 최종 측정값 간의 차이를 분석하여 물-시멘트 비를 기준으로 누적 OCP 누적 감소값을 나타내었다. 피복두께 30 mm 및 45 mm의 경우 염화물 농도가 증가함에 따라 OCP 누적 감소값이 크게 증가하였다. 반면 피복두께 60 mm의 경우 염화물 농도가 0.0%에서 3.5%로 증가함에 따라 OCP 감소값이 증가하였지만 염화물 농도가 7.0%로 증가했음에도 불구하고 OCP 누적 감소값은 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 피복두께 30 mm에서 염화물 농도가 증가함에 따라 2.30배의 가장 큰 증가폭을 보였지만 피복두께 60 mm의 경우 1.97배의 가장 작은 증가폭을 보였다.

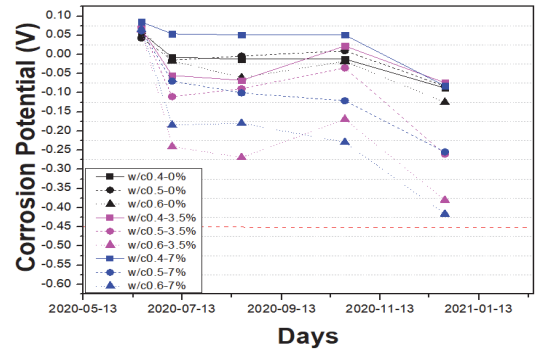
이는 피복두께가 커질수록 염화물 이온의 확산에 소요되는 시간이 증가하고 외부로부터 산소 투과가 매우 낮아지므로 내부 철근이 부식으로부터 보호되기 때문이다. 또한 표면 일부의 탄산화로 인한 pH 저감이 내부에 영향을 전혀 미치지 못하는 구간이므로 부식에 대해 안전한 조건이 된다. 피복두께가 커질수록 염화물 농도에 반비례하여 OCP 제어를 보이지만 일정 피복두께 이상이 되면 염화물 농도에 영향을 적게 받는 것을 확인할 수 있었다.

4.2 배합 조건에 따른 OCP 변화

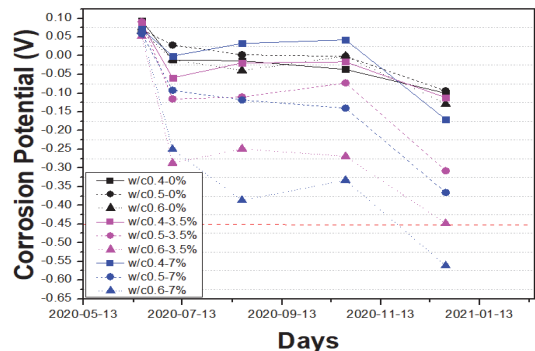
Fig. 12에서는 3 가지 수준의 염화물 농도 및 물-시멘트 비



(a) Cover depth 60 mm



(b) Cover depth 45 mm



(c) Cover depth 30 mm

Fig. 12 Wet condition OCP variation with W/C and chloride concentration

(40.0%, 50.0%, 60.0%)를 고려한 습윤 상태에서의 OCP 거동을 나타내었다. 모든 물-시멘트 비가 낮을수록 OCP 변화값이 상대적으로 작아지는데 이는 물-시멘트 비가 낮은 경우 콘크리트는 상대적으로 높은 결합재량이 확보되기 때문에 내부의 공간이 치밀하여 물질 이동성이 저하되어 피복두께의 영향을 적게 받는 것으로 사료되며 이는 기존의 연구에서도 같은 경향을 나타내었다(Nguyen, et al., 2017; Kim et al., 2007).

Fig. 12(a)에서는 피복두께 60 mm에서의 각 물-시멘트 비를 고려한 OCP 거동을 나타내었다. 염화물 농도 0.0%에서 물-시멘트 비 60.0%의 경우 가장 낮은 OCP값을 나타내었다. 물-시멘트 비 60.0%의 경우 염화물 농도 3.5% 및 7.0%에서 가장

낮은 OCP값이 측정되었다. 염화물 농도 3.5%, 7.0%의 경우 물-시멘트 비가 증가함에 따라 OCP가 지속적으로 낮게 측정되는 경향을 보였지만, 염화물 농도 0.0%의 경우 물-시멘트 비가 증가하여도 비슷한 OCP값을 보였다. 피복두께 45 mm, 30 mm에서도 피복두께 60 mm에서와 같은 경향을 보였다. Fig. 12(c)의 피복두께 30 mm의 경우에는 염화물 농도 0.0%

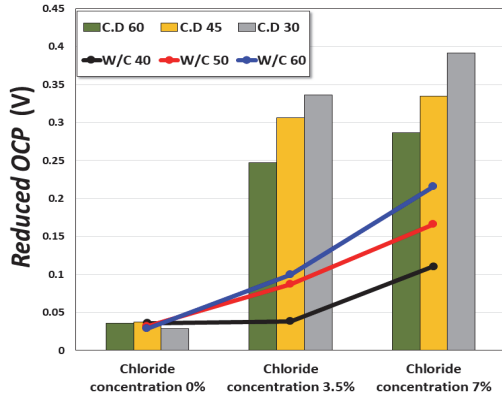
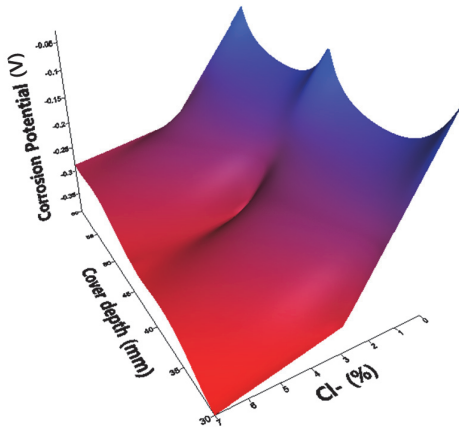
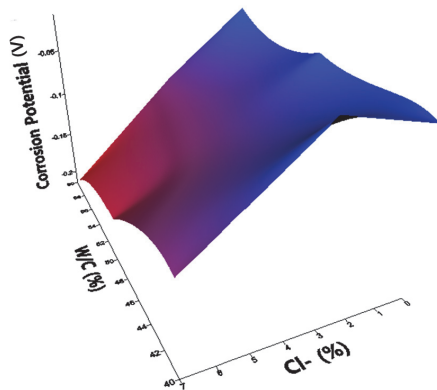


Fig. 13 Reduced OCP value for test duration



(a) Cover depth and chloride concentration contour map



(b) W/C and chloride concentration contour map

Fig. 14 Contour Map for the results of corrosion monitoring

를 제외한 모든 경우에서 임계 부식 전위까지 접근한 것을 확인할 수 있었다.

염화물의 농도가 0.0%인 경우에는 수용액 상 염소 이온이 존재하지 않아 물-시멘트비의 영향이 적은 것으로 보이고, 염화물의 농도가 낮은 경우에는 염화물 침투에 의한 부식 가능성이 낮아지므로 피복두께의 저항성이 뚜렷하게 평가되었다. 염화물 농도가 3.5%, 즉 해수 농도보다 큰 조건일 경우 높은 물-시멘트 비에서 큰 OCP 감소를 나타내었다. 국내의 지방에서는 이를 고려하여 해양 환경에 대한 콘크리트 구조물의 최대 물-결합재 비 및 최소 단위 결합재량을 제한하고 있다.

Fig. 13에서는 염화물 농도를 기준으로 각 피복두께 및 물-시멘트 비에 대한 영향을 나타내었다. Fig. 13에서 y축은 측정한 시험을 수행한 이후 종료 시에 감소된 OCP값의 차이를 나타낸다.

염화물 농도 0.0%에서는 피복두께와 물-시멘트 비가 OCP값을 약 -0.033 V 정도 감소시키는 비슷한 영향력을 나타냈다. 염화물 농도 3.5%에서는 피복두께가 평균 -0.297 V로 -0.066 V인 물-시멘트 비보다 약 4.5배 더 크게 OCP를 감소시키고, 염화물 농도 7.0%에서는 피복두께가 평균 -0.337 V로 물-시멘트 비의 평균 -0.164 V보다 약 2.1배 더 크게 OCP값을 감소시키는 것을 확인하였다. 염화물 농도가 3.5%, 7.0% 증가함에 따라 OCP는 물-시멘트 비보다 피복두께에 지배적인 영향을 받는 것으로 판단된다. 또한 같은 염화물 농도에서 OCP에 대한 영향력은 피복두께가 물-시멘트 비보다 더 지배적인 것으로 사료된다. 추가적인 모니터링 및 시편 해체 후 실제 부식량과의 상관성을 도출하여 모니터링 기법의 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 보인다.

Fig. 14에서는 각 조건과 염화물 농도에 대한 OCP의 변화를 컨투어 그래프로 도시하였다.

5. 결론

본 연구에서는 피복두께(60 mm, 45 mm, 30 mm) 및 물-시멘트 비(40.0%, 50.0%, 60.0%), 염화물 농도(0.0%, 3.5%, 7.0%) 등 총 3 가지 변수를 고려한 RC 콘크리트 구조의 장기 부식 모니터링 시스템을 구축하였다. 영향인자별로 OCP 변화 거동을 정량적으로 분석한 결론은 다음과 같다.

- 1) OCP 측정 시 습윤 조건에서는 전위가 감소하고 건조 조건에서는 감소된 전위가 회복되는 거동을 나타내었다. 물-시멘트 비 40.0%의 모든 염수 조건에서, 피복두께 30 mm의 경우 가장 낮은 OCP값을 평가하면 -0.100 V(0.0%), -0.112 V(3.5%), -0.170 V(7.0%)로 나타났다. 물-시멘트 비 50.0%의 경우 -0.094 V(0.0%), -0.308 V(3.5%), -0.366 V(7.0%)의 OCP값을, 물-시멘트 비

60.0%의 경우 -0.129 V(0.0%), -0.449 V(3.5%), -0.561 V(7.0%)로 나타났다. 물-시멘트 비 60.0%의 경우 마지막 모니터링 시점에서 일부 임계 부식 전위(-0.45 V)에 도달하였다.

- 2) 피복두께와 염화물 농도를 고려한 OCP 최대 누적 감소 값을 평가한 결과, 피복두께 30 mm와 45 mm에서는 피복두께가 커질수록 염화물 농도의 영향이 커지지만, 피복두께 60 mm에서는 이러한 영향이 상대적으로 낮게 평가되었다. 이는 피복두께가 염소 이온으로부터 효과적인 방어기구가기 때문이다.
- 3) 염화물 농도 0.0%에서는 물-시멘트 비와 피복두께가 비슷한 영향력을 염화물 농도가 증가함에 따라 물-시멘트 비의 영향보다 피복두께에 대한 영향이 더 지배적인 경향을 나타내었다. 특히 물-시멘트 비 40.0%에서보다 50.0%, 60.0%의 강도가 낮은 콘크리트에서 염화물 농도에 더욱 영향을 받았다. 이는 내부가 치밀하지 못하여 확산성이 증가하였기 때문이다. 또한 본 연구에서 사용된 시편들은 1년 경과 후 해체하여 철근 위치별 염화물 농도가 도출될 것이며, 측정된 OCP 및 철근의 부식 생성량과의 상관성이 도출될 예정이다.

감사의 글

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

References

1. Jang, S. Y. (2003), Modeling of Chloride Transport and Carbonation in Concrete and Prediction of Service Life of Concrete Structures Considering Corrosion of Steel Reinforcement, Ph. D. Dissertation, Seoul, Seoul National University, Department of Civil Engineering.
2. Broomfield, J. P. (1997), Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair, E&FN, London, 1-15.
3. Chung, L., Kim, J. H. J., and Yi, S. T. (2008), Bond Strength Prediction for Reinforced Concrete Members with Highly Corroded Reinforcing Bars, *Cement and Concrete Composites*, 30(7), 603-611.
4. Dinakar, P., Babu, K. G., and Santhanam, M. (2007), Corrosion Behaviour of Blended Cements in Low and Medium Strength Concretes, *Cement and Concrete Composites*, 29(2), 136-145.
5. Johannesson, B., and Utgenannt, P. (2001), Microstructural Changes Caused by Carbonation of Cement Mortar, *Cement and Concrete Research*, 31(6), 925-931.
6. Steffens, A., Dinkler, D., and Ahrens, H. (2002), Modeling Carbonation for Corrosion Risk Prediction of Concrete Structures, *Cement and Concrete Research*, 32(6), 935-941.

7. Arya, C., Buenfeld, N. R., and Newman, J. B. (1990), Factors Influencing Chloride-Binding in Concrete, *Cement and Concrete Research*, 20(2), 291-300.
8. Lopez, W., and Gonzalez, J. A. (1993), Influence of the Degree of Pore Saturation on the Resistivity of Concrete and the Corrosion Rate of Steel Reinforcement, *Cement and Concrete Research*, 23(2), 368-376.
9. Naish, C. C., Harker, A., and Carney, R. F. A. (1990), Concrete Inspection: Interpretation of Potential and Resistivity Measurements, *Corrosion of reinforcement in concrete*, Society of Chemical Industry, WARWICKSHIRE, 612.
10. Lim, Y. C. (2012), A Study on the Estimation of Moisture Condition of Concrete by Resistivity Method, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 28(12), 69-76.
11. Alonso, C., Andrade, C., and 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.
12. Song, H. W., and 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.
13. ASTM C876-09. (2009), Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, American Society of Testing and Materials, 1-6.
14. Kwon, S. J., and Park, S. S. (2012), Non Destructive Technique for Steel Corrosion Detection Using Heat Induction and Ir Thermography, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 16(2), 40-48.
15. Baek, S., Xue, W., Feng, M. Q., and Kwon, S. J. (2012), Nondestructive Corrosion Detection in RC Through Integrated Heat Induction and IR Thermography, *Journal of Nondestructive Evaluation*, 31(2), 181-190.
16. Karthick, S. P., Muralidharan, S., Saraswathy, V., and Thangavel, K. (2014), Long-term Relative Performance of Embedded Sensor and Surface Mounted Electrode for Corrosion Monitoring of Steel in Concrete Structures, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 192, 303-309.
17. Karthick, S., Kwon, S. J., Lee, H. S., Muralidharan, S., Saraswathy, V., and Natarajan, R. (2017), Fabrication and Evaluation of a Highly Durable and Reliable Chloride Monitoring Sensor for Civil Infrastructure, *RSC Advances*, 7(50), 31252-31263.
18. Shao, X. M., and Feldman, J. L. (2007), Micro-agar Salt Bridge in Patch-Clamp Electrode Holder Stabilizes Electrode Potentials, *Journal of neuroscience methods*, 159(1), 108-115.
19. Karthick, S., Saraswathy, V., Kwon, S. J., Lee, H. S., Rethinam, N., and Park, D. J. (2018), A Novel In-Situ Corrosion Monitoring Electrode for Reinforced Concrete Structures, *Electrochimica Acta*, 259, 1129-1144.
20. Kim, Y. Y., Kim, J. M., Bang, J. W., and 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, 636-645.
21. Park, J. S., Yoon, Y. S., and Kwon, S. J. (2018), Relations Analysis between Strength and Time-parameter in High Performance

Concrete Containing GGBFS Cured for 1 year, *Journal of Korea Concrete Institute*, 30(4), 375-381.

22. Nguyen, P. T., Bastidas-Arteaga, E., Amiri, O., and El Soueidy, C. P. (2017), An Efficient Chloride Ingress Model for Long-term Lifetime Assessment of Reinforced Concrete Structures Under Realistic Climate and Exposure Conditions, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 11(2), 199-213.
23. Kim, J. K., Cho, H. R., Kim, M. H., Kim, Y. H., and Moon, K. M.

(2007), Effect of W/C and Thickness to Corrosion Property of Reinforced Concrete, *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*, 1-6.

Received : 04/23/2021

Revised : 05/18/2021

Accepted : 06/22/2021

요 지 : 콘크리트 구조물의 내부의 매립된 철근은 부동태 피막으로 인해 부식으로부터 보호된다고 알려져 있다. 구조물의 경제적인 내구수명 산정을 위해 부식 발생 시기를 지연시키거나 초기 부식 시점을 평가하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 3 가지 수준의 피복두께(60 mm, 45 mm, 30 mm), 물-시멘트 비(40.0%, 50.0%, 60.0%), 염화물 농도(0.0%, 3.5%, 7.0%)를 고려한 콘크리트 시편을 대상으로 부식 모니터링을 수행하였는데, 한천(Agar) 기반 소켓 형식 센서를 활용하여 OCP를 측정하였다. OCP 측정 시 습윤 조건에서는 전위가 감소하고 건조 조건에서는 감소된 전위가 일부 회복하는 거동을 확인하였다. 모든 물-시멘트 비에서 피복두께가 30 mm의 경우 가장 낮은 OCP값이 측정되었으며, 피복두께가 30 mm에서 45 mm로 증가할 때 빠르게 OCP가 회복하였다. 이는 피복두께가 염화물 이온의 침투에 효과적인 방어기구로 작용하기 때문이다. 염화물 농도가 증가함에 따라 물-시멘트 비의 영향보다 피복두께에 대한 영향이 더 지배적인 경향을 보이는 것으로 도출되었다. 시편의 해체 후 추가적인 모니터링과 염화물량의 평가를 수행하면 제안된 부식 모니터링 기법의 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 부식 전위, 부식 모니터링, Agar 센서, 피복두께, 물-시멘트 비, 염화물 농도
