

습윤 상태에서의 반전위를 이용한 철근 부식과 영향 인자 간의 상관성 분석

Relationship between Corrosion in Reinforcement and Influencing Factors Using Half Cell Potential Under Saturated Condition

정기찬¹ · 권성준^{2*}Gi-Chan Jeong¹ · Seung-Jun Kwon^{2*}

(Received April 16, 2021 / Revised June 15, 2021 / Accepted June 17, 2021)

In this study, the correlation between the influencing factors on corrosion and Half Cell Potential(HCP) measurement was analyzed considering the three levels of W/C ratio, cover depth, and chloride concentration. The HCP increased with enlarged cover depth, so it was confirmed that the increment of cover depth was effective for control of corrosion. Based on the criteria, the case of 60mm cover depth showed excellent corrosion control with under -200mV , indicating increase of cover depth is an effective method for reducing intrusion of external deterioration factors. When fresh water was injected to the upper part of specimens, very low level of HCP was monitored, but in the case that concentrations of chloride were 3.5% and 7.0%, HCP dropped under -200mV . In addition, the case with high volume of unit binder showed lower HCP measurement like increasing cover depth. Multiple regression analysis was performed to evaluate the correlation between the corrosive influence factors and HCP results, showing high coefficient of determination of 0.97. However, there were limitations such as limited number of samples and measuring period. Through the additional corrosion monitoring and chloride content evaluation after dismantling the specimen, more reasonable prediction can be achieved for correlation analysis with relevant data.

키워드 : 부식 모니터링, 반전위, 피복두께, 물-시멘트 비, 염수 농도**Keywords** : Corrosion monitoring, HCP, Cover depth, W/C, Chloride concentration

1. 서론

콘크리트는 고내구성의 건설재료로서 낮은 인장 강도를 보완하기 위해 내부에 철근이 매립된 철근 콘크리트(Reinforced concrete, RC)구조물로서 활발히 사용되고 있다. 콘크리트 구체 내에 매립된 철근은 콘크리트의 강알칼리 조건 하에 외부 열화 인자로부터 보호된다(Broomfield 1997; Maekawa et al. 2009). 그러나 사용기간의 증가에 따라 다양한 열화환경에 노출되면서 구조물에 다양한 내구성 문제가 발생하게 된다. 각국의 시방서 및 설계 기준에서는 대표적인 열화 요인으로서 염해, 탄산화, 동결융해, 황산염에 의한 침식, 알칼리골재반응을 고려하고 있는데 철근 부식 관점에서는 염해와 탄산화가 큰 비중을 차지하고 있다. 또한 내구성 설계가 명확하게 제시되지 못한 상태에서의 철근 부식과 관련

된 내구성 저하 문제는 지속적으로 보고되고 있다(JSCE 2007; Aney et al. 1998).

우리나라의 경우 3면이 바다로 둘러 쌓여있는 지리적 특성으로 인해 국토 개발적 차원에서 해안 구조물의 건설은 필수적이다. 따라서 국내외에서는 염해를 제어하고자 하는 다양한 연구들이 재료, 시공, 설계 등 다양한 분야에서 수행되어왔으며 관련 해석 및 평가 모델들이 발전되고 있다(Broomfield 1997; European Committee for Standardization 2000; JSCE 2007).

염해를 제어하기 위해서는 매립된 철근의 부식 개시 또는 부식 거동의 평가를 위해 전기-화학적 센서의 사용이 필수적이며, 다양한 내부 매립 센서 또는 비파괴 평가(Non-Destructive Evaluation, NDE)를 이용한 기법들이 제공되고 있다. 실질적으로 부식이 발생한 철근과 콘크리트 계면 사이에서는 부식생성물의 팽창에 의하여

* Corresponding author E-mail: jjuni98@hannam.ac.kr¹한남대학교 토목환경공학과 석사과정 (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)

부착력의 증가가 발생하지만, 일정 수준 이상으로 부식이 진전될 경우, 철근의 부피 팽창이 발생하여 콘크리트와 일체화가 되지 못하므로 슬립(Slip)이 발생한다. 이러한 과정은 최종적으로 철근과 콘크리트의 일체화를 저해하므로 구조물로서의 역할을 하지 못한다(Chung et al, 2008). 그러므로 부식의 개시시기 및 부식 거동에 대한 연구는 RC 구조물의 내구성 및 안전성을 동시에 고려하는 분야로서 큰 의미가 있다.

많은 연구들이 비파괴 기법 또는 내부의 철근과 연결을 통한 회로 구성을 기반으로 전위차 또는 전류를 분석하고 있다. 가장 일반적인 방법으로 평가되는 콘크리트 비저항 측정(Lim 2012)이나 내부의 철근과 콘크리트 표면의 반전위 차이를 이용한 측정법은 실태조사에도 많이 활용이 되는 기법이지만, 부식이 발생할 환경 조건을 평가하는 방법이므로 정량적인 부식전류를 측정하지 못하는 한계점을 갖고 있다(ASTM C876-09 2009). 내부의 철근과 회로를 구성하여 실제로 철근에 흐르는 부식전류를 평가하는 방법인 AC 임피던스법, 분극저항법(Song and Saraswathy 2006) 등은 실태조사와 같은 외부 실험 등에 제약이 있으나 가장 정량적인 방법으로 내부에 흐르는 부식 전류를 정량적으로 도출할 수 있다. 최근 들어서는 콘크리트 내부에 외부전류(Impressed current, IC)를 흘려보내는 방법을 이용하여 열을 가한 뒤, 온도변화와 이를 적외선 열화상(Infrared Thermography, IR)기법을 활용하여 부식 여부를 평가하는 연구가 진행 중이지만, 이 역시 실제 구조물에 적용하기에는 많은 제한을 가지고 있다(Kwon and Park 2012; Baek et al, 2012).

신설 구조물의 경우에는 구조체 내부에 기준전극(Reference electrode, RE), 부식전극(Working electrode, WE) 및 대극전극(Counter electrode, CE)을 설치하고 이들의 전위차를 이용하여 부식 거동을 평가하는 방법이 시도되고 있다. 많은 연구에서 이산화망간(MnO₂) 또는 관련 복합재와 폴리머를 사용하여 배근된 철근 위치에 이러한 센서 조합을 설치하고 이후 외부에서 상대전위(Open circuit potential, OCP)를 측정하여 임계전위와 비교를 수행하고 있다(Karthick et al, 2017; Karthick et al, 2014). 그럼에도 불구하고 HCP를 이용하여 부식개시 여부를 평가하는 연구는 꾸준히 수행되었는데, 실태조사에 적용성, 관련 국내외 기준이 명확하게 제시되고 있기 때문이다. 일반적으로 콘크리트로 구성된 구조물의 경우 HCP 측정결과는 상당히 높은 신뢰성을 가지고 있다(JSCE 2007).

HCP를 이용하여 부식 모니터링을 수행한 기존의 연구에서는 내부 강재의 부식을 인위적으로 유도하고자 전기적 촉진 방법인 부식촉진방법(Impressed corrosion method, ICM)을 이용하였다.

이 경우 빠르게 내부 강재를 부식시켜 부식 상태에서의 HCP를 평가할 수 있는 장점이 있으나, 일반적인 염수 노출 조건에서의 HCP 감소(- 방향 : 부식증가)거동을 평가할 수 없는 단점이 있다(Park and So 2016). 주기적인 염소이온 침지와 건습반복을 통한 부식 실험에 대한 연구는 많이 있지만 1년 이상의 장기간동안 다양한 물-시멘트비와 염화물 농도를 고려하여 HCP 결과를 도출한 연구는 매우 제한적이다. 또한 시편의 파쇄후의 염화물량 및 부식 상태를 같이 조사한 연구는 더욱 희박하다.

이를 위해 시험 변수로서 3 수준의 상부 주입 염수 농도, 3 수준의 피복두께, 그리고 3 수준의 콘크리트 물-시멘트 비를 고려하여 시편을 제작하였다. 이후 염수 주입 지속시간에 따른 HCP의 거동을 평가하였다. 본 논문은 22주까지 수행된 모니터링 결과를 다루고 있다. 추가 모니터링을 수행하여 염수 노출 1년 후 시편을 해체하여 부식량 및 염화물 분포와 함께 HCP 모니터링 결과를 분석할 예정이다.

2. 반전위(Half Cell Potential)를 활용한 철근 부식 평가 메커니즘

철근 부식 개시시기 평가를 위해 대중적으로 사용되는 반전위 측정 방법은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 철근과 조합전극을 도선으로 전압계의 단자에 접속하고 콘크리트 표면에서 철근의 위치 따라 조합전극을 이동시켜 다수의 점에서 철근의 전위를 측정한다. Fig. 1에서는 ASTM C 876의 구리황산염(Copper Sulphate Electrode, CSE)전극을 활용한 전위 측정 모식도를 나타내고 있다(ASTM C876-09, 2009).

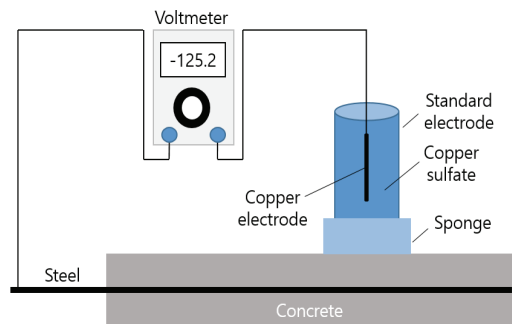


Fig. 1. Schematic diagram for HCP measurement

일반적으로 철근의 자연전위 측정은 측정 장소 선정, 철근 간의 전류 통과 확인, 측정점 결정, 철근에 대한 도선 접속, 전위 측정,

전위 측정값 기록의 순서로 이루어진다.

평가시의 전극 종류에 따라 부식 임계전위 값이 달라지므로 포화 칼로멜 전극 기준의 수치에는 “vs SCE”, 포화염화은전지 기준의 수치는 “vs SSCE”, 포화 황산동전극 기준의 수치에는 “vs CSE”로 표기한다. Table 1에서는 각종 조합전극에 따른 변환값을 나타내고 있다.

Table 1. Type of electrode and conversion factors

Types of combined electrodes	Electrolyte	Dislocation (mV vs CSE, 25°C)
Saturation copper sulfate electrode(CSE)	Saturation CuSO ₄	0+0.9×(t-25)
Saturated caramel electrode(SCE)	Saturation KCl	-74-0.66×(t-25)
Silver saturation chloride electrode(SSCE)	Saturation Ag/AgCl	-120-1.1×(t-25)
Positive bleidioxid-electrode(PRE)	Ca(OH) ₂ +CaSO ₄ (Solid)	-799+0.24×(t-25)
Manganese dioxide electrode	MnO ₂	+89-1.0×(t-25)

부식이 발생하는 임계전위에 대해서는 일반적으로 미국 기준인 ASTM C 876(ASTM C876-09 2009)과 이를 참고한 영국기준 OTH 84205(OTH 84205 1985)를 많이 적용하고 있다. 그러나 이러한 평가기준은 수분 환경조건에 따라 크게 변화하므로 수중부와 같은 경우는 적용할 수 없는 것으로 알려져 있다. Table 2에서는 자연전위를 이용한 부식평가기준을 나타내고 있고, 일반적인 HCP를 적용하여 부식 contour를 작성한 예는 Fig. 2에 나타내었다.

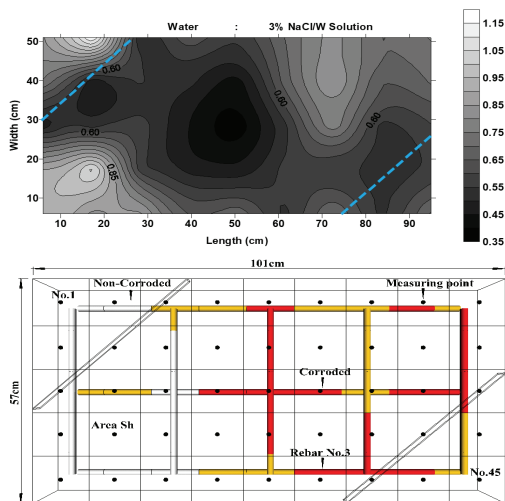


Fig. 2. The Corrosion contours map using HCP

Table 2. Standard for critical potential of corrosion feasibility

ASTM C 876(U.S.A)		OTH(U.K)
Potential(mV, CSE)	Corrosion probability	Corrosion probability
Over -200	Probability of no corrosion 90%	Less 5%
-200~-350	Uncertain	50%
Less -350	Corrosion probability over 90%	Corrosion probability over 95%

Fig. 2의 contour 그래프에서는 적색(고부식군) 부분과 황색 부분(저부식군)으로 구분하여 부식 발생 가능성의 예를 도시하였다.

3. 실험계획 및 사용재료

3.1 시편제작

본 연구에서는 장기 부식 모니터링을 수행하고자 ICM과 같이 전기적 촉진으로 부식을 유도하는 것이 아니라 상부 염수의 주입 및 제거를 통해 부식을 비교적 느린 속도로 유도하였다. 피복두께, 상부 주입 염수 농도(0%, 3.5%, 7.0%), 물-시멘트 비에 따른 HCP 변화 모니터링을 수행하기 위해 Fig. 3과 같은 RC 시편을 제작하였으며, 상부에서의 1 방향 염분 침투를 유도하였다. 물-시멘트 비 총 3수준(40%, 50%, 60%)을 고려한 콘크리트 배합을 적용하였으며 사용 배합을 아래의 Table 3에 나타내었다. 사용 철근은 D10의 SD 400을 사용하였으며 피복두께의 영향을 고찰하고자 3수준의 피복두께(30mm, 45mm, 60mm)를 고려하였다. 본 연구에서는

Table 3. The concrete mixture for this study

W/C(%)	S/a(%)	Unit weight(kg/m ³)			
		W	C	S	G
40	43	180	450	712	966
50	45	180	360	779	974
60	47	180	300	837	966

W=Water, C=Cement, S=Sand, G=Gravel, a=aggregate

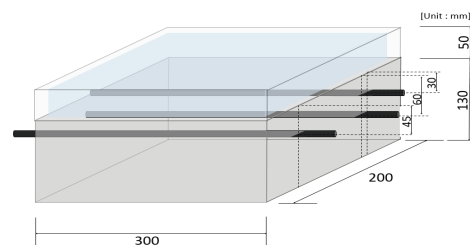


Fig. 3. The schematic diagram of RC structure for corrosion monitoring

Fig. 3과 같이 철근에 길이 방향으로 홈을 가공하여 전선을 매립한 후 납땜 및 에폭시를 이용하여 마감처리 하였다. HCP는 내부 철근을 양극에 연결하여야 하는데 철근에 바로 양극을 연결할 경우 국소부식에 따라 전위 값이 변동될 수 있으므로 이와 같은 전처리 작업을 선행하였다.

Table 4에 본 시험에서 고려한 변수를 정리하여 나타내었으며 Fig. 4에 타설이 완료된 시편의 모습을 나타내었다.

Table 4. The test Variables for corrosion monitoring

W/C(%)	Cover depth(mm)	Cl(%)
40	30	0.0
		3.5
		7
	45	0.0
		3.5
		7
	60	0.0
		3.5
		7
50	30	0.0
		3.5
		7
	45	0.0
		3.5
		7
	60	0.0
		3.5
		7
60	30	0.0
		3.5
		7
	45	0.0
		3.5
		7
	60	0.0
		3.5
		7

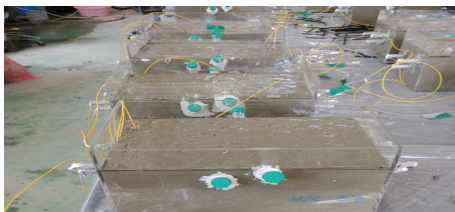


Fig. 4. The photo for making RC specimens

3.2 부식 모니터링 측정 주기 및 부식 모니터링 방법

3.2.1 측정주기 설정

장기 부식 모니터링을 위한 HCP 측정 계획은 총 2단계로 구분하여 설정하였다. 먼저 최초측정을 콘크리트 타설 후 28일 후에 수행하였다. 이후부터 부식 모니터링을 2단계로 나눠 수행하였는데 1회차 측정(타설 후 28일 경과 시 수행) 이후 상부에 염수를 주입하여 염수 주입에 따른 부식 촉진 환경을 2주간 유지한 후에 염수만 제거하여 표면이 습윤한 상태에서 HCP를 측정을 하였다. 이후 염수가 제거된 상태로 2주간 시편을 건조시킨다. 이와 같이 최초 측정을 제외하고 2주간 염수 주입 후 습윤 상태에서 1회 측정 및 이후 2주간의 건조를 1 Cycle로 하여 이를 총 2 Cycle(8주)을 수행하였다.

그 후 2단계에서는 염수 주입 상태를 6주간 유지한 상태로 상부 염수를 제거 후 습윤 상태에서 HCP 측정을 수행하고, 염수를 제거한 상태로 2주간 시편을 건조하는 것을 1 Cycle로 하여 장기 모니터링 종료 시까지 수행하고자 한다. 측정주기에 대한 모식도를 아래 Fig. 5에 (a), (b)로 나타내었다.

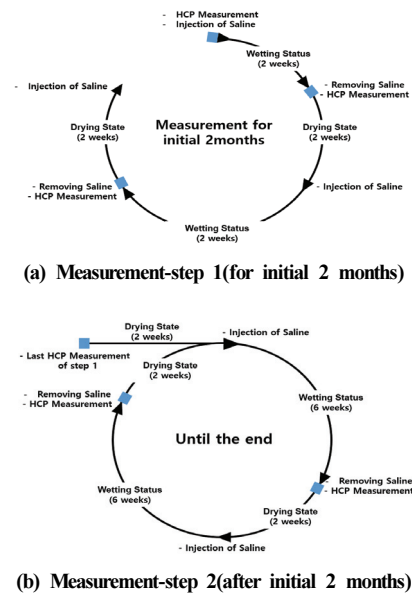


Fig. 5. HCP Measurement cycle for corrosion monitoring

3.2.2 영향인자를 고려한 HCP 측정 방법

매립 철근의 피복두께에 따른 반전위 거동을 평가하고자 Fig. 6과 같은 피복두께를 고려한 측정 영역을 설정하여 매 측정주기마다

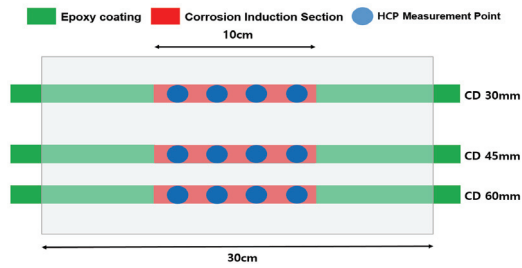


Fig. 6. The HCP measurement area considering cover depth

다 HCP 측정을 수행하였다. 또한 철근의 부식을 일정 부분(중앙부 100mm 영역)에서만의 부식을 유도하기 위해 부식을 유도하지 않는 부분을 에폭시로 코팅하였다. 각 철근을 대상으로 부식 유도부 100mm를 25mm 간격으로 고려하여 총 4회 측정을 수행하였다. 총 4회 측정값의 평균을 내어 해당 철근의 각 측정 시기의 반전위 측정값으로 고려하였다. Fig. 7에는 반전위 측정 전경을 나타내고 있다.

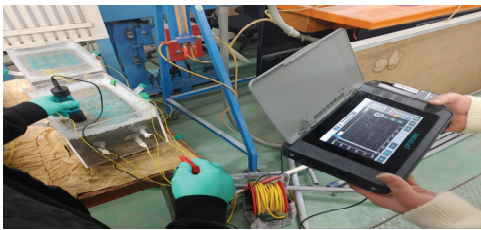


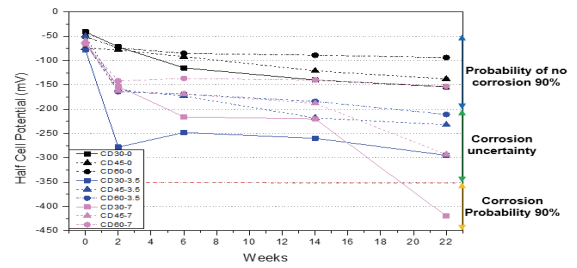
Fig. 7. The photo for measurement of HCP

4. 철근 부식 영향인자와 HCP 간의 상관관계 분석

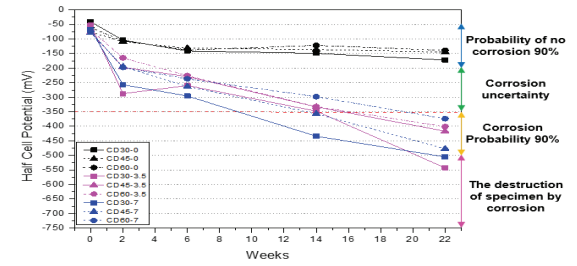
4.1 피복두께 및 염수 농도에 따른 HCP의 변화

본 절에서는 피복두께에 따라 변화하는 HCP 거동을 상부 주입 염수 농도에 따라서 분석하였다. Fig. 8에는 습윤 조건 하에서의 각 물-시멘트 비를 기준으로 피복두께의 변화에 따른 HCP 거동을 상부 주입 염수농도를 고려하여 평가한 결과를 나타내고 있다.

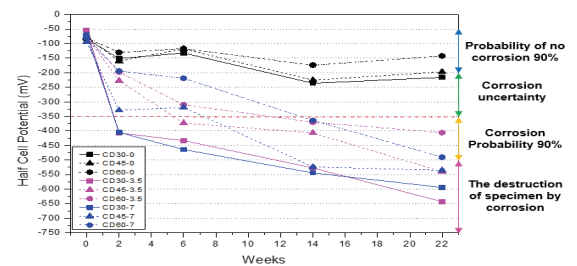
피복두께에 따른 HCP 측정 결과를 고찰한 결과, 모든 물-시멘트 비에서 피복두께가 커질수록 반전위의 감소폭이 낮아졌다. 즉, 피복두께의 증가에 따라 부식 확률이 낮아지는 것으로 평가되었다. 측정기준에 따르면 물-시멘트 비에 상관없이 피복두께가 가장 많이 확보된 경우(60mm)에서는 다른 경우와는 다르게 비교적 부식이 적게 일어난 것으로 판단되어지며 이는 피복두께가 외부 열



(a) W/C 40%



(b) W/C 50%



(c) W/C 60%

Fig. 8. The results of HCP measurement considering cover depth and chloride concentration

화인자에 대한 효과적인 방어기구가기 때문이다(Jang et al. 2018).

모니터링 초기 대비 모니터링 기간이 증가함에 따라 HCP 값이 점차 안정적인 거동을 나타내고 있는 점을 확인 할 수 있었다. 또한 일부 측정값들이 매우 낮은 반전위값(부식 확률 90%, 진입전위인 -350mV 이하)을 나타내었는데, 이는 콘크리트의 불균질성 및 HCP 측정 오차로 인해 발생된 것으로 보여 추가 모니터링을 통해 확인이 필요하다고 사료된다.

4.2 콘크리트 물-시멘트 비에 따른 HCP의 변화 분석

본 절에서는 물-시멘트 비에 따라 변화하는 HCP의 거동을 분석하고자한다. Fig. 9에 습윤 상태 하에서의 각 염화물 농도를 기준으로 물-시멘트 비에 따른 HCP 거동을 상부 주입 염수농도를 고려하여 평가한 결과를 나타내었다.

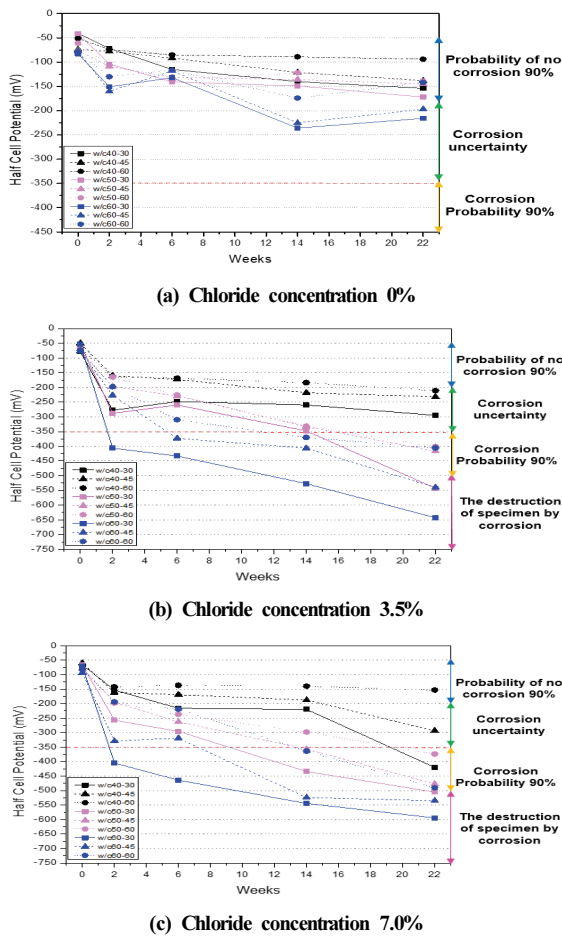


Fig. 9. The results of HCP measurement considering W/C

물-시멘트 비가 높을수록 반전위의 감소폭이 커지는 경향이 나타났으며, 가장 높은 물-시멘트 비인 물-시멘트 비 60%에 해당하는 시편의 경우 비교적 큰 폭으로 반전위의 감소(-방향 : 부식 증가)가 나타났다. 이는 물-시멘트 비가 커질수록 공극구조가 커지고 이에 따라 자유 염화물 이온과 자유수가 증가하기 때문이다 (Thomas and Bamforth 1999; Ryu et al. 2017). 대부분의 경우에서 물-시멘트 비가 크고 피복두께가 작을수록 반전위의 감소폭이 커졌는데, 이는 기존의 연구결과와 동일한 경향을 가진다(Ryu et al. 2017).

상부 염수 주입 농도를 기준으로 최종 모니터링 결과를 분석하면 염수 농도 0%, 3.5%, 7.0% 순으로 반전위값이 -216, -643, -594mV로 측정되었다. 평가 기준에 따르면 염수 농도 0%는 부식 없을 확률 90%에, 염수 농도 3.5 및 7.0%의 경우 부식 발생가능성이 50%를 초과하여 부식이 진전되어 있을 것으로 예상된다.

4.3 다중 회귀분석을 통한 영향인자별 HCP 분석 및 패턴화

영향인자별 HCP의 거동에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고자 가장 최근에 측정된 반전위값을 활용하여 회귀분석을 수행하였다. 회귀분석에 사용한 데이터를 Table 5에 나타내었다.

본 연구에서 고려한 부식 영향인자인 물-시멘트 비, 피복두께, 상부 주입 염수 농도를 고려하여 반전위값을 예측할 수 있는 제안식을 다중 회귀분석을 통해 평가하였다. 해당 제안식을 아래 식 (1)에 나타내었으며 회귀분석 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 또한 22주차 이후 각 피복두께와 배합에 따른 HCP의 contour 그래프를

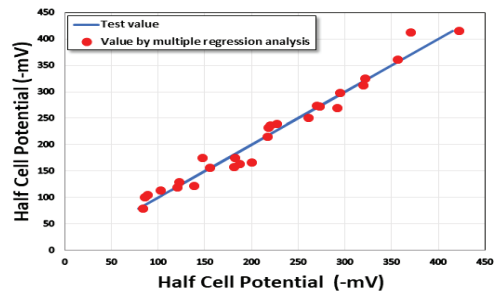


Fig. 10. The results of multiple regression analysis for HCP

Table 5. The corrosion monitoring data for regression analysis

W/C (%)	C.D (mm)	Cl ⁻ (%)	HCP (-mV)	W/C (%)	C.D (mm)	Cl ⁻ (%)	HCP (-mV)
40	30	0.0	104.4	60	30	0.0	163.6
	45	0.0	100.6		45	0.0	155.6
	60	0.0	78.6		60	0.0	128.6
	30	3.5	231.8		30	3.5	412.8
	45	3.5	166.6		45	3.5	324.6
	60	3.5	158.4		60	3.5	271.6
	30	7.0	215.0		30	7.0	415.4
	45	7.0	174.4		45	7.0	360.2
	60	7.0	174.4		60	7.0	269.6
50	30	0.0	121.4	60	30	0.0	121.4
	45	0.0	119.4		45	0.0	119.4
	60	0.0	113.2		60	0.0	113.2
	30	3.5	298.4		30	3.5	298.4
	45	3.5	250.4		45	3.5	250.4
	60	3.5	238.6		60	3.5	238.6
	30	7.0	311.8		30	7.0	311.8
	45	7.0	274.2		45	7.0	274.2
	60	7.0	236.4		60	7.0	236.4

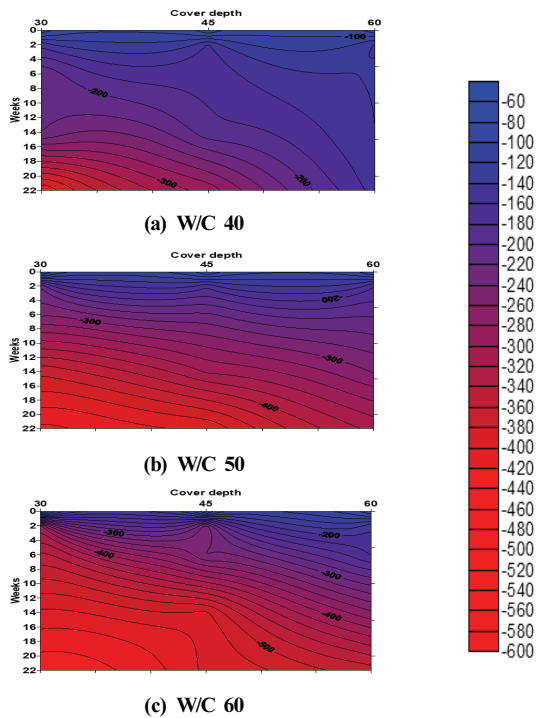


Fig. 11. Contour of HCP with varying cover depth and w/c ratio (Chloride 7.0%)

도시하면 Fig. 11과 같다. 그래프 우측의 바는 HCP를 통한 부식가능성의 정도를 표시하고 x축엔 피복두께, y축엔 측정기간을, z축엔 측정된 HCP 값을 나타내어 측정위치에 따른 주차별 각 피복두께 및 배합조건의 부식경향을 색의 변화를 통해 파악할 수 있다.

$$HCP = 227.3 - 8.01X_1 - 35.1X_2 - 3.89X_3 + 5.395X_2^2 - 0.755X_1X_2 + 0.1012X_1X_3 + 0.306X_2X_3 \quad (1)$$

여기서, (X_1)는 물-시멘트 비(%)이고 (X_2)는 염화물의 농도(%), (X_3)는 피복두께(mm)를 나타낸다. 위의 식은 실내실험결과에 의존한 것이므로 물-시멘트비는 40~60% 수준, 염화물 농도는 0.0~7.0%, 피복두께는 30~60mm의 수준으로 제한하는 것이 바람직하다.

다중회귀분석을 통해 얻어진 회귀식의 결정계수가 0.97로 신뢰할만한 수준으로 판단된다. 본 회귀식은 특정 시점에 해당하는 결과값만이 예측가능하다는 한계점을 갖고 있는데, 추가 장기 모니터링을 통해 데이터를 확보하여 더욱 높은 신뢰도를 나타낼 뿐 아니라 모니터링 기간까지 추가로 고려할 수 있는 합리적인 제안식이 도출될 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 3가지 수준의 물-시멘트 비, 피복두께, 상부 주입 염수 농도를 고려하여 HCP의 변화를 정량적으로 분석하였다. 본 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 피복두께에 따른 반전위 변화 거동을 분석한 결과, 피복두께가 증가할수록 반전위 감소폭이 작아지는 거동을 나타내었다. 평가 기준에 따르면 피복두께 60mm를 갖는 시편의 경우 비교적 부식이 적게 일어난 것으로 판단되어지며 이러한 경향의 원인은 피복두께가 내부 보강재의 부식 방지에 대해 효과적인 방어기구가기 때문으로 사료된다.
2. 물-시멘트 비 역시 반전위값의 변화에 지배적인 영향을 미쳤으며, 물-시멘트 비가 높을수록 반전위가 감소하는 경향이 나타났다. 물-시멘트 비가 높을수록 확보되는 단위결합재량이 적어지기 때문에 이러한 경향이 나타난 것으로 보인다. 또한 상부 주입 염수 농도를 기준으로 모니터링 결과를 분석하면 염수 농도 0%의 경우 모든 시편에서 부식이 발생하지 않은 것으로 예측되어지며 염수 농도 3.5%, 7.0%에서는 부식이 발생한 것으로 판단된다. 시편의 해체 후 피복두께별 부식량 및 염화물 프로파일을 추가분석하여 모니터링 결과와 관련 영향인자 간의 상관성을 더욱 뚜렷하게 도출할 수 있을 것이다.
3. 영향인자들과 HCP의 관계를 분석하기 위해 다중회귀분석을 수행하여 반전위값과 영향인자 간의 상관식을 도출하였다. 해당 제안식의 결정계수는 0.97로 신뢰할 수 있는 수준으로 판단되었다. 본 회귀식은 특정한 시점의 반전위값만을 예측할 수 있다는 한계점을 갖고 있는데 이는 추가적인 모니터링 수행을 통해 극복 가능할 것으로 사료된다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

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

References

- Broomfield, J.P. (1997). Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair, E&FN, London, 1–15.
- Maekawa, K., Ishida, T., Kishi, T. (2009). Multi-Scale Modeling of Structural Performance, Taylor Fr, 322–325.
- Amei, S.L., Johnson, D.A., Miltenberger, M.A., Farzam, H. (1998). Predicting the service life of concrete marine structures: an environmental methodology, *ACI Structural Journal*, **95(2)**, 205–214.
- European Committee for Standardization(Comité Européen de Normalisation, CEN) (2000). Eurocode 1: Basis of Design and Actions on Structures; EN-1991; European Committee for Standardization(Comité Européen de Normalization, CEN): Brussels, Belgium.
- Japan Society of Civil Engineering(JSCE) (2007). Standard Specification for Concrete Structures–Design JSCE Guidelines for Concrete 15; Japan Society of Civil Engineering(JSCE): Tokyo, Japan.
- 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 the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **4(2)**, 203–208 [in Korean].
- 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.
- Lim, Y.C. (2012). A study on the estimation of moisture condition of concrete by resistivity method, *Journal of Korea Architecture Institute*, **28(12)**, 69–76 [in Korean].
- ASTM C876–09 (2009). Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, 1–6.
- 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.
- Kwon, S.J., 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 [in Korean].
- 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 Nondestructive Evaluation*, **31(2)**, 181–190.
- Karthick, S., 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.
- 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.
- Figg, J.W., Marsden, A.F. (1985). Development of Inspection Techniques for Reinforced Concrete, *Offshore Technology Report*, OTH 84205.
- Jang, S.Y., Yoon, Y.S., Kwon, S.J. (2018). Derivation of optimum GGBFS replacement with durability design parameters, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **6(1)**, 36–42.
- 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.
- Rye, H.S., Park, J.S., Kwon, S.J. (2017). Relationship between half cell potential and corrosion amount considering saturated cover depth and W/C ratios in cement mortar, *Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection*, **21(3)**, 19–26 [in Korea].

습윤 상태에서의 반전위를 이용한 철근 부식과 영향 인자 간의 상관성 분석

본 연구에서는 3가지 수준의 물-시멘트 비, 상부 주입 염수 농도, 피복두께를 고려하여 반전위값과 영향인자들 간의 상관성을 분석하였다. 피복두께가 증가할수록 반전위값이 증가(+ 방향 : 부식 억제)하여 부식 저항성이 증가하는 것을 확인할 수 있었으며 평가 기준에 따르면 피복두께 60mm를 갖는 시편의 경우 비교적 부식이 적게 일어난 것으로 판단된다. 이는 피복두께가 외부 열화인자에 대한 효과적인 방어기구로서 작용한 것이 원인으로 사료된다. 상부 주입 염수 농도가 0%인 경우 모든 경우에서 부식이 발생하지 않는 것으로 판단되지만, 염수 농도 3.5% 및 7.0%의 경우 부식이 진전된 것으로 판단된다. 비교적 높은 단위 결합재량이 확보된 배합에서 부식 저감에 유리한 모니터링 결과가 도출되었으며, 부식 영향인자와 반전위값 간의 상관성을 평가하고자 다중 회귀분석을 수행하였다. 해당 예측식의 결정계수는 0.97로 매우 높은 수준으로 나타났지만 사용한 표본의 수가 제한적이고 특정 시점의 결과만이 이용된 한계점이 존재하였다. 추가적인 모니터링 수행 및 시편 해체 후 관련 데이터와의 상관성 분석을 통해 더욱 합리적인 예측식의 도출이 가능해 질 것으로 사료된다.