



염해에 노출된 균열부 콘크리트의 반전위 평가

김기범¹⁾ · 박기태²⁾ · 권성준^{3)*}

¹⁾에스이네스트 기술연구소 ²⁾한국건설기술연구원 ³⁾한남대학교 건설시스템공학과

Evaluation of Half Cell Potential Measurement in Cracked Concrete Exposed to Salt Spraying Test

Ki-Bum Kim,¹⁾ Ki-Tae Park,²⁾ and Seung-Jun Kwon^{3)*}

¹⁾SENEST consultant, Seoul 289-319, Korea

²⁾Korea Institute of Construction Technology SOC Research Institute, Ilsan 411-712, Korea

³⁾Dept. of Civil Engineering, Hannam University, Daejeon 306-791, Korea

ABSTRACT Several techniques for steel corrosion detection are proposed and HCP (half cell potential) technique is widely adopted for field investigation. If concrete has cracks on surface, steel corrosion is rapidly accelerated due to additional intrusion of chloride and carbon dioxide ions. This study is for an evaluation of HCP in cracked concrete exposed chloride attack. For this work, RC (reinforced concrete) beams are prepared considering 3 w/c ratios (0.35, 0.55, and 0.70) and several cover depths (10~60 mm) and various crack widths of 0.0~1.0 mm are induced. For 35 days, SST (salt spraying test) is performed for corrosion acceleration, and HCP and corrosion length of rebar are evaluated. With increasing crack width, w/c ratios, and decreasing cover depth, HCP measurements increase. HCP evaluation technique is proposed considering the effects of w/c ratios, crack width, and cover depth. Furthermore anti-corrosive cover depths are obtained through Life365 program and the results are compared with those from this study. The results shows relatively big difference in cracked concrete, however provide similar anti-corrosive conditions in sound concrete.

Keywords : steel corrosion, half cell potential, crack, concrete, cover depth

1. 서 론

염해는 철근콘크리트(reinforced concrete, RC) 구조물의 대표적인 열화중 하나이며, 매립된 철근의 부식을 직접적으로 야기한다. 초기의 철근부식은 미관의 손상에서 균열발생, 박리/박락 등으로 진전하며 최종적으로는 구조물의 안전성에 치명적인 영향을 주게 된다.^{1,2)} 염화물 이온은 초기재령에서 콘크리트 구체의 건조수축에 심각한 영향을 미치고, 경화된 콘크리트에서는 내부에 매립된 철근부식을 야기하는 것으로 알려져 있다.³⁾ 균열을 가진 콘크리트에서는 열화가 더욱 심하게 진전되는데, 공극을 통한 열화인자의 유입뿐 아니라, 균열폭으로 추가적인 열화인자가 유입하기 때문이다. 탄산화,^{4,5)} 염해,^{6,7)} 투수성^{8,9)} 등에 대하여 해석 및 실험적인 접근으로 많은 연구

가 수행되고 있다.

현장에서는 주로 비파괴적인 방법으로 철근의 부식상태를 조사하게 된다. 비파괴 기법(non-destructive technique)은 공용중인 RC 구조물에 손상을 거의 가하지 않으면서 콘크리트 및 철근의 상태를 평가할 수 있으므로 최근 들어 많이 사용되고 있다. 일반적으로 전기저항측정, 분극저항측정, 적외선 화상측정, 반전위측정 등이 현장에서 주로 사용되는 철근부식탐지 기법이다.

전기저항측정(resistivity method)은 주로 콘크리트 모체의 저항을 측정하여 부식환경을 평가한다. 정성적인 방법이지만 사용이 간편하므로 현장에서 많이 적용되고 있다.^{10,11)} 그러나 주의의 환경조건(온도 및 습도)에 매우 민감하게 콘크리트 비저항이 변하므로 부식환경에 대한 평가일 뿐 철근 부식량 측정을 위해서는 적합하지 않다. 분극저항측정(linear polarization method)은 부식전위 부근에서 전위와 전류가 선형적인 관계를 유지한다는 가정 하에 부식전류밀도(current density)를 도출한다. 이는 정량적인 방법이며, 최근 들어 정확도를 높이기 위해 가이드 링(guard ring)을 이용하기도 한다.¹²⁻¹⁴⁾ 적외선 열화상(infrared

*Corresponding author E-mail : jjuni98@hnu.kr

Received June 25, 2013, Revised August 22, 2013,

Accepted August 30, 2013

©2013 by Korea Concrete Institute

thermography)은 콘크리트 모재에 전혀 손상을 주지 않는 큰 장점이 있지만, 부식량이 많고 피복두께가 작은 경우에 주로 사용된다. 현장적용에는 피복두께 편차, 부식량 편차, 콘크리트 모재의 열화 등 많은 변수가 있으므로 사용이 제한된다.¹⁵⁻¹⁷⁾ 그러나 기존의 구조물에 대하여 전혀 외적인 손상을 주지 않는 장점이 있으므로 지속적인 연구가 수행되고 있다.

철근과 콘크리트 모재사이의 저항을 측정하여 부식가능성을 평가하는 방법인 반전위(half cell potential, HCP) 측정법은 분극저항법과 같은 정량적인 방법은 아니지만, 우수한 현장적용성과 명확한 부식발생확률 기준을 가지고 있으므로 많이 사용되고 있다.^{18,19)} 특히 ASTM에서는 측정전위에 따라 철근부식 확률을 설정하여 간편하게 적용할 수 있다.²⁰⁾

많은 연구들이 HCP를 이용하여 염해저항성과 부식 확률을 나타내었지만, 균열을 가진 콘크리트에 대한 HCP의 측정 결과에 대한 연구가 거의 없다. 이 연구는 큰 균열이 발생한 RC 보의 염해저항성을 평가하기 위해 HCP를 측정하고 그 거동을 정량적으로 고찰하는 것을 목적으로 하고 있다. 이를 위해 RC 보 시편을 제작하고 휨하중을 인가하여 균열을 유도하였다. 비말대 환경을 모사하기 위해 촉진염해분무시험(salt spraying test, SST)을 수행하였으며 이후 균열부와 건전부의 HCP를 측정하여 배합특성 및 균열의 영향을 정량적으로 분석하였다. 또한 Life365를 이용하여 염화물 침투 해석을 수행하였으며, 도출된 부식 안전 피복두께와 HCP 측정 결과를 이용한 평가식과의 비교를 수행하였다.

2. 실험 프로그램의 개요

2.1 염해분무시험 부식영향인자 및 배합

다양한 특성을 가진 RC 보 시편을 제작하기 위해 세 가지 w/c(water to cement) 비가 0.35, 0.55, 0.70으로 고려되었다. 또한 w/c 0.55 시편에 대해서는 0.2~1.5 mm의 균열이 유도되었다. 피복두께의 영향을 도출하기 위해 w/c 0.55에 대해서는 10~60 mm의 피복두께가 고려되었으며, A그룹, B그룹, C그룹으로 분류하여 시험을 수행하였다.

Table 1에서는 SST의 시험변수를 나타내고 있는데,

Table 1 Cases for salt spraying test

Group	Considerations
A	Constant: w/c 0.55, cover depth 30 mm Variable parameter: crack width (0.0~1.5 mm)
B	Constant: w/c 0.55 Variation parameter: cover depth (10~60 mm), crack width (0.0~1.0 mm)
C	Constant: 30 mm Variation parameter: crack width (0.0~1.0 mm), w/c (0.35~0.70)

부식을 촉진시키기 위하여 비교적 작은 피복두께(30 mm)와 큰 균열폭(1.0 mm)을 도입한 것이 특징이다.

RC보의 제조를 위하여 보통포틀랜드 시멘트가 사용되었는데 시험에 사용된 배합은 Table 2와 같다. 또한 잔골재 및 굵은골재의 물리적 특성은 Table 3에 나타내었다.

RC 보 시편을 제작하면서 D19 철근을 사용하였으며 철근을 소요 깊이별로 고정하기 위하여 시멘트 페이스트 스페이서를 사용하였다. SST 시험 중 콘크리트와 스페이서 계면을 통하여 염화물이온이 침투하는 것을 방지하기 위하여 스페이서 위치에는 방수처리를 하였다.

시편은 제작, 탈형한 후 28일간 수중양생을 수행하였고, 압축강도 측정을 위해서는 150×300 mm 실린더 몰드를, RC 보 시편은 150×150×600 mm 몰드를 사용하였다.

2.2 SST 시험

비말대 환경을 모사하기 위해 종합내구성 시험기를 사용하였다. 비말대조건에서는 해수 중 조건보다 산소의 유입이 원활하여 부식이 쉽게 발생한다.^{1,2)} 염해분무촉진 실험은 습도와 온도를 조절할 수 있는 내구성 시험기내에 균열이 가해진 시험체를 거치시킨 후, 40°C의 온도를 유지하며, NaCl 5% 용액을 5시간 30분 동안 분무하고

Table 2 Mix proportions for this test

Case	w/c	S/a (%)	Unit content (kg/m ³)				SP ⁽¹⁾
			Water	Cement	Sand	Gravel	
A	0.35	39.5	171.5	490.1	639.7	998.7	0.2% of cement wt.
B	0.55	43.5	171.5	311.9	768.5	1017.4	
C	0.70	48.2	186	266	902	969	

⁽¹⁾ Super-plasticizer

Table 3 Physical properties of aggregates

Type	Density (kg/m ³)	Absorption (%)	FM ⁽¹⁾
Sand	2570	0.74	2.57
Gravel	2620	0.53	6.72

⁽¹⁾ Fineness modulus

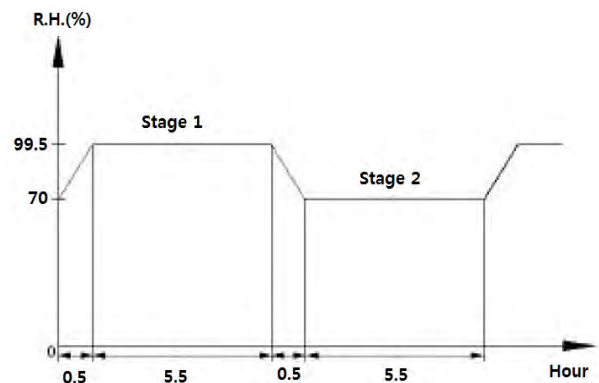
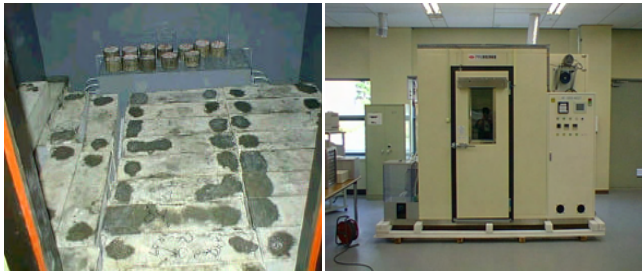


Fig. 1 Cyclic period of SST



(a) RC samples (b) General durability equipment

Fig. 2 RC samples and SST equipment



(a) Test setup (b) Crack inducing

Fig. 3 Photos for crack inducing and test setup

5시간 30분 동안 건조시키는 12시간 단위의 건조반복을 실시하였다. 내구성 시험기 안에서 시험에 따라 35일 염해분무를 실시하였으며 염해분무 사이클을 Fig. 1에, 내구성 시험기 안에 거치된 시편 및 내구성 시험기는 Fig. 2에 나타내었다.

기존의 연구에 의하면,²¹⁾ 해안선으로부터 200 m 이내에 위치한 염화물 이온의 농도의 범위는 0.3~0.8(g/m²/day)이며 염해 분무량만을 고려하였을 때 9.4년에 해당한다.

2.3 RC 보 시편+4의 균열유도

RC 보 시편은 28일의 수중 양생이후, 1일 건조한 뒤 균열을 도입하였다. 균열은 만능시험기를 이용하여 3점 휨 가력을 통해 유도하였으며, 균열의 크기를 제어하기 위하여 단일 균열을 대상으로 LVDT를 균열과 직각방향으로 설치하였다. 하중의 재하(load)와 제하(unload)를 반복하면서 시편에 설치한 LVDT를 통하여 균열폭을 확인하였다. Fig. 3에서는 LVDT를 설치한 뒤, 휨시험을 준비하는 사진과 휨균열 유도 후의 사진을 나타내고 있다.

3. 건전부 및 균열부 콘크리트의 HCP 측정 결과

3.1 압축강도 평가

이 절에서는 w/c 0.35, 0.55, 0.70의 시편에 대한 압축강도 평가를 나타내었다. 3개 시편에 대한 압축강도 평균값은 w/c 0.70에서는 20.2 MPa, w/c 0.55에서는 28.8 MPa, w/c 0.35에서는 45.0 MPa로 평가되었다. 압축강도는 w/c와 거의 선형의 전형적인 강도특성을 나타내었으며 그

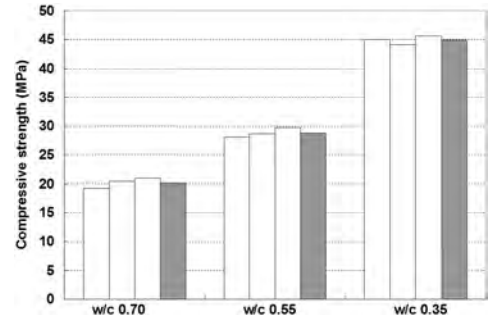


Fig. 4 Compressive strength with change of w/c

Table 4 Conditions for HCP measurement for cracked RC beam (w/c 0.55)

Sample no.	w/c	Cover depth (mm)	Crack width (mm)
A-1	0.55	30	0
A-2			0
A-3			0
A-4			0.51
A-5			0.54
A-6			1.00
A-7			1.00
A-8			1.51
A-9			1.50

결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 회색바(bar)는 평균값을 나타낸다.

3.2 균열부 콘크리트의 HCP 측정 및 염화물 이온의 침투

3.2.1 균열에 따른 HCP 측정 및 부식조사

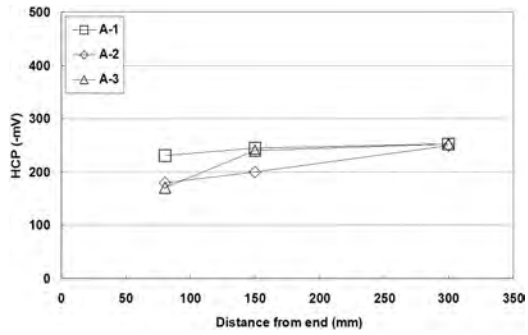
균열부 콘크리트의 HCP를 측정하기 위해, w/c 0.55이며 피복두께가 30 mm인 RC 시편이 사용되었다. 부식검사를 하기 위한 시편은 A group이며 Table 4에 나타내었다.

35일 염해분무시험을 거친 뒤, HCP를 측정할 결과는 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서는 위치별로 측정값의 편차가 발생하는데, 이는 재료적인 불균일성과 시편 손상상태에 따라 염해분무 양과 부식정도가 조금씩 다르기 때문이다.

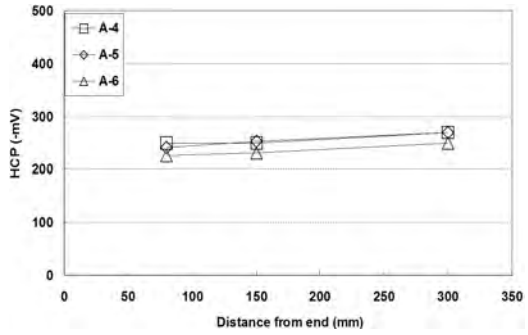
균열폭이 0.0 mm에서 1.50 mm로 진전함에 따라 HCP 값은 증가하였으며, 0.50 mm에서 14~16%, 1.0 mm에서 24%, 1.50 mm에서 34~42%정도 증가하였다. 균열이 발생한 콘크리트에서는 염화물 이온의 침투가 증가하고 이에 따라 국소부식이 더욱 증가함을 알 수 있다.

균열폭이 증가하는 시편을 대상으로 HCP의 컨투어(contour)를 나타내면 Fig. 6과 같다.

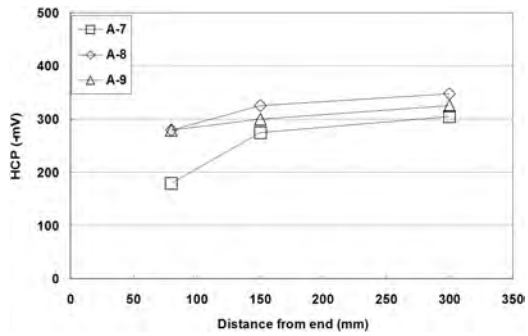
콘크리트 파쇄 후 부식량을 육안으로 조사하여 부식길이 및 부식상태를 평가하였다. Fig. 7에서는 부식길이 및 부식평가사진을 나타내고 있는데, A-5(0.54 mm 균열폭)에서는 28 mm의 부식길이가, A-7(1.00 mm 균열폭)에서는 40 mm의 부식길이가, 그리고 A-9(1.50 mm 균열폭)에서는



(a) Crack width 0.0 mm



(b) Crack width 0.0~1.0 mm



(c) Crack width 1.0~1.5 mm

Fig. 5 HCP measurement in cracked concrete (w/c 0.55, cover depth 30 mm)

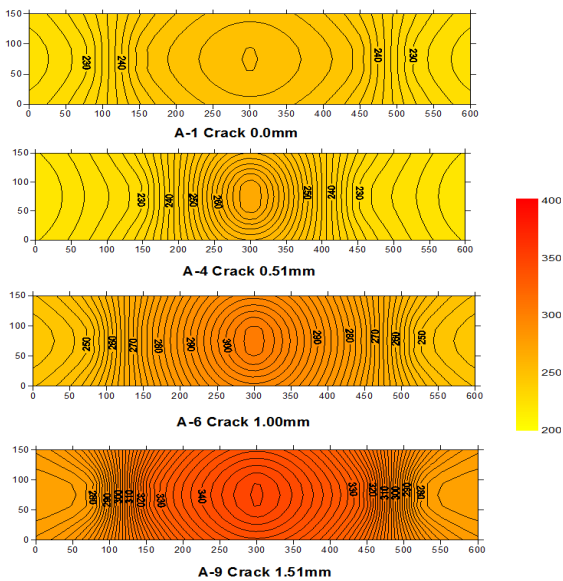


Fig. 6 Contour variation with crack width

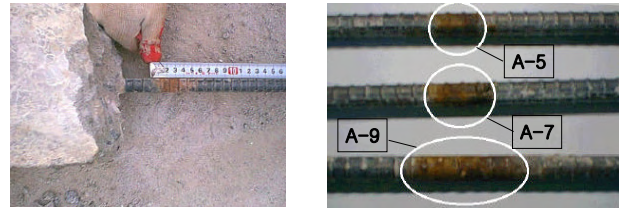
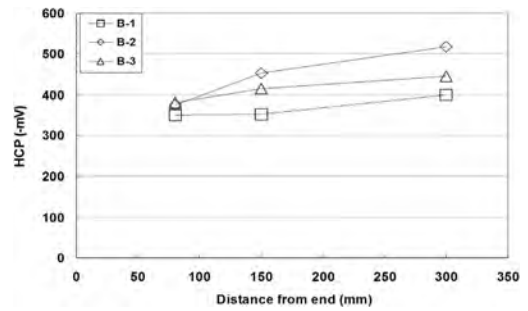


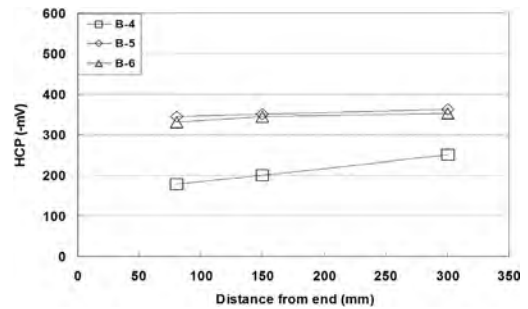
Fig. 7 Crack width and corroded length in rebar

Table 5 Conditions for HCP measurement for cracked RC beam (cover depth 10~60 mm)

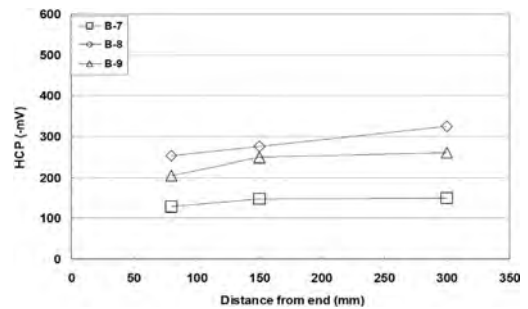
Sample no.	w/c	Crack width (mm)	Cover depth (mm)
B-1	0.55	0.00	10
B-2		1.04	10
B-3		1.00	10
B-4		0.00	30
B-5		1.13	30
B-6		1.10	30
B-7		0.00	60
B-8		1.00	60
B-9		1.01	60



(a) Cover depth 10 mm



(b) Cover depth 30 mm



(c) Cover depth 60 mm

Fig. 8 HCP measurement in cracked concrete (cover depth 10~30 mm)

75 mm의 부식길이가 측정되었다. 정확한 부식량을 평가할 수는 없었으나, 균열폭의 증가와 함께 부식길이의 증가를 확인할 수 있었으며, 75 mm의 부식길이의 경우 조사 결과 다른 시편에 비하여 심각한 부식상태를 나타내고 있었다.

3.2.2 피복두께에 따른 HCP 측정 및 부식조사

이 절에서는 w/c를 0.55로 고정하고 균열폭과 피복두께를 변화시켜 HCP의 변화를 평가하였다. Table 5에서는 피복두께 변화에 따른 균열부 시편의 조건을 나타내었으며 HCP 측정 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

균열폭이 0.0 mm에서 1.0 mm정도로 증가할 때, 피복두께의 변화와 상관없이 모든 경우에 HCP의 크기는 증가하였다. 피복두께가 10 mm인 경우 증가율은 112~122% 증가를, 피복두께가 30 mm인 경우 증가율은 116~120%로 평가되었다. 그러나 피복두께가 충분한 60 mm의 경우에는 166~200% 가량 증가하였다. 이는 피복두께가 충분이 확보된 콘크리트의 경우 균열이 없을 때, HCP은 작은 수준이지만 균열 발생후 HCP가 상대적으로 크게 증가함을 알 수 있다. 피복두께가 크거나 w/c가 낮은 콘크리트에서 균열이 발생할 때, 높은 w/c를 가진 콘크리트에 비해 상대적인 열화증가율이 커지는 것은 기존의 연구에서도 확인할 수 있다.^{7,22)}

동일한 균열폭을 가졌다 하더라도 피복두께가 작은 콘크리트에서 부식이 더욱 크게 발생하는데, 결과는 Fig. 9와 같다. B-3(피복두께 10 mm, 균열폭 1.0 mm)에서는 108 mm의 부식길이가, B-6(피복두께 30 mm, 균열폭 1.0 mm)에서는 55 mm의 부식길이가, B-9(피복두께 60 mm, 균열폭 1.0 mm)에서는 50 mm의 균열길이가 측정되었다.

3.2.3 w/c비에 따른 HCP 측정 및 부식조사

이 절에서는 피복두께를 30 mm로 고정하고 w/c를 0.35, 0.55, 0.70으로 변화시키면서 균열부의 HCP를 평가하였다. Table 6에서는 w/c의 변화에 따른 균열부 시편의 HCP의 측정 결과를 요약하였으며, 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다. w/c 0.35인 경우는 균열이 발생해도 HCP이 136 mV에서 147~151 mV로 큰 차이를 나타내지 않았다. w/c 0.55인 경우는 171 mV에서 195~356 mV로 증가하였으며, w/c 0.70에서는 301 mV에서 균열발생과 함께 412~

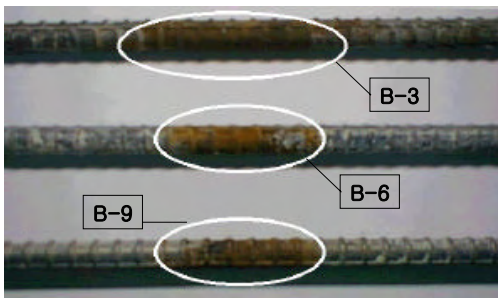


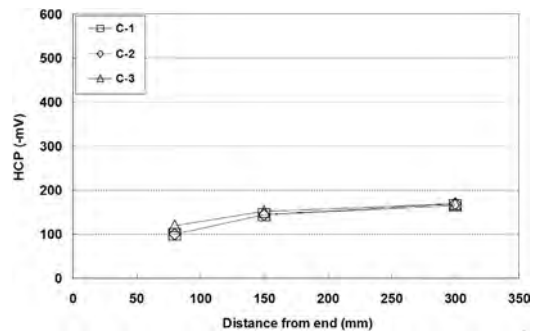
Fig. 9 Corroded length with crack width of 1.0 mm in different cover depth

439 mV로 증가하였다.

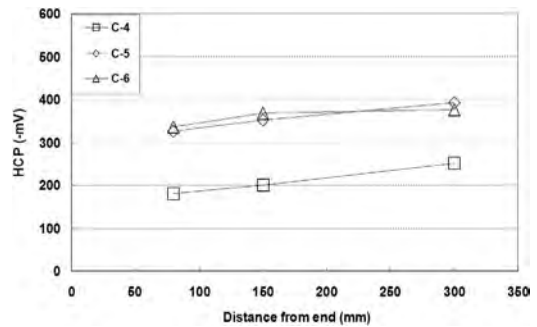
또한 균열이 1.0 mm 발생한 시편에 대해 육안으로 균열 길이를 조사한 결과 C-2(w/c 0.35)에서는 32 mm의 경미한

Table 6 Conditions for HCP measurement for cracked RC beam (w/c 0.35, 0.55, and 0.70)

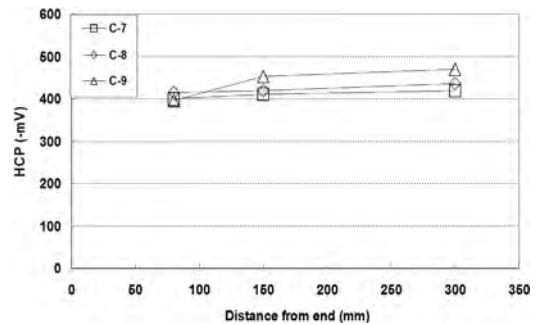
Sample no.	Cover depth (mm)	Crack width (mm)	w/c ratios
C-1	30	0.00	0.35
C-2		1.00	0.35
C-3		1.00	0.35
C-4		0.00	0.55
C-5		1.05	0.55
C-6		1.00	0.55
C-7		0.00	0.70
C-8		1.00	0.70
C-9		1.10	0.70



(a) w/c 0.35



(b) w/c 0.55



(c) w/c 0.70

Fig. 10 HCP measurement in cracked concrete (w/c 0.35, 0.55, and 0.70)

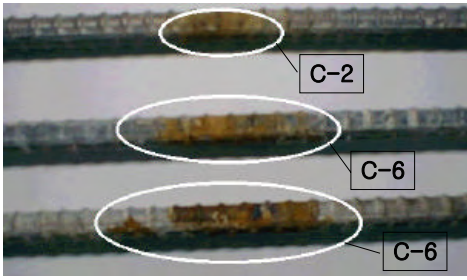


Fig. 11 Corroded length with crack width of 1.0 mm in different w/c ratios

부식이 발생하였으며, C-6(w/c 0.55)에서는 50 mm의 부식이, C-9 w/c 0.70)에서는 64 mm의 심각한 부식이 발생하였다. Fig. 11에서는 시편의 부식발생 길이를 나타내고 있다.

4. 균열폭, 피복두께, w/c를 고려한 균열부 콘크리트의 HPC 변화 분석

4.1 균열폭과 HCP의 관계

이 절에서는 Table 4에서 도출된 HCP의 평균값을 이용하여 균열폭의 변화와 HCP의 상관성을 분석하도록 한다. 균열이 발생하면 많은 연구결과에서 염화물 유입증가와 이에 따른 부식증가를 보고하고 있다.^{4,7)} 그러나 HCP 측정단자에서도 접지조건이 다를 수가 있다. 특히 균열폭이 큰 경우는 균열내의 습도조건이 다르므로 습도에 민감한 HCP의 경향에 영향을 줄 수 있다.²³⁾ 그러나 현장조건에서 HCP를 적용시 균열을 보수하지 않고 직접 측정하므로 이를 고려하여 이 연구에서는 균열부를 건전부와 같은 조건으로 측정하였다. 균열폭에 대한 접지조건 및 내부 습도조건에 대한 연구는 추가적으로 할 필요가 있다고 판단된다. 이 실험에서 균열폭이 0.0~1.51 mm로 변하는 동안의 평균 전위값은 Table 7에 정리하였다.

Table 7의 결과를 이용하여 균열폭에 대한 HCP의 변화를 회귀분석하면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$HCP_{ref} = 219.6e^{0.208w}, R^2=0.886 \quad (1)$$

여기서, HCP_{ref} 는 기준이 조건 (w/c 0.55, 피복두께 30 mm)에서의 HCP(-mV)를 의미하고 w 는 균열폭(mm)을 나타낸다. 회귀분석 결과와 평균화된 HCP를 Fig. 12에 나타내었다.

4.2 피복두께 및 w/c와 HCP의 관계

기준이 되는 HCP의 회귀분석 결과에 피복두께와 w/c 영향인자를 고려하도록 한다. 이를 위해 균열이 없는 RC 보 시편의 피복두께와 w/c의 변화에 따른 HCP의 변화를 분석하도록 한다. Table 8에서는 피복두께와 w/c 변화에 따른 평균 HCP의 측정 결과를 나타내었는데, Table 5 및 6의 결과를 평균한 것이다.

먼저 w/c 0.55와 30 mm의 피복두께를 기준으로 하여

Table 7 Averaged HCP with crack width (w/c 0.55 and cover depth 30 mm)

w/c	Cover depth (mm)	Crack width (mm)	Averaged HCP (-mV)
0.55	30 mm	0	242
		0	210
		0	221
		0.51	235
		0.54	253
		1	254
		1	256
		1.5	302
		1.51	318

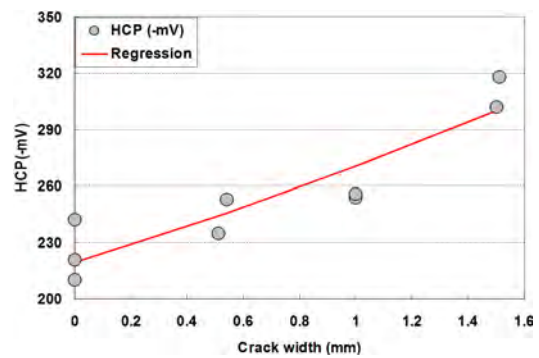


Fig. 12 Averaged HCP and crack width (w/c 0.55 and cover depth 30 mm)

Table 8 HCP variation with cover depth and w/c ratio in RC beam (without crack)

w/c	Cover depth (mm)	Measured HCP (-mV)			Average (-mV)
0.35	30	122	151	178	150
	10	350	352	400	367
0.55	30	242	210	220	224
	60	132	148	150	143
0.70	30	400	412	420	411

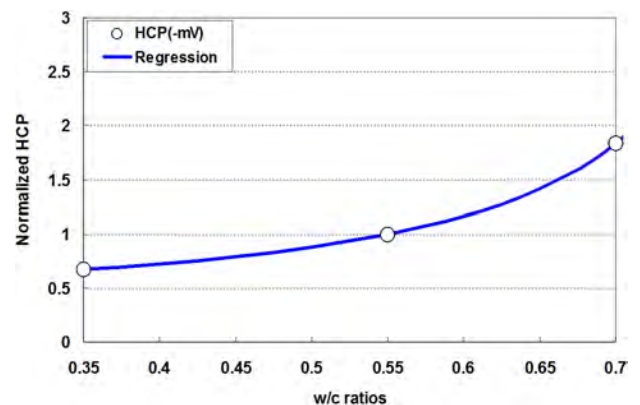


Fig. 13 Normalized HCP with w/c variation

식 (1)을 제안하였으므로 w/c 의 변화에 대한 영향을 분석하기로 한다. w/c 의 변화에 따른 평균 HCP의 변화율을 도출하면 Fig. 13과 같이 나타낼 수 있으며 식 (2)같은 회귀분석식을 도출할 수 있다.

$$A_{w/c} = \frac{1}{[2.045 - 1.010(w/c) - 1.618(w/c)^2]}, R^2 = 0.98 \quad (2)$$

여기서 $A_{w/c}$ 는 물-시멘트비에 따른 HCP의 변화율을 나타낸다. 같은 방법으로 피복두께의 영향을 분석하면, Fig. 14와 같이 나타낼 수 있는데, 이 역시 w/c 0.55 그리고 피복두께 30 mm를 기준으로 정규화 한 것이다. 피복두께에 따른 증가율은 식 (3)과 같이 도출되었다.

$$A_C = 5.171C^{-0.497}, R^2 = 0.96 \quad (3)$$

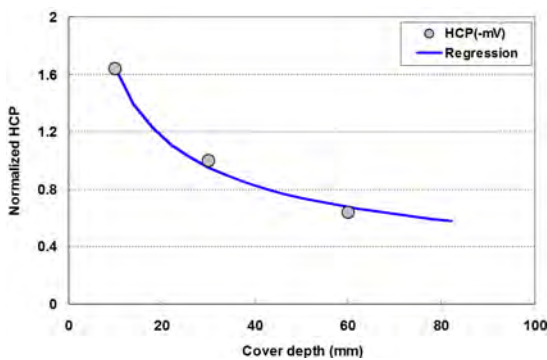
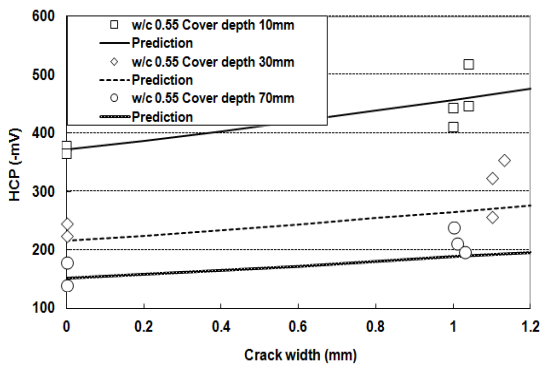
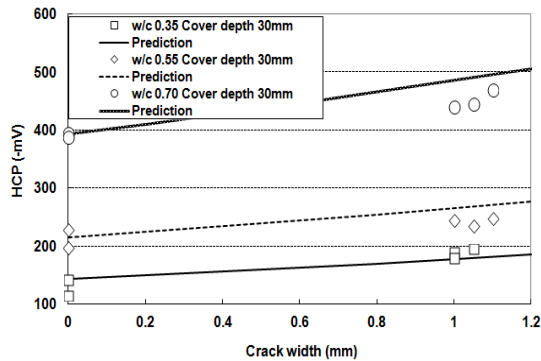


Fig. 14 Normalized HCP with cover depth variation



(a) HCP with varying crack width and cover depth



(b) HCP with varying crack width and w/c ratios

Fig. 15 Comparison with prediction and measurement of HCP

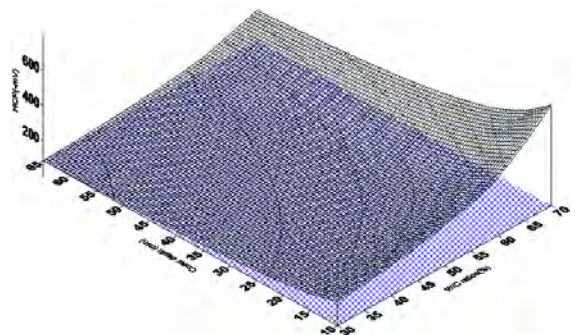
여기서, A_C 는 피복두께에 따른 HCP의 증가율, C 는 피복두께(mm)를 나타낸다.

균열부의 영향이 식 (2) 및 (3)에 독립적이라고 가정하면 피복두께와 w/c 를 고려한 균열부 콘크리트의 HCP 평가식을 제안할 수 있고 이는 식 (4)와 같이 나타난다.

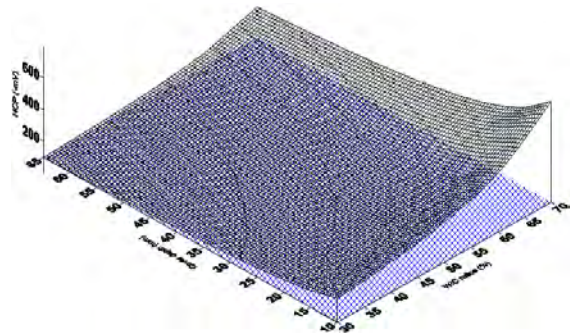
$$HCP_T = A_{w/c} \cdot A_C \cdot HCP_{ref} = \frac{219.6e^{0.208w} \cdot 5.171C^{-0.497}}{2.045 - 1.010w/c - 1.618(w/c)^2} \quad (4)$$

여기서, HCP_T (-mV)는 w/c , 피복두께, 균열폭을 고려한 HCP를 나타낸다.

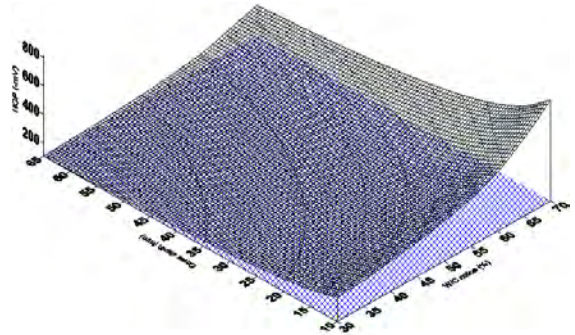
제안식 식 (4)의 검증을 위하여 w/c 가 다른 균열부 RC 시편을 대상으로 실험값과의 검증을 수행하였다. 동일 조건에 노출된 RC 보 시편을 대상으로 균열폭을 유도하였으며 검증을 수행하였다. Fig. 15(a)에서는 w/c 가 0.55로 일정한 경우 균열폭 및 피복두께의 변화에 따른 HCP



(a) Crack 0.0 mm



(b) Crack 0.5 mm



(c) Crack 1.0 mm

Fig. 16 HCP contours for various conditions

의 변화를 나타내고 있다. 제안된 식이 약간 낮은 값을 보이고 있지만, 콘크리트에 대한 HCP 측정 변동성을 고려하면 비교적 측정값의 경향을 잘 모사하고 있다. Fig. 15(b)에서는 피복두께가 30 mm로 일정한 경우에 w/c 및 균열폭의 변화에 따른 HCP의 변화를 나타내었는데, 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

식 (4)를 이용하여 3차원의 다양한 결과를 도시할 수 있는데, w/c, 피복두께, 균열폭을 고려한 HCP contour를 Fig. 16에 도시하였다.

5. 염화물 침투해석 결과와의 비교

5.1 개요

이 절에서는 Fick의 법칙을 이용한 Life365 프로그램 을 이용한 결과와 이 연구에서 제안된 결과와의 비교를 나타내도록 한다. Life365를 염화물 침투 해석은 Fick의 2 법칙을 가정하여 철근에 유입된 염화물량이 임계염화물 (1.2kg/m³)을 넘으면 부식이 개시된다고 가정한다.²⁴⁾

물론 이러한 결정론적인 방법(deterministic approach)와 비파괴기법과 직접적인 비교는 어렵지만, 그 결과를 비교하는 것은 흥미로운 일이다. 실태조사 결과를 기반으로 결정론적인 방법과 확률론적인 방법(atochastic approach)을 비교한 연구에서도 도출된 내구수명 결과는 차이가 약간 있었지만 경향은 거의 비슷함을 알 수 있다.⁶⁾ ASTM (2009)에 의하면 -200 mV이상의 경우에는 부식이 발생하지 않는다고 제시하였는데, Table 9와 같다.²⁰⁾

5.2 해석조건

해석을 위한 조건은 촉진염해분무시험에서 모사된 시간인 9.4년의 침투기간을 가정하여 HCP 실험과 유사한

Table 9 ASTM suggestion of HCP and corrosion (ASTM, 2009)

Measurement	Corrosion probability
Less -200 mV	No steel corrosion
-200mV ~ -350 mV	Uncertain
Over -350 mV	Over 90% of steel corrosion

Table 10 Boundary conditions for Life355 analysis

Critical condition	1.2 kg/m ³ at steel location
Apparent diffusion coefficient (D_{ref})	$1.0 \times 10^{(-12.06 + 2.4w/c)} \cdot f(w) [m^2/s]$
Surface chloride content	3.0 kg/m ³ (250 m from seashore)
Temperature	15.0°C
Time exponent	$m=0.2$ (Type 1)
Time to build up	1 year
Duration time	9.4 year

환경조건을 가정하였다. 겉보기확산계수는 Life365에서 제공하는 w/c를 고려한 지수함수식(보통포틀랜드 시멘트 사용)을 사용하였으며,²⁵⁾ 표면염화물량은 콘크리트 시방서를 기준으로 동해안 해안가에서 250 m 떨어진 거리를 가정하였다. 또한 균열부 콘크리트의 확산거동을 모사하기 위해 겉보기확산계수의 균열폭을 고려하여 식 (5)와 같은 식을 확산계수에 사용하였다.⁶⁾ 표면염화물이 일정해지는 기간은 기존의 정보를 획득할 수 없으므로 1.0년으로 가정하였다. 이상의 해석을 통하여 임계염화물량에 도달하는 피복두께(염화물 침투깊이) 및 w/c와 -200 mV를 초과하는 조건의 피복두께 및 w/c를 비교하고자 한다. 해석을 위한 조건은 Table 10에 나타내었다.

$$D(w) = D_{ref}(31.61w^2 + 4.73w + 1) \quad (5)$$

여기서, $D(w)$ 는 균열부의 확산계수, D_{ref} 는 기준이 되는 확산계수, $f(w)$ 는 균열인자를 나타낸다.

5.3 해석 결과의 비교

임계염화물인 1.2 kg/m³까지 유입된 염화물이 진전되지 않기 위한 w/c, 균열폭, 피복두께에 대한 결과와 HCP의 식 (4)를 이용한 결과와의 비교를 수행하였다. 일반적인 균열폭 수준인 0.0~0.3 mm를 대상으로 하였으며, w/c는 0.35~0.65까지 고려하였다. Table 11에서는 Life365와 HCP의 제안식 (4)로 도출된 부식방지를 위한 피복두께를 정리하였으며, 그 결과를 Fig. 17과 18에 나타내었다.

건전부 콘크리트의 부식방지를 위한 조건을 Fig. 17에

Table 11 Required cover depth for prevention of steel corrosion

w/c and crack width (mm)	Required cover depth (mm)	
	Life365	HCP
0.35 (sound)	28	14
0.35 (0.1 mm)	38	15
0.35 (0.2 mm)	52	16
0.35 (0.3 mm)	68	17
0.45 (sound)	32	20
0.45 (0.1 mm)	53	21
0.45 (0.2 mm)	67	22
0.45 (0.3 mm)	87	23
0.55 (sound)	37	33
0.55 (0.1 mm)	67	34
0.55 (0.2 mm)	93	36
0.55 (0.3 mm)	118	37
0.65 (sound)	58	67
0.65 (0.1 mm)	92	69
0.65 (0.2 mm)	123	72
0.65 (0.3 mm)	153	75

6. 결 론

염해에 노출된 균열부 콘크리트의 반전위 평가를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 균열을 가진 RC 보 시편을 대상으로 촉진 염해분무 시험을 수행하였으며, HCP를 평가하였다. 일정한 품질(w/c 0.55, 피복두께 30 mm)에서 HCP는 균열폭이 0.50 mm에서 14~16%, 1.0 mm에서 24%, 1.50 mm에서 34~42%정도 증가하였다. 또한 내부철근의 부식깊이는 균열폭의 증가에 따라 비선형적으로 증가하였다.
- 2) 균열폭이 0.0 mm에서 1.0 mm정도로 증가할 때, 피복두께의 변화와 상관없이 모든 경우에 HCP의 크기는 증가하였다. 피복두께가 10 mm인 경우 증가율은 112~122%, 피복두께가 30 mm인 경우 증가율은 116~120%, 피복두께가 60 mm의 경우에는 166~200% 가량 증가하였다.
- 3) 피복두께 30 mm를 가진 조건에서 w/c 0.35인 경우는 1.0 mm 균열이 발생해도 HCP는 136 mV에서 147~151 mV로 큰 차이를 나타내지 않았다. 그러나 w/c 0.55인 경우는 171 mV에서 195~356 mV로, w/c 0.70에서는 301 mV에서 균열발생과 함께 412~439 mV로 상대적으로 크게 증가하였다.
- 4) 실험 결과를 기준으로 균열폭, w/c, 피복두께를 고려한 HCP 평가식을 제안하였으며, 제안식 결과와 Life365 해석을 통한 부식개시 조건을 비교하였다. 균열부에서는 큰 차이를 나타내었으며, 건전부에서는 변화하는 w/c에 대하여 비슷한 경향을 나타내었다. 특히 w/c 0.60이하 조건에서는 부식방지를 위한 최소피복두께(20~50 mm)가 두 기법에서 비슷하게 평가되었다.

감사의 글

이 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업(FRP hybrid bar를 활용한 해양항만구조물 수명향상 기술 개발)의 연구비 지원에 의해 수행 되었습니다

References

1. Broomfield, J. P., Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, *Investigation and Repair*, London: E&FN, 1997, pp. 1-15.
2. Song, H. W., Kim, H. J., Kwon, S. J., Lee, C. H., Byun, K. J., and Park, C. K., "Prediction of Service Life in Cracked Reinforced Concrete Structures Subjected to Chloride Attack and Carbonation," *6th International Congress on Global Construction: Ultimate Concrete Opportunities*, Dundee, Scotland, Cement Combinations for Durable Concrete, 2005, pp. 767-776.
3. Park, S. S., Kwon, S. J., and Song, H. W., "Analysis Technique for Restrained Shrinkage of Concrete Containing Chlorides," *Materials and Structures*, Vol. 44, No. 2, 2011,

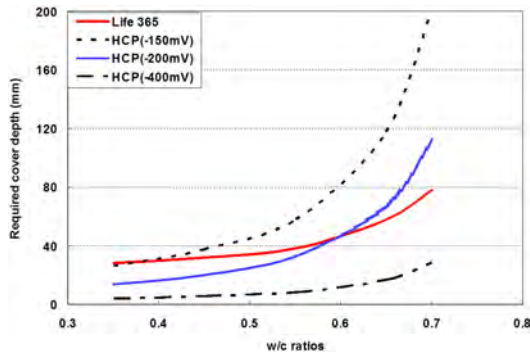


Fig. 17 Required cover depth for preventing steel corrosion in sound concrete

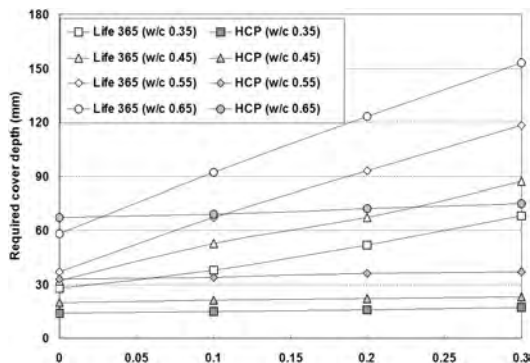


Fig. 18 Required cover depth for preventing steel corrosion in cracked concrete

나타냈는데, Life365를 통한 안전 피복두께는 w/c가 0.35에서 0.60로 증가할 때, 28~43 mm의 범위를, HCP를 통한 도출식은 14~44 mm의 범위를 나타내었다. w/c 0.60까지는 Life365가 좀 더 보수적인 피복두께를 보이고 있으며, w/c 0.60 이상에서는 HCP제안식이 높은 피복두께를 요구하고 있다.

Fig. 18에서는 균열폭이 0.1 mm 이하로 작을 경우 HCP를 이용한 결과와 Life365로 도출한 결과가 비교적 큰 차이가 없지만, 균열이 증가할수록 큰 차이를 보이고 있다. 많은 이유가 있지만, 1) 각각의 평가방법과 내구한계상태가 다른 점, 2) HCP를 고려한 식의 경우 HCP의 증가가 균열폭에 민감하지 않음 점, 3) 콘크리트 재료의 불균일성으로 인한 HCP 실험오차, 4) SST실험을 통한 HCP식과 실태조사를 통한 Life365 해석의 차이점, 5) 부식 임계시점의 설정(1.2 kg/m³)과 이에 따른 실질적인 부식개시의 차이 등으로 요약할 수 있다. 그러나 두가지 해석에서 모두 건전부에 대해서는 w/c 0.6 조건에서 거의 비슷한 부식방지를 위한 피복두께를 제시하였다.

이 연구에서 대상으로 하는 균열폭은 1.0 mm 이상의 큰 균열이 대부분이었으나, 좀 더 미세한 균열을 유도하여 부식방지를 위한 피복두께를 제안할 필요가 있다. 또한 이와 관련된 허용균열폭에 대해 비파괴 기법을 이용한 결과를 반영하여 염해노출 콘크리트의 유지관리 및 설계방안으로 활용할 필요가 있다.

- pp. 475-486. (doi: <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-010-9642-4>)
4. Song, H. W., Kwon, S. J., Byun, K. J., and Park, C. K., "Predicting Carbonation in Early-Aged Cracked Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, No. 5, 2006, pp. 979-989.
 5. Kwon, S. J. and Na, U. J., "Prediction of Durability for RC Columns with Crack and Joint under Carbonation Based on Probabilistic Approach," *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Vol. 5, No. 1, 2011, pp. 11-18. (doi: <http://dx.doi.org/10.4334/IJCSM.2011.5.1.011>).
 6. Kwon, S. J., Na, U. J., Park, S. S., and Jung, S. H., "Service Life Prediction of Concrete Wharves with Early-Aged Crack: Probabilistic Approach for Chloride Diffusion," *Structural Safety*, Vol. 31, No. 1, 2009, pp. 75-83.
 7. Park, S. S., Kwon, S. J., and Jung, S. H., "Analysis Technique for Chloride Penetration in Cracked Concrete Using Equivalent Diffusion and Permeation," *Construction and Building Materials*, Vol. 29, No. 2, 2012, pp. 183-192.
 8. Park, S. S., Kwon, S. J., Jung, S. H., and Lee, S. W., "Modeling of Water Permeability in Early Aged Concrete with Cracks Based on Micro Pore Structure," *Construction and Building Materials*, Vol. 27, No. 1, 2012, pp. 597-604.
 9. Aldea, C. M., Ghandehari, M., Shah, S. P., and Karr, A., "Estimation of Water Flow Through Cracked Concrete Under Load," *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 5, 2000, pp. 567-575.
 10. Alonso, C., Andrade, C., and González, J. A., "Relation between Resistivity and Corrosion Rate of Reinforcements in Carbonated Mortar Made with Several Cement Types," *Cement and Concrete Research*, Vol. 18, No. 5, 1988, pp. 687-698.
 11. Lim, Y. C., "A Study on the Estimation of Moisture Condition of Concrete by Resistivity Method," *Journal of Korea Architecture Institute*, Vol. 28, No. 12, 2012, pp. 69-76 (in Korean).
 12. So, H. S., "Environmental Influences and Assessment of Corrosion Rate of Reinforcing Bars Using the Linear Polarization Resistance Technique," *Journal of Korea Architecture Institute*, Vol. 22, No. 2, 2006, pp. 107-114 (in Korean).
 13. Liu, T. and Weyers, R. W., "Modeling the Dynamic Corrosion Process in Chloride Contaminated Concrete Structures," *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No. 3, 1998, pp. 365-379.
 14. Elsener, B., "Corrosion Rate of Steel in Concrete- Measurements beyond the Tafel Law," *Corrosion Science*, Vol. 47, No. 12, 2005, pp. 3019-3033.
 15. Baek, S. H., Xue, William, Feng, M. Q., and Kwon, S. J., "Nondestructive Corrosion Detection in RC through Integrated Heat Induction and IR Thermography," *Journal of Non Destructive Evaluation*, Vol. 31, No. 2, 2012, pp. 181-190. (doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s10921-012-0133-0>)
 16. Kwon, S. J. and Park, S. S., "Non Destructive Technique for Steel Corrosion Detection Using Heat Induction and IR Thermography," *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 16, No. 2, 2012, pp. 40-48 (in Korean).
 17. Maierhofer, C. H., Arndt, R., Rllig, M., Rieck, C., Walther, A., Scheel, H., and Hillemeier, B., "Application of Impulse-Thermography for Nondestructive Assessment of Concrete Structures," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 28, No. 4, 2006, pp. 393-401.
 18. Song, H. W., Lee, C. H., and Lee, K. C., "A Study on Corrosion Potential of Cracked Concrete Beam according to Corrosion Resistance Assessment," *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 97, No. 1, 2009, pp. 97-105 (in Korean).
 19. Elsener, B., Andrade, C., Gulikers, J., Polder, R., and Raupach, M., "Hall-Cell Potential Measurements-Potential Mapping on Reinforced Concrete Structures," *Materials and Structures*, Vol. 36, No. 7, 2003, pp. 461-471. (doi: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02481526>)
 20. ASTM C876-09, *Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*, 2009, pp. 1-6.
 21. Kim, K. B., *A Study on Allowable Crack Width of Reinforced Concrete Flexural Beam Subjected to Corrosive Environment*, Yonsei University, Dissertation of MS, 2001, pp. 35 (in Korean).
 22. Lee, H. S. and Kwon, S. J., "An Experimental Study on Carbonation Velocity in Cracked Concrete," *Journal of Chungwoon University Construction and Environmental Research Institute*, Vol. 7, No. 1, pp. 1-11.
 23. Leelalerkiet, V., Kyung J. W., Ohtsu, M., Yokota, M., and Yokota, M., "Analysis of Half-Cell Potential Measurement for Corrosion of Reinforced Concrete," *Construction and Building Materials*, Vol. 18, No. 3, pp. 155-162.
 24. Thomas, M. D. A. and Bentz, E. C., *Computer Program for Predicting the Service Life and Life-Cycle Costs of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides*, Life365 Manual, SFA, 2002, pp. 12-56.
 25. Korea Concrete Institute, *Concrete Standard Specification-Durability Part*, 2004, pp. 25-86 (in Korean).

요 약 철근부식을 현장에서 평가하기 위해 다양한 부식측정방법이 있으나, 반전위(HCP: half cell potential)방법이 많이 사용되고 있다. 균열이 발생한 RC 구조물은 균열쪽으로 유입되는 염화물, 이산화탄소 등에 의해 부식이 가속화 된다. 이 연구는 염해에 노출된 균열을 가진 RC 보의 HCP를 측정하여 부식정도를 평가하는데 목적이 있다. 이를 위해 세가지 물-시멘트비(w/c 0.35, 0.55, 0.70)와 다양한 피복두께(10~60 mm)를 가진 RC 보를 제조하였으며 하중을 가하여 균열폭을 0.0~1.5 mm로 유도하였다. 35일간 촉진염해분무시험을 통하여 부식을 촉진하였으며 이후 HCP과 부식길이를 평가하였다. 균열이 클수록, w/c가 높을수록, 피복두께가 작을수록 HCP은 증가하였으며, 각각의 영향인자를 정량화하여 균열을 가진 RC 보의 HCP 평가식을 도출하였다. 또한 Life365 프로그램을 이용하여 부식방지 피복두께를 도출하고 HCP평가식을 통한 부식방지 피복두께와 비교하였다. 균열부 콘크리트에서는 차이가 발생하였으나, w/c 0.6이하의 건전부 콘크리트에서는 두가지 방법에서 모두 근접한 부식저항 조건을 도출하였다.

핵심용어 : 철근부식, 반전위 측정, 균열, 콘크리트, 피복두께