철근 부식 방식을 위한 굳지 않은/굳은 콘크리트의 전기방식 적용에 관한 연구

The Inhibitive Effect of Electrochemical Treatment Applied to Fresh/hardened Concrete

김 성 옥¹⁾ 문 재 흠²⁾ 안 기 용^{3)*}
Sung-Wook Kim Jae-Heum Moon Ki-Yong Ann

Abstract

In this study, the inhibitive effect of electrochemical treatment subjected to fresh and hardened concrete and literature reviews in terms of the treatment were performed. In hardened concrete, chloride ions are mixed during casting to destroy the passivity of steel, and then the current was provided for 2 weeks with 250, 500 and 750 mA/m². After completion of electrochemical treatment, the extraction of chloride ions was quantified and repassivation of steel was observed. Simultaneously, the equated levels of current density for 2 weeks were applied to fresh concrete. Steel-concrete interface in concrete was observed by BSE image analysis and the concrete properties in terms of the diffusivity of chloride ions and the resistance of steel corrosion was measured. As the result, electrochemical treatment is very effectiveness to rehabilitate the passive film on the steel surface and 63-73% of chloride ions in concrete were extracted by the treatment. As the treatment was applied to fresh concrete, the resistance of steel corrosion was improved due to the densification of Ca(OH)₂ layers in the vicinity of steel. However, an increase in the current density resulted in an increase in surface chloride content of concrete.

Keywords : Electrochemical treatment, Steel corrosion, Chloride ions, BSE image analysis, Concrete, Ca(OH)₂

1. 서 론

전기 방식은 다양한 목적을 가지고 부식 환경에서 콘크리트 철근을 보호하기 위하여 음극 보호법, 염소이온 추출법과 재알칼리화법이 적용되고 있다. 전기 방식은 외부 양극부와 철근 사이의 직류 전류를 공급하는 방식으로 전기방식의 메커니즘은 Fig. 1과 같다. 전기 방식을 적용함에 있어서 콘크리트내의 공극수는 전해질로 전류의 흐름을 원활하게 해주는 역할을 하게 된다. 전기 공급 장치를 통해 공급되는 전자는 염소, 수산화 그리고 탄산과 같은 음이온을 콘크리트 표면으로 이동시키는 반면, 칼슘, 나트륨 그리고 칼륨과 같은 양이온은 철근으로 이동시켜준다. 실제로 지난 수십 년 동안 염해나 탄산화에 의해 콘크리트 내 부식된 철근 보수 방법으로 전기방식을 널리 이용되고 있는 실정이다.

기존의 전기 방식에서 변형된 전기 방식이 실험적으로 제

Fig. 1 Mechanism of electrochemical treatment

1) 정회원, 한국건설기술연구원 선임위원, 공학박사

2) 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원, 공학박사

3) 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 교수, 공학박사, 교신저자

* Corresponding author : kann@hanyang.ac.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2013년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 2013년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

안되고 있는데, 예를 들어 간헐적 음극 보호법의 경우 부식을 일으키는 인자들의 농도를 확인하여 부식의 정도/가능성에 따라 방식전류를 통전하거나 중단하여 방식 효과를 극대화시키는 방법이다 (Hassanein et al., 1999). 현재 전기 방식에 대한 새로운 기술이 활발하게 연구가 되고 있으며, 특히 타설 직후 굳지 않는 상태에서의 전기 방식을 적용하는 것이 철근 부식저항성을 더 향상시킨다고 보고되고 있다 (Ann, 2005). 기존 연구에서 보면, 철근 표면에서의 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 층은 콘크리트 탄산화나 염소이온 침투에 따른 철근의 부근에서의 pH 저하를 완화시켜준다고 알려져 있다. 그러므로 풍부한 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 층은 철근 부식 개시를 늦추는 역할을 하게 된다. 게다가 굳지 않는 콘크리트에 전기 방식을 적용하였을 때, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 낮은 방식 전류 통전에도 철근표면에 조밀하게 분포한다 (Jung et al., 2012).

본 연구에서는 문헌 고찰 및 실험을 통하여 굳은/굳지 않는 콘크리트에서의 전기 방식 적용에 따른 철근 방식 효과에 대하여 비교하여 방식 전류양과 철근 부식 저항성의 관계 도출하고 최적 방식전류 구하는 것이 본 연구의 목적이다. 본 연구는 굳은/굳지 않는 콘크리트에 적용된 방식 전류는 250, 500, 750 mA/m^2 으로 2주동안 철근표면에 통전하였다. 굳은 콘크리트의 경우, 부식을 촉진시키기 위하여 배합수에 염소 이온을 혼입하여 시편을 제작하였으며, 동시에 전기 방식 적용에 따른 염소이온 추출 효과에 대하여 정량화 하였다. 굳지 않는 콘크리트의 전기방식에서는 후광산란 이미지 분석법을 이용하여 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 층의 형성 및 수화 생성물의 변화를 관찰하고, 철근 부식저항성에 대한 임계 염화물량과 염소 이온 침투 속도에 대해서 측정하였다.

2. 전기 방식법의 이론적 고찰

2.1 음극 방식법

음극방식은 현재 콘크리트내의 철근 방식을 위해 적용되는 가장 일반적인 방식법으로 희생 전극이나 외부전원 방식을 써서 부식이 진행되는 철근에 전자를 공급하여 철근표면의 부동태를 복원시킬 수 있는 장점이 있다. 희생 전극을 이용한 음극 방식법은 낮은 콘크리트의 전기저항성 때문에 습윤 상태의 콘크리트에 적용을 해야 하는 제한성을 가지고 있다. 그에 반해 외부전원 방식을 사용하는 경우 지속적인 방식을 진행하는데, 이때 방식 전류는 10-30 mA/m^2 으로 통전시킨다. 대표적으로 Broomfield 등은 탄산화나 염해를 받

기 쉬운 해안 구조물이나 빌딩에 음극 방식을 적용하였을 때의 그 효율성에 대해서 확인 하였다 (Broomfield et al., 1987). Vrabie (1975)은 전기 통전을 통한 음극 방식에 의해 부식이 감소하는 것을 확인 하였는데, 부식전위가 -770 mV에서 부식이 더 이상 진전되지 않고, -1170 mV에서는 수소가스 발생이 일어나는 것을 확인하였다.

2.2 탈염 기법

전기화학적 탈염 기법은 염화물에 의한 부식이 쉬운 철근 콘크리트 구조물 보수를 위해 1970년대에 개발된 기법이다 (Slater et al., 1976). 탈염 기법의 원리는 콘크리트내의 철근과 외부 양극재 사이에 높은 전압 (220V)의 직류 전류를 통하게 하여 철근으로부터 염화물 이온을 떨어지게 하는 것이다. 콘크리트 외부 표면에 양극재로 티타늄 메쉬를 사용하고, 전해질 용액을 이용하여 통전시킨다. 그리고 전류 밀도는 1~2 mA/m^2 를 사용하며, 통전기간은 6-10 주로 다양하게 적용한다.

탈염 기법의 효율성에 대한 여러 연구가 진행되고 있는 실정이다. Arya et al. (1996)은 통전 전압을 10~30 V를 사용하였으며, 전압이 증가할수록 탈염 효과가 증가하는 것을 확인 하였다. Marcotte et al. (1999a)은 8.37 A/m^2 전류를 8주 동안 통하게 한 후 철근과 콘크리트 표면에서 염화물 이온의 제거로 인하여 염화물에 의한 부식이 저지되는 것을 확인 하였다.

하지만 탈염 기법 적용에 따른 단점으로는 공극구조의 변화와 수산화 이온의 농도가 증가하는 것이다. 수산화 이온의 농도가 철근-콘크리트 계면에서 증가하는 것을 확인 하였다 (Marcotte et al., 1999b; Tritthart, 1996). 이러한 현상은 콘크리트 내에서 세공용액의 높은 pH 환경 유지하여 부식 방식에 대한 긍정적인 효과를 가지는 반면에, 수산화 이온의 생성은 염화물 이동을 감소시키게 되고, 그로 인해 탈염기법의 효율성을 저하시키는 요인이 된다.

2.3 재알칼리화법

재알칼리화 기법은 1980년대 후반에 개발된 기법으로 탄산화에 의한 부식이 발생되기 쉬운 철근-콘크리트 구조물에 적용하기 쉬운 보수 기법이다. 재알칼리화 기법의 주요 원리는 전류 공급을 통해 알칼리 용액을 콘크리트의 공극 구조로 들어가게 하여 중성화된 콘크리트의 알칼리도는 높여주는

Table 1 Outline of experiment

Experiment type	Specimen types	Current density (mA/m ²)	Duration	Measurement
Fresh concrete	Mortar	250,500,750	2 weeks	BSE Image analysis
	Concrete			Chloride transport Corrosion resistance
Hardened concrete	Concrete	250,500,750	2 weeks	Flexure strength Chloride extraction

Table 2 Mix design for mortar and concrete

Experiment type	Specimen type	W/C	Unit content (kg/m ³)				Super plasticizer
			W	C	S	G	
Fresh concrete	Mortar	0.45	260.4	578.6	1417.6		0.2% of cement wt.
	Concrete	0.45	143.5	318.9	781.3	1189.5	
Hardened concrete	Concrete	0.40	129.6	324.1	794.0	1208.9	

것이다.

재알칼리화 기법에 대한 여러 연구가 보고 되고 있으며, Mattila et al. (1996)은 1 M 탄산나트륨 용액과 1 A/m² 전류를 각각 3일과 6일 동안 적용한 시험에서 나트륨 이온의 농도가 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 재알칼리화 기법을 적용한 시편 내의 나트륨의 농도는 10 kg/m³ 이상인 반면에 재알칼리화 기법을 적용하지 않는 일반 시편의 경우 2-3 kg/m³로 훨씬 적게 나타났다. Sergi 등은 철근 부근에서의 pH 프로파일을 얻기 위해서 다양한 pH 지시약을 사용하였으며, 콘크리트 표면에서 30 mm 지점의 pH가 12.5에서 13으로 증가되는 현상을 보였다. 나트륨계열의 알칼리 용액 대신에 수산화 리튬 용액이 나트륨이나 칼륨이 존재하는 경우 알칼리 실리카 반응성에 대한 위험을 줄여준다고 하였다 (Sergi, 1996).

하지만, 아직 재알칼리화 기법을 적용한 콘크리트의 내구성에 대한 장기적 효과에 대한 연구는 기법 적용에 대한 상대적으로 짧은 역사 때문에 아직 미비하다고 할 수 있다.

3. 실험계획 및 방법

3.1 실험 계획

3.1.1 시편 조건

본 연구에서는 전기 방식 적용을 굳지 않는/굳은 콘크리트 2가지 형태로 나누어 실험을 실시하였다. 일반적인 경우에서 실험을 실시하기 위해, 1종 보통포틀랜드 시멘트 (Ordinary Portland Cement; OPC)가 사용되었다. 평가 방법에 따라 시편을 모르타와 콘크리트로 각각 나누어 제작하였으며, Table 1에서는 모르타와 콘크리트 시편에 대한 배합을 나타내었고,

Table 3 Properties of aggregate

Type	Density (kg/m ³)	F.M.
Sand	2,550	2.57
Gravel	2,650	6.72

잔골재와 굵은골재의 물리적 성능은 Table 2에 나타내었다. Table 3에서는 전기방식을 적용한 콘크리트의 분석 평가를 위한 각 실험에 대한 개요를 나타내었다.

3.2 실험 방법

3.2.1 BSE 이미지 평가

본 절에서는 굳지 않는 콘크리트의 철근계면에서의 공극 및 수화물 분포를 조사하기 위해 후광산란 (Backscattered electron; BSE) 이미지 촬영을 실시/분석하였다. 시편 추출 단계에서 발생할 수 있는 균열 및 계면 파괴를 최소화하기 위해 굵은 골재를 제외한 모르타를 이용하여 시편을 제작하였다.

시편은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 직경 50 mm, 높이 80 mm의 모르타 시편에 30 mm 폭의 철리본 (Steel ribbon)을 중앙에 배치하고, 양극재로 티타늄 메쉬를 모르타 몰드에 설치하여 제작하였다. 모르타의 타설 직후 250, 500, 750 mA/m²의 방식전류를 2주간 통전시켰다. 전기 방식 적용 직후 모르타 시편은 추가적인 2주간의 양생을 거쳐 미세구조분석을 위한 사이즈인 50×50×100 mm의 크기로 절단하여 제작하였다.

BSE 이미지 촬영을 위하여 추출된 시편은 전처리 과정을 거쳐 JEOL 5410LV SEM을 통해 BSE 이미지 촬영을 실시하였다. BSE 이미지 촬영 모르타 시편은 이미지 촬영 시 제반조건은 가속전압 20 kV; 촬영거리 15 mm; 전자총의 지름

Fig. 2 Experimental set-up for microscopic analysis of the steel-mortar interface

12; 렌즈전류 $66\mu\text{A}$ 로 하였다. 이미지 촬영 시 정확한 초점을 위해 배율은 $\times 5000$ 배로 하여 초점조정 후, $\times 500$ 배의 철근계면을 포함한 BSE 이미지를 촬영하였다. BSE 이미지는 공극 및 수화물 분포의 계산을 위해 디지털 이미지로 전환하였다. 이미지 모서리부는 이미지 계산상 오류를 범하는 경우가 있어 디지털화 된 이미지에서 제거하였다. 디지털화 된 이미지의 크기는 1940×1455 pixel로 정량적 크기는 $240 \times 180 \mu\text{m}$ 이다. 하나의 pixel 크기는 $0.1237 \mu\text{m}$ 의 해상도를 가진 이미지를 촬영하도록 하였다.

3.2.2 갈바닉 전류에 의한 확산계수 산정

굳지 않는 콘크리트의 전기 적용 후 염소이온 이동 특성 및 갈바닉 전류를 측정하기 위하여 콘크리트 시편은 $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$ 의 각주형 몰드에 $\Phi 20 \text{ mm}$ 의 연강을 시편 중앙에 위치하게 제작하였다. 철근 양단에는 시멘트 코팅을 한 후, 코팅 재료에 의한 부식을 막기 위하여 열 수축 마감재를 이용하여 다시 마감처리 하였다. 시편 탈형 후, 시편은 폴리에틸렌 필름을 이용하여 수분 증발을 차단하였고, $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 에서 28일간 상온양생을 실시하였다. 염소 이온 침투면의 콘크리트 피복 두께를 15 mm 를 확보하기 위하여 철근과 평행하게 시편을 절단하였다. 염소이온 1방향 확산을 유도하기 위하여 노출면을 제외한 나머지 면은 에폭시 레진 코팅을 실시하였고, 순수한 염화물 확산만 일어나게 하기 위하여 초기 1주일 동안 수중 양생을 실시 한 후, 25°C 에서 4 M NaCl 용액에 침지

Fig. 3 Schematic for corrosion monitoring for steel in concrete

시켰다.

갈바닉 전류 측정은 Fig. 3에서와 같이 실시하였다. 갈바닉 전류 측정을 위하여 철근 한쪽 끝과 외부 NaCl용액 수조에 침지시킨 외부 티타늄 메쉬사이 전기 회로를 구성하였다. 철근과 티타늄 메쉬 사이에 생성되는 전류는 데이터 로거를 이용하여 $10 \text{ k}\Omega$ 저항에 의해 발생하는 전위차를 매 6시간마다 결과를 모니터링 하였다.

모니터링 후 철근 부식 개시 시점에서의 침지된 시편의 염소이온 프로파일을 측정하여 콘크리트의 표면염화물량, 확산계수, 부식 임계염화물량을 측정하였다. 염소이온의 농도는 전위차 적정기를 이용하여 염소이온양을 ppm 단위로 측정하였으며, 결합재 당 중량비로 (%)로 다시 계산하였다. 확산계수는 측정된 프로파일값을 가지고 Fick의 제 2법칙을 이용하여, 각 깊이별 염화물 농도에 따른 확산계수를 회귀분석을 통해 신뢰도가 가장 높은 값을 확산계수로 산정하였다.

3.2.3 전기방식 적용에 따른 염소이온 프로파일링

피복 두께 25 mm 에 $\phi=16 \text{ mm}$ 의 철근 3개를 설치하여 $160 \times 160 \times 1000 \text{ mm}$ 의 철근 콘크리트 시편을 제작하였다. 콘크리트 타설 시 염소이온은 시멘트 중량 대비 2-5% 혼입하였다. 콘크리트 시편 탈형 후 28일간 습윤 양생실에서 28일간 양생 과정을 거쳤으며, 그 후 기건 상태에서 콘크리트 시편을 노출 시켰다. 전기 방식을 적용함에 있어서 콘크리트와 철근사이의 전기 흐름을 원활하게 하기 위하여 전해질로 리튬 붕산염 용액을 사용하였으며, 양극재로 콘크리트 표면에 티타늄 메쉬를 설치하였다. 일정 수준의 방식 전류를 유지하기 위하여 전압은 자동으로 보정하도록 하였다. 전기 방식 적용은 굳지 않는 콘크리트와 동일하게 실시하였다. 콘크리트 내의 염소이온 분포를 확인하기 위하여 염소이온의 농도

Fig. 4 Schematic for chloride extraction subjected to electrochemical treatment

는 콘크리트 표면에서부터 2 mm 간격으로 22 mm까지 각 구간에 대한 콘크리트 분말을 채취하였다.

그 후 전기 방식에 의한 콘크리트 내의 염소이온 추출 효과를 확인하기 위하여 전위차 적정기를 이용하여 총염소 이온 농도를 각 구간별로 측정하였다. 전기 방식 후, 염소이온 프로파일은 앞에서 언급한 바와 같은 방법으로 염소이온 농도를 측정하였다. 실험 결과의 재연성 확보를 위하여 같은 시편에서 2부분으로 나누어 측정을 실시하였다.

3.2.4 휨강도 특성

전기 방식 적용 후, 콘크리트 시편의 휨강도 측정을 통하여 구조 성능을 평가하였다. 전기방식 효과를 확인하기 위하여 전기방식 적용 유무를 변수로 설정하였다. 시편은 염소이온 추출 정량화에서 제작된 콘크리트와 동일한 시편을 사용하였다. 굽은 콘크리트 시편의 재하는 3점 재하 방법을 택하였으며, 변위제어로 초당 1.2 mm/s 속도로 재하를 실시하였다. 하중과 수직 변위에 대한 실험데이터 계측은 데이터 로거를 이용하였으며, 하중과 변위의 기록은 최대 하중의 30%에 도달하였을 때까지 측정하였다. 이때 실험에서 얻은 하중 결과를 이용하여 휨강도를 계산하였다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 BSE 이미지 분석에 의한 수화물 특성

Fig. 5는 철근 계면부의 BSE 이미지 중에서 공극 및 수화물 분포를 위한 미세 이미지 캡처의 예를 보여주고 있다.

BSE 이미지 촬영 시, Fig. 5에서와 같이 계면에서의 분석 이미지는 순수한 페이스트만 존재하는 부분을 촬영하였다. 캡처된 BSE 이미지는 철근계면에서부터 5 μm 간격으로 100 μm 까지 스트리핑을 실시하였다.

스트리핑된 이미지는 이미지 이원화 이후 수화물의 분포를 위한 이미지 판별에서 수화물의 히스토그램을 이용하여

Fig. 5 BSE Image capture to quantify porosity and hydration products at steel-concrete interface

Fig. 6 Defining strips away from the steel

미수화분말, 공극, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 에 대해서 정의하였다.

Fig. 7에서 알 수 있듯이 전기방식에 있어 방식전류 250, 500 mA/m^2 를 통전한 경우에는 철근 표면부에 해당하는 계면에서 공극의 양이 10% 이하로 감소함을 확인하였다. 특히 500 mA/m^2 의 방식전류를 통전하였을 경우 공극량은 철근표면으로부터 약 30 μm 까지 3-4%의 공극량을 보여줌으로써 전기방식에 의한 공극감소 효과를 뚜렷히 보여주고 있다. 또한 750 mA/m^2 를 통전 시켰을 때에는 철근 계면 및 표면부에서의 공극량이 약 90%를 상회한 값으로 실제로 철근과 콘크리트의 분리가 발생함을 확인할 수 있다. 이와 같이 철근과 콘크리트의 분리는 고전류 또는 고전압의 전기방식을 적용할 때 발생할 수 있는 것으로 판단된다. 즉 철근 계면부에 존재하는 공극수는 강알칼리 특성을 가지게 되며 이로 인해

Fig. 7 Distribution of porosity at the steel-concrete interface

Fig. 9 Distribution of Unhydrated grains at the steel-concrete interface

Fig. 8 Distribution of Ca(OH)_2 at the steel-concrete interface

물의 수소분해 또한 증류수와는 달리 약 1130 mV의 영역에서 발생하게 된다. 그러나 실제로 콘크리트의 비저항과 전기방식 적용 기간이 그리 길지 않고 전기적 접촉이 직접적으로 이루어지지 않은 점을 고려할 때 이보다는 약간 높은 전위에서 수소발생이 예상된다. 이와 같은 수소가스의 발생으로 인해 철근-콘크리트 계면의 분리현상이 발생하며 이는 콘크리트의 물성에도 악영향을 미칠것으로 판단된다.

Fig. 8에서는 철근과 콘크리트 계면에서의 수산화칼슘분포에 대해서 도시하였다. 수산화칼슘에 대해서도 250, 500 mA/m²의

통전의 경우 확연한 증가를 보이고 있다. 특히 250 mA/m²를 통전한 경우 수산화칼슘의 양이 약 15-20%까지 증가하는데 특히 계면부 20 μm 내에서의 증가가 두드러진다. 500 mA/m²의 통전의 경우에도 전반적으로 수산화칼슘의 증가가 보이고 있으며, 계면부 20 μm 내에서는 약 10% 정도의 수산화칼슘의 분포를 보이고 있다. 이는 철근계면부에서의 침전된 수산화칼슘의 증가로 염소이온의 침투 시 부식과정에서 발생하는 산에 대한 저항성을 가지게 되며 또한 수화물의 산화를 지연할 수 있는 역할을 하게 된다. 이로 인해 철근부식 저항성을 향상시킴으로써 철근에 대한 부식연장, 내구수명 확대를 꾀할 수 있을 것으로 판단된다. 이와 같이 방식전류의 양에 따라 철근계면부에서의 수산화칼슘의 침전 또한 변화하게 되는데 방식전류량이 가장 높은 경우인 750 mA/m²의 경우에는 수산화칼슘의 침전에 효과를 거두기 힘들것으로 판단된다.

Fig. 9에서는 철근-콘크리트 계면에서의 미수화분말의 분포를 나타내었는데, 750 mA/m²의 방식전류를 적용한 경우가 상대적으로 적은 미수화분말이 생성되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 방식 전류에 의한 철근 계면부에서의 열발생에 의한 수화도가 증가한 것으로 판단된다.

결국 전기 방식을 적용한 경우 계면부를 제외한 전반적인 수산화칼슘과 미수화분말의 양은 일정하나 공극의 경우에만 철근 표면부에서 매우 높은 분포를 보이고 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 10 The concentration of critical chloride subjected to electrochemical treatment with different current density

4.2 염소이온 침투 및 부식 저항성

전기 방식을 적용한 경우 철근 부식 저항성과 염소이온 이동 특성에 대해서 본 절에서는 평가하였는데, Fig. 10에서는 방식 전류에 따른 임계 염화물량에 대해서 나타내었다. 전기 방식을 적용한 경우의 모든 시편에서 전기 방식을 적용하지 않은 경우와 비교하였을 때, 임계 염화물량이 증가하는 것을 확인 할 수 있었지만, 750 mA/m²에서 더 낮은 방식 전류에 비하여 철근 부식 저항성이 덜 효율적인 것으로 나타났다.

750 mA/m²에서의 임계 염화물량의 증가는 전기 방식의 의한 증가 보다는 갇힌 공기가 적게 존재함으로써 생기는 효과라고 보여진다. 하지만 750 mA/m² 제외한 나머지 방식 전류 구간에서는 일정 갇힌 공기 양에서도 방식 전류가 증가함에 따라 부식 저항성도 비례하는 것을 확인 할 수 있다. 임계 염화물량은 250 mA/m²에서는 1.36-2.09%, 500 mA/m²에서는 1.88-2.46%이고, 750 mA/m²에서는 0.82-2.10%로 나타났다. 이 중 500 mA/m²의 방식 전류를 통전한 콘크리트 시편에서 보면, 계면 공극에 대한 영향이 가장 적은 것을 확인 할 수 있다.

전기 방식을 적용한 경우 콘크리트의 부식 개시 시점에서의 염소이온 이동 특성에서 대해서는 겉보기 확산 계수 및 표면 염화물량을 값을 가지고 나타내었다. Fig. 11에서 보면, 전기방식을 실시한 경우 확산계수가 전기 방식을 하지 않은

Fig. 11 Diffusion coefficient for chloride in concrete

Fig. 12 Surface chloride content for chloride in concrete

경우 보다 작아지며, 방식 전류량과 관계없이 나타나는 확인 하였다. 전반적인 확산 계수의 범위가 $11.25-4.18 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 나타났으며, 500 mA/m²의 방식전류를 통전하였을 경우에 가장 작은 확산계수값이 나타났다.

표면 염소이온의 경우 방식 전류가 증가함에 따라 표면 염소이온이 증가하는 것을 Fig. 12에서 확인 할 수 있었는데, 예를 들어 250 mA/m²의 방식 전류에서는 4.5-4.9%의 표면

염화물량을 가지는 반면에 750 mA/m^2 에서는 5.0-5.9%의 표면 염화물량이 존재하는 것을 확인 할 수 있다. 전기방식법을 적용한 경우에는 대부분의 경우에서 표면염소이온의 농도가 증가하는데 이에 대해서는 명확히 밝혀진 바가 없다. 다만 전기방식을 통해 콘크리트 내부에서 수산화칼슘의 침전량의 증가로 인해 추가적인 염소이온의 물리적 흡착에 의해 총염소이온의 농도가 증가한 것으로 예상된다. 하지만 전반적으로 보면 전기방식을 적용한 경우 콘크리트의 내구수명 연장에 유리하다고 판단되며, 그 효과는 500 mA/m^2 의 방식 전류를 적용하였을 때가 가장 크다고 판단된다.

4.3 염소이온 추출의 정량화

굳은 콘크리트에 전기 방식을 적용한 경우 Fig. 13에서 보는 바와 같이 콘크리트 내부의 염소이온 농도가 급격하게 감소하는 것을 확인 할 수 있었다. 우선, 전기 방식을 적용하지 않는 경우의 염소이온 농도에서도 혼입한 염소이온 양과 동일하게 나타나지 않는 것을 확인 할 수 있었다. 예를 들어, 시멘트 중량 대비 5%의 내재 염소이온을 콘크리트에 혼입한 경우, 측정값에서는 그 보다 낮은 3.34-4.89%의 염소이온 농도가 측정되었다. 이는 염소이온 고정화나 콘크리트 분말 채취시 골재가 혼입되어 염소 이온의 농도가 과소평가된 것으로 판단된다 (Song et al., 2008). 그럼에도 불구하고, 염소이온의 농도가 모든 구간에서 1.5% 이하로 측정되어 콘크리트에서부터 대략 72% 정도 추출되었기 때문에, 전기 방식을

적용한 경우 콘크리트내 염소이온이 감소한 것은 분명한 사실이다. 하지만, 전기 통전은 콘크리트 내의 자유 염소이온에만 영향을 미치기 때문에, 고정화된 염소이온의 추출은 제한적일 수밖에 없고 이는 추출 능력의 한계로 나타난다. 그리고 방식전류와 상관없이 염소 이온의 추출 비가 일정하게 나타나는 것을 확인 하였다. 일반적으로 전기 방식 적용시 현장에서 방식 전류는 1000 mA/m^2 이상을 선호하는데, 이는 높은 방식 전류/전압에서 수소 방출로 인한 철근 부식 강도의 저하와 같은 부정적 영향을 고려하지 않은 상태에서 방식 전류가 과하게 적용되고 있다고 판단된다.

4.4 전기 방식 적용에 따른 구조 영향성 평가

Fig 14에서 보는 바와 같이, 전기 방식 적용이 콘크리트 구조성능에 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 전기 방식을 적용하지 않는 콘크리트의 초기 휨 강도는 $22.2\text{-}24.8 \text{ N/mm}^2$ 인 반면, 전기 방식을 적용한 콘크리트의 경우 $22.4\text{-}24.4 \text{ N/mm}^2$ 의 휨강도가 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 실제 콘크리트 내의 철근 부식은 철근-콘크리트 계면의 부착 저하와 철근 단면 감소로 인한 구조 성능 저하가 발생하기 때문에, 전기 방식을 통한 구조성능 저하에 대한 보상은 제한적일 수밖에 없다. 다시 말해서, 부동태피막 복원화 과정이 발생 하여도 철근 인장 강도 능력이 회복 되지 않기 때문에, 철근 부식이 일어난 경우 부동태피막의 복원은 철근의 인장 능력 회복과는 관련이 없다. 게다가 전기 방식 적용에서의 방식 전류는

Fig. 13 Extraction of chloride ions from concrete using the electrochemical treatment

Fig. 14 Flexure strength for hardened concrete applied to electrochemical treatment

콘크리트의 휨강도에 영향을 주지 않았다. 전기 방식은 전자를 통전하는 것과 염소이온 추출에 의한 철근 표면의 부동태 복원화에 대한 이점이 있지만, 그로 인한 구조적 성능 향상에는 영향을 미치지 않는다고 가정 할 수 있다. 본 연구에서는 염소이온이 내재 되지 않는 콘크리트의 휨 강도는 측정되지 않아 콘크리트 내의 철근 부식 발생 여부 또는 부식 정도에 따른 구조성능과 전기방식 사이의 직접적인 상관관계를 찾아내지 못하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 굵은/굵지 않은 상태의 콘크리트에 전기방식을 적용하였을 때, 통전 전류에 따른 미세구조 변화, 염화물 이동 및 부식 저항성, 염소이온 추출 능력 및 구조 성능 평가를 실시하였으며, 결론은 다음과 같이 얻었다.

- (1) 전기방식법을 적용할 경우 철근표면부에서도 공극의 감소를 나타내는데 이는 표면부에 수산화칼슘의 침전에 의한 것으로 수산화칼슘의 침전량이 약 10% 이상으로 증가한 반면 공극은 5% 이하로 감소하였다. 그러나 방식전류 750 mA/m² 이상의 경우에는 오히려 급격한 공극의 증가를 보이는데 이는 고전압에 의한 수소가스의 발생에 기인한 것으로 분석되었다.
- (2) 전기방식을 실시한 경우 확산계수는 감소한 반면 표면 염소이온 농도는 증가하는 경향을 보였다. 특히 확산계수의 증가는 전기방식을 실시한 경우 일정수준으로 감소한 후 전류량에 상관없이 일정하게 유지된 반면 표면염소이온농도는 방식전류량에 비례하여 증가하였다.
- (3) 굵은 콘크리트의 내재 염소이온은 전기 방식을 통하여 추출 될 수 있음을 확인 하였고, 그 값은 대략 72% 정도가 추출되는 것을 측정하였다. 하지만 염소이온의 추출 비가 방식 전류의 값에 비례하지 않는다는 것은 본 연구에서 확인하였기 때문에 과도한 방식전류의 사용은 오히려 콘크리트의 구조성능 저하에만 영향을 미칠 것으로 판단된다.
- (4) 본 연구에서의 구조성능 평가는 휨강도에 대해서 평가를 하였고, 일정 방식전류의 사용은 휨강도에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 일반적으로 전기방식을 적용하였을 때, 철근-콘크리트 사이의 계면이 약해짐으로 인해 구조성능이 저하된다고 하고 있지만 본 연

구에서는 방식 전류에 따른 구조 성능 저하는 확인 할 수 없었다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업 (해양 콘크리트 성능향상 기술 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

1. Ann, K. Y., Enhancing the chloride threshold level for steel corrosion in concrete, Unpublished Ph.D. diss, Imperial College, Department of Civil and Environmental Engineering, 2005.
2. Arya, C., Said-Shawqi, Q. and Vassie, P. R. W., "Factors influencing electrochemical removal of chloride from concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 6, 1996, pp.851-860.
3. Broomfield, J. P., Langfor, P. E. and Mcanoy, R., "Cathodic protection for reinforced concrete: its application to buildings and marine structures", Corrosion of Metals in Concrete, NACE, Houston USA, April, 1987.
4. Hassanein, A. M., Glass, G. K. and Buenfeld, N. R., "Effect of intermittent cathodic protection on chloride and hydroxyl concentration profile in reinforced concrete", British Corrosion Journal, Vol. 34, No. 4, 1999, pp.254-261.
5. Jung, M. S., Shin, M. C. and Ann, K. Y., "Fingerprinting of a concrete mix proportion using the acid neutralisation capacity of cement matrices", Construction and Building Materials, Vol. 26, No. 1, 2012, pp.65-71.
6. Marcotte, T. D., Hansson, C. M. and Hope, B. B., "The effect of the electrochemical chloride extraction treatment on steel-reinforced mortar Part I: Electrochemical measurements", Cement and Concrete Research, Vol. 29, No. 10, 1999a, pp.1555-1560.
7. Marcotte, T. D., Hansson, C. M. and Hope, B. B., "The effect of the electrochemical chloride extraction treatment on steel-reinforced mortar Part II: Microstructural characterization", Cement and Concrete Research, Vol. 29, No. 10, 1999b, pp.1561-1568.
8. Mattila, J. S., Pentti, M. J. and Raiski, T. A., "Durability of electrochemical realkalised concrete structures", In: Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction, C. L. Page, P. B. Bamforth and J. W. Figg, eds., Cambridge UK, 1996, pp.481-490.
9. Sergi, G., Walker, R. J. and Page, C. L., "Mechanisms and criteria for the realkalisation of concrete", In: Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction, C. L. Page, P. B. Bamforth and J. W. Figg, eds., Cambridge UK, 1996, pp.491-500.
10. Slater, J. E., Lankard, D. R. and Moreland, P. L., "Electrochemical removal of chlorides from concrete bridge decks", Transport Research Record, No. 604, 1976, pp.6-15.
11. Song, H. W., Lee, C. H., Lee, K. C., "A study on chloride

-
- binding capacity of various blended concretes at early age”, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol. 12, No. 5, 2008, pp.133-142 (in Korean, with English abstract).
12. Tritthart, J., “Electrochemical chloride removal - A case study and laboratory tests”, In: Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction, C. L. Page, P. B. Bamforth and J. W. Figg, eds., Cambridge UK, 1996, p.447.
13. Vrabie, J. B., “Cathodic protection for reinforcing steel in concrete”, In: Chloride Corrosion of Steel in Concrete, ASTM STP 629, 1975, pp.124-149.
- Received : 03/19/2013
Revised : 05/16/2013
Accepted : 05/20/2013

요 지

본 연구에서는 전기방식 종류에 따른 문헌 고찰 및 굳지 않은/굳은 상태의 콘크리트에 대해 전기방식 적용 시 방식 효과와 관련하여 연구를 실시하였다. 굳은 콘크리트의 경우 우선적으로 철근의 부동태피막 파괴를 유도하기 위하여 NaCl을 혼입한 후, 2주일동안 250, 500, 750 mA/m²의 방식전류를 통전하였다. 그 후 부동태피막 복원화와 염소 이온 추출에 대해서 정량화를 실시하였다. 동시에, 굳지 않은 상태의 콘크리트에 대해서는 굳은 상태와 동일한 양의 방식전류를 타설 직후부터 동일한 기간동안 통전하여 전기방식을 실시하였다. 후광산란 (Backscattered electron; BSE) 이미지를 이용하여 철근-콘크리트 계면을 관찰하였으며, 염소이온 확산에 대해서 염소이온 이동 속도와 철근 부식 저항성에 대한 콘크리트의 성질 변화에 대해 측정하였다. 결과적으로 보면, 전기 방식은 부동태피막 복원화에 매우 효율적이며, 콘크리트 내의 염소이온 중 63-73% 정도가 추출되는 것으로 확인 되었다. 굳지 않은 상태의 콘크리트에 전기방식을 적용할 경우, 철근 표면에서 Ca(OH)₂ 층이 조밀하게 되어 철근 부식 저항성이 향상되었다. 다만, 방식 전류에 따라 콘크리트 표면 염화물량이 증가하는 경향이 나타나는 것을 확인 할 수 있다.

핵심 용어 : 전기방식, 철근 부식, 염화물 이온, BSE 이미지 분석, 콘크리트, Ca(OH)₂