

전기화학적 방식 공법의 현황 및 전망

Current State and Prospect of Electrochemical Techniques
for Protection of Steel Corrosion in Concrete



정해문*
Hai-Moon Cheong



안태송**
Tae-Song An



김홍삼***
Hong-Sam Kim



한복규****
Bog-Kyu Han

1. 머리말

콘크리트는 화학적으로 매우 안정하여 거의 반영구적인 재료로 인식되어 왔으나, 최근 들어 염해, 탄산화, 알칼리 골재반응 등으로 인해 조기에 열화되는 보고가 증가하면서, 사회적으로 콘크리트 구조물의 내구성에 관하여 관심이 커지고 있다. 이들 중 염해 및 탄산화 등은 염화물 및 이산화탄소와 같은 열화요인으로 인해 콘크리트 구조물의 손상을 일으키는데, 염화물과 이산화탄소가 외부에서 침투할 경우, 이들은 콘크리트 중의 시멘트 수화물과 화학적으로 반응하여 프리델 염분이나 방해석(calcite) 등과 같은 반응생성물이 생성되나, 이 생성물들은 화학적으로 안정한 난용성으로, 시멘트 수화물과 체적 차이도 크지 않기 때문에 이들로 인한 조직손상은 거의 없다. 그러나, 염화물과 이산화탄소에 의해 콘크리트 구조물 내에 매입되어 있는 철근의 부식이 발생하는데, 이로 인한 손상이 가장 중요하다. 염해의 경우에는, 해수나 염화물계 제설제 등이 접촉하는 환경에서 일어나므로, 해양 혹은 적설한랭지역과 같이 제한된 환경에 놓인 구조물이 문제가 되고, 탄산화의 경우에는 도심환경이나 도로구조물 등 폭넓게 문제가 된다.

콘크리트 구조물에서 발생한 철근부식에 가장 많이 사용되는 보수방법은 패칭(patching) 방법으로서, 염화물이나 탄산화에 의해 오염된 콘크리트를 제거하고, 철근을 방청처리한 다음, 단면을 새롭게 채워 넣는 방법이다. 이 방법은 인력에 의한 일손이 많이 가는 것은 물론, 염해의 경우, 염분에 의해 오염된 부

분을 완전히 제거하는 것이 어렵기 때문에 비교적 길지 않은 기간 내에 재열화되어, 보수비용 및 횡수가 많이 든다는 치명적인 문제가 있어 근본적인 보수대책이라고 할 수는 없다¹⁾.

한편, 강재의 부식은 전기화학적인 반응이므로, 이러한 전기화학적 반응을 이용하는 방식 공법을 적용하면, 강재의 부식진행을 근본적으로 멈추게 하거나, 혹은 염화물 침투에 의한 오염 및 탄산화된 콘크리트를 이전 단계로 회복시키는 것이 가능하므로 강재 부식에 대한 최적 대책으로 인정받고 있다.

본 고에서는 최소의 LCC 및 예방적 유지관리 측면의 내구성 향상 대책으로 중요하게 떠오르고 있는 전기화학적 방식 공법에 대해서 살펴 보도록 한다.

2. 전기화학적 방식 공법의 개요

2.1 전기화학적 방식 공법 종류

전기화학적 방식 공법은 구조물 표면 혹은 외부에 설치된 양극으로부터 콘크리트 내의 철근으로 직류전류를 흘려줌으로써 전기화학적 반응을 이용해 철근 부식에 의한 열화를 억제시켜, 궁극적으로 콘크리트 구조물의 내구성을 향상시키는 목적으로 사용되는 공법이다²⁾.

이와 같은 공법으로는 전기 방식 공법(cathodic protection), 전기화학적 탈염 공법(desalination, electrochemical chloride extraction), 전기화학적 재알칼리화 공법(electrochemical realkalization), 전착 공법(electrodeposition) 등이 실용화되어 있다.

전기화학적 반응을 이용하여 구조물의 내구성을 향상시키는 기술로서는 이미 오래전부터 선박이나 해수중 및 지중의 강구조물에 대한 방식대책으로 전기 방식 공법이 적용되어 왔다. 금속에 대한 전기방식은 1824년 Davy가 철과 아연을 이용하면 해수 중의 동이 방식된다는 점을 밝힌 이래³⁾, 파이프라인 등과 같은

* 정회원, 한국도로공사도로교통기술원 재료환경연구그룹 책임연구원 haimoon@freeway.co.kr

** 정회원, 한국도로공사도로교통기술원 재료환경연구그룹 수석연구원

*** 정회원, 한국도로공사도로교통기술원 재료환경연구실 박사후연구원

**** 정회원, (주)한국소브토건설 기술개발팀 과장

표 1. 전기화학적 방식공법별 주요 특징

항 목	전기 방식	탈염	재알칼리화	전착
통전 기간	방식시간 중 계속	약 8주간	약 1 ~ 2주	약 6개월간
전류 밀도	0.001 ~ 0.03 A/m ²	1 A/m ²	1 A/m ²	0.5 ~ 1 A/m ²
통전 전압	1 ~ 5 V	5 ~ 50 V	5 ~ 50 V	10 ~ 30 V
전해질액	-	Ca(OH) ² 수용액 등	Na ₂ CO ₃ 수용액 등	바닷물
효과 확인 방법	전위 혹은 전위변화량	콘크리트 중의 염화물이온량	콘크리트 중성화 깊이	콘크리트의 투수계수
효과 확인 빈도	수회/년	통전 종료 후	통전 종료 후	통전 종료 후

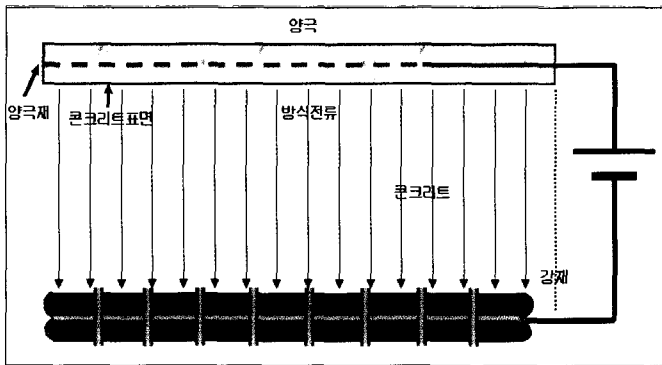
표 2. 전기화학적 방식공법의 방식 대책 목적과 기대되는 주된 효과

구 분	방식 대책	기대되는 주된 효과
전기 방식	부식 반응의 억제	부식 전지의 억제
전기화학적 탈염	강재의 부식환경 개선	염화물 이온 농도의 저감
재알칼리화		콘크리트의 알칼리성 회복
전착	부식인자 공급 저감	균열 폐쇄 및 치밀화

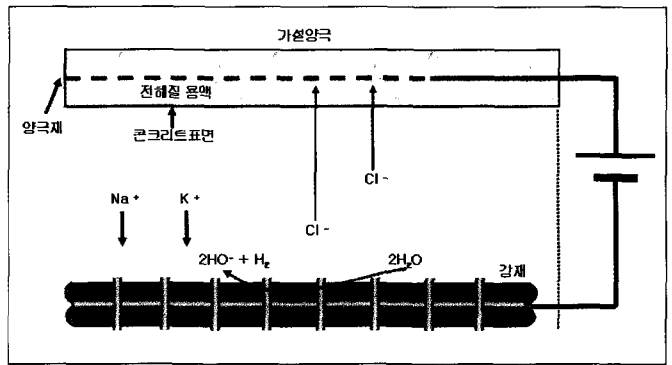
지하 구조물과 석유굴삭 플랫폼 등의 해양 구조물이나 선박 등에 대한 방식으로서 확립된 기술로서 현재에 이르고 있다. 이에 비해, 콘크리트 구조물에 전기화학적 방식 기술을 적용한 것은 비교적 새로운 기술로서, 철근콘크리트에 대한 전기 방식의 적용은 초기에는 미국에서 염해에 의한 콘크리트 구조물의 강재 부식이 문제가 되기 시작한 1960년대에 지중 구조물에 대한 기

술로 적용되었고, 대기중 콘크리트 구조물에 대해서는 1973년 미국 캘리포니아 교량 상판에 최초로 적용되었다⁴⁾. 한편, 탈염 공법과 재알칼리화 공법은 유럽에서 1970년대에, 그리고 전착 공법은 일본에서 1980년대에 개발된 기술이다²⁾.

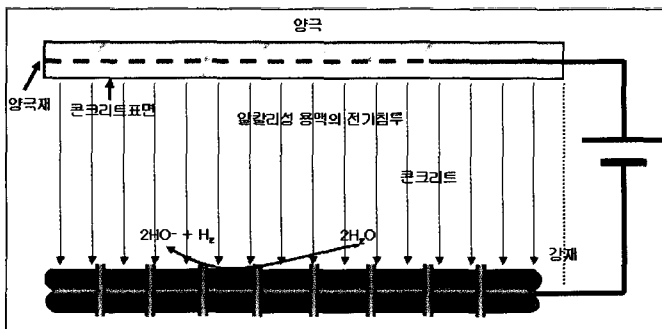
본래 콘크리트 내부의 철근은 시멘트의 수화반응에 의한 고 알칼리 환경하에 있어, 철근의 표면에 부동태 피막이 형성되어 부식으로부터 보호되고 있으나, 염화물 이온이 침투하거나, 탄산화에 의해 콘크리트가 중성화될 경우, 부동태 피막이 파괴해 철근 부식이 진행된다. 강재의 부식은 전기화학적 반응으로 진행된다므로, 콘크리트 구조물에 전기화학적 방식 공법을 적용하게 되면 매우 효과적이어서 내구성 향상을 크게 기대할 수 있다. 설계 및 시공, 유지관리 단계에서 전기화학적 방식 공법을 적용



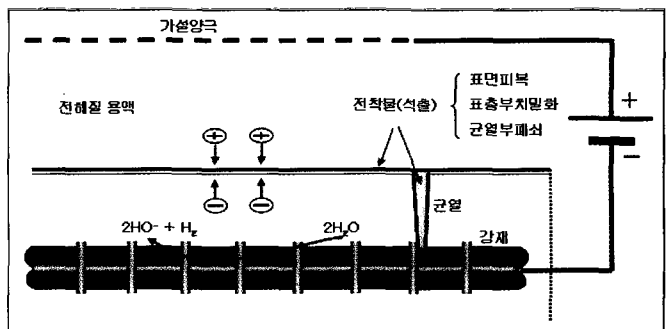
(a) 전기 방식 공법



(b) 전기화학적 탈염 공법

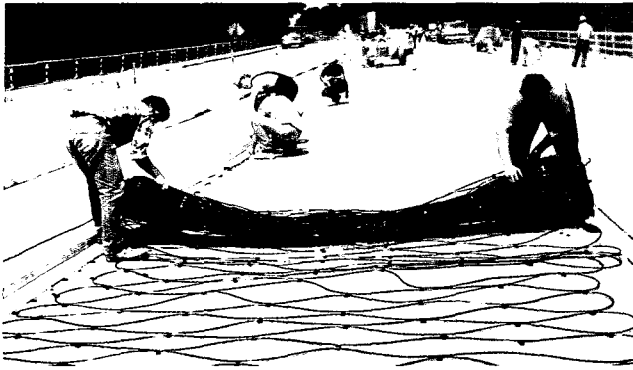


(c) 전기화학적 재알칼리화 공법

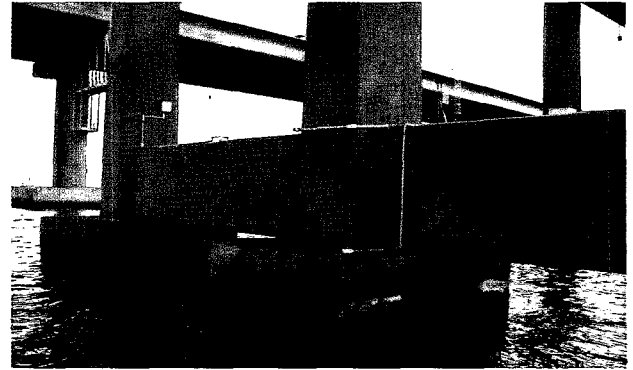


(d) 전착 공법

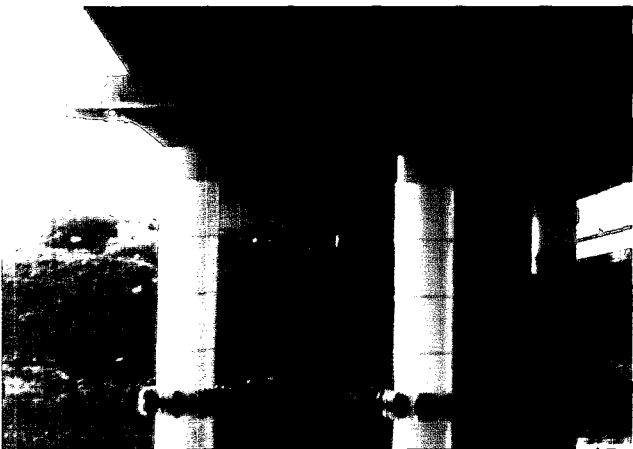
그림 1. 각 전기화학적 방식공법의 개요도



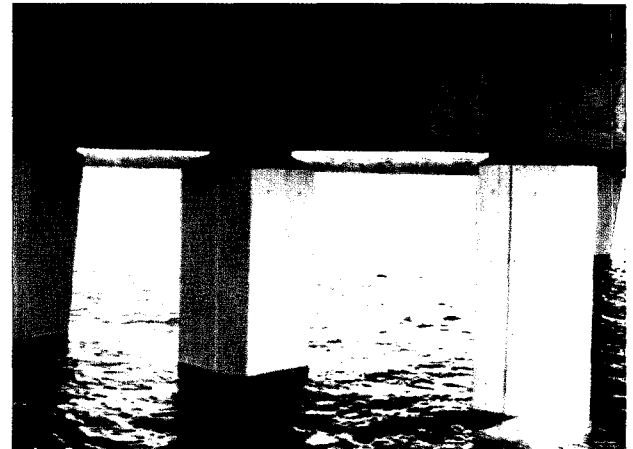
(a) 외부전원법에 의한 교량상판 전기 방식 시공 예
(미국, Flexible anode 방식)



(b) 외부전원법에 의한 교량 전기 방식 시공 예
(미국, MMO 티타늄메쉬+Overlay)



(c) 외부전원법에 의한 교량 전기 방식 시공 예
(영동고속도로 소래교, MMO 티타늄메쉬+FRP겨우집)



(d) 희생양극법에 의한 교량 전기 방식 시공 예
(미국, Zn 메쉬 + 라이프자켓시스템)

그림 2. 전기방식공법 시공사례 사진

할 경우 기대되는 효과로는, ① 강재의 부식인자에 대한 공급 저감, ② 강재의 부식인자의 제거, ③ 강재의 부식 진행의 억제 등을 들 수 있다.

현재 실용화되어 있는 4가지 전기화학적 방식 공법의 원리를 나타낸 개요도는 <그림 1>에, 공법에 대한 특징은 <표 1, 2>에 나타내었다²⁾.

전기화학적 방식 공법의 원리는 콘크리트 내부의 철근이 음극으로 작용하게 하고, 콘크리트 표면 혹은 외부에 양극재를 설치하여 전기적으로 회로를 형성시킨 후 직류전류를 부가하는 방법을 통해, 전기 방식과 전착 공법의 경우는 철근의 부식진행을 억제시키고, 탈염과 재알칼리화 공법은 콘크리트 내부의 염분을 제거하거나, 알칼리성을 부여시키는 것이다. 기본적으로 모든 방식공법의 원리는 동일하나, 전류밀도의 크기와 통전시간이 차이가 난다.

각각의 공법에 대해서 간단히 살펴 보기로 한다. 먼저, 전기방식공법은 방식전류를 공급함으로써 당초 철근의 자연전위보다 (-)방향으로 100 mV 이상 이동시켜⁵⁾ 철근을 방식상태에 놓이게 하는 것으로서, 방식전류의 공급방법에 따라 외부전원법과 희생

양극법, 그리고 양극재의 종류 및 형상, 양극재의 설치방법 등에 따라 여러 종류가 제안되어 있다. <그림 2>에 여러 종류의 전기 방식 공법의 시공 사례를 나타내고 있다.

전기화학적 탈염공법과 재알칼리화 공법은 동일한 공법인데, 탈염은 염해에 의해 오염된 콘크리트 구조물에 대해, 재알칼리화는 탄산화에 의해 손상된 콘크리트 구조물에 대해 적용하는 공법이다. 철근을 음극으로 하고, 콘크리트 표면에 양극재를 설치해 통전할 경우, 콘크리트 내부의 나트륨(Na^+) 등의 알칼리 이온은 음극인 철근방향으로 이동하는데 반해, 염화물인 음이온(Cl^-)은 양극방향으로 이동하게 된다. 이와 같은 현상을 전기삼투현상(electro-osmosis)라고 한다. 이 공법들은 콘크리트를 물리적으로 파괴하지 않고 부식발생 환경을 회복·개선시키므로 매우 유용한 공법이라고 할 수 있다.

전기화학적 탈염 공법은 콘크리트 중의 공극중에 존재하는 염화물 이온을 직류전류를 흘려줌으로써 전기적 이동을 시켜 양극재가 있는 콘크리트 외부로 빼내어, 콘크리트 구조물의 내구성을 향상시키는 것이다. 직류전류 통전 중에 콘크리트 내부의 철근은 음극이 되므로 강재 주변의 수분이 전기 분해되어 다량의

표 3. 염해에 의한 구조물의 열화단계 구분 및 표준적인 보수 공법

열화 과정	정 의	외관 상태	표준적인 보수 공법
잠재기	철근위치에서의 염화물 이온농도가 부식발생한계농도(1.2 kg/m ³)에 달할 때까지의 기간	콘크리트 외관상 아무 이상없음.	<ul style="list-style-type: none"> 주의깊게 지속적인 관찰 표면피복 - 예방적으로 실시하는 공법
진진기	철근의 부식이 시작되어, 부식생성물(녹) 발생으로 인한 덮개 콘크리트 균열 발생까지의 기간	콘크리트 외관상 아무 이상없음. 실제로 내부의 철근은 부식개시	<ul style="list-style-type: none"> 전기방식 전기화학적 탈염 표면피복(전기방식 및 탈염과 병행할 수 있음)
촉진기	부식에 의한 균열 발생으로 염화물, 수분, 공기의 침투가 더욱 용이해져 부식속도가 증대하는 기간	(전기) 철근부식에 의한 균열 발생, 녹물 발견 (후기) 부식균열 다수 발생, 녹물 다수 발견. 부분적인 박리, 박락 발견. 철근부식량 증대됨.	<ul style="list-style-type: none"> 단면복구 전기방식 전기화학적 탈염 표면피복(전기방식 및 탈염과 병행할 수 있음)
한계기	철근의 부식량이 증가하여 구조물의 내하력 저하가 현저하게 되는 기간	부식균열 다수 발생. 균열폭 증가. 박리, 박락 다수 발생. 변형 및 처짐 증대	<ul style="list-style-type: none"> FRP접착 단면복구 Out cable 단면증설



그림 3. PSC교량에 대한 탈염 공법 적용 예(일본)

수산기(OH⁻)를 발생하고, 이에 의해 철근은 pH 12 ~ 13 정도의 높은 알칼리 분위기로서 보호된다. 통상 매쉬형태의 티타늄 합금을 양극재로 하여 콘크리트 표면을 감싸고 직류전류를 통전시킨다. 이 때 콘크리트의 전기저항을 저하시키기 위해 전해액으로서 포화수산화칼슘을 함유한 섬유질 판넬을 콘크리트 표면에 설치하고, 1~2개월 정도의 기간 동안 통전시킨다⁶⁾. 한편, 재알칼리화 공법에서는 통전에 의해 나트륨 등의 알칼리 이온이 콘크리트 내부의 철근방향으로 이동하고, 철근은 음극반응을 일으켜 수산기가 발생, 고알칼리를 회복하여 철근을 부동태화시킨다. 이 두 공법이 전기방식과 가장 큰 차이점은 적용하는 전류밀도가 크다는 것과 처리하는 기간이 짧다는 점이다. 탈염 공법 처리 후에는 물흡수, 기체 및 염화물 등에 대한 침투저항성과 전기저항 등 콘크리트 내구성이 향상된다고 알려져 있다⁷⁾. 탈염공법 처리 시 존재하는 염화물 이온의 완전한 제거가 사

실상 불가능하기 때문에 실란 함침 공법과 같은 표면처리 공법을 병용하는 것이 유효하다고 알려져 있다. 탈염 공법 적용 예를 <그림 3>에 나타내었다.

전착 공법은 전기 방식 공법의 한 응용 예라고 볼 수 있다. 해수중의 콘크리트 구조물에 대하여 해수 중에 설치한 양극으로부터 콘크리트 중의 철근에 직접 전류를 흘림으로써 콘크리트 표면과 균열에 치밀한 석출물을 생성시키는 공법이다. 해수 중의 마그네슘(Mg)과 칼슘(Ca) 이온이 전기적 이동현상에 의해 이동하여 Mg(OH)₂와 CaCO₃가 석출된다. 통상 케이스의 경우 콘크리트 면적당 0.5 A/m²정도의 전류밀도를 적용한다.

한편 전기 방식 공법을 기존 구조물의 보수 공법으로 적용할 때는 Cathodic Protection(CP)이라고 하는데 반해, 신설 구조물에 적용할 경우에는 Cathodic Prevention(CPre)이라고 하여 최근 그 적용 사례가 점점 증가하고 있다¹⁾. 특히 미국과 유럽의 고속도로에 적용예가 있는 이 공법은, CP공법에 비해 설계가 단순하여 양극재의 사용량도 작고 내구수명도 더 길며, 신설 구조물에 적용되므로 보수시보다 시공단가가 작게 드는 장점이 있어, LCC 관점에서 향후 기대되는 공법이라고 할 수 있다. 영국에서 보고된 바에 의하면 CPre공법에서 사용하는 전류밀도는 2 ~ 5 mA/m² 정도로서 CP에 비해 매우 작고, 설치비용도 3 ~ 5% 낮은 것으로 나타났다⁸⁾.

2.2 전기화학적 방식공법 적용의 기본

현재 콘크리트표준시방서 유지관리편에서는 염해, 탄산화 등의 열화요인에 의해 콘크리트 구조물의 손상이 발생할 경우, 구

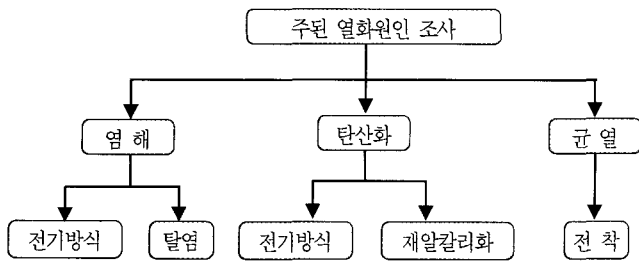


그림 4. 전기화학적 방식 공법 선정 흐름²⁾

조물의 손상단계를 잠재기, 진전기, 촉진기, 한계기 등의 4단계로 구분한다. 염해의 경우, 각 손상단계별 정의와 단계별 표준적인 보수공법에 대해서 <표 3>과 같이 추천하고 있다⁹⁾.

철근의 부식이 발생한 이후의 단계에 적용되는 공법이 전기방식, 탈염 등과 같은 전기화학적 방식 공법들이다. 이러한 방식공법들은 철근의 부식진전을 억제하거나, 부식발생 환경을 개선해주는 효과가 있지만, 구조물 보강 성능은 없으므로, 내하성능 저하에 의한 보강이 필요한 촉진기 이후에는 적용하지 않는다. 전기화학적 방식 공법을 선정하여 시공할 경우, 먼저 콘크리트 구조물의 열화기구로부터 기대되는 효과를 고려하여, 요구되는 성능을 만족할 수 있도록 공법을 선정해야 한다. <그림 4>에 전기화학적 방식 공법 선정에 대한 흐름을 나타내었는데, 적정 공법을 선정하기 위해서는 시공에 드는 비용, 지속적인 통전이 가능한지의 여부, 염화물 이온의 재침투 및 재차 탄산화가 발생할 가능성 등을 고려하여 선정하는 것이 일반적이다²⁾.

2.2.1 염해에 대한 대책으로서 전기화학적 방식 공법 적용

콘크리트 구조물의 염해대책으로서 전기 화학적 공법을 적용할 경우, 전기 화학적 방식 공법 중에서 전기 방식과 탈염 공법, 전착 공법이 적용된다. 일반적으로 염해에 대한 손상 진단 후, 보수 대책으로 적용하는 예가 많지만, 최근에는 CPre와 같이 신설 구조물에 대해서는 예방적 유지관리 차원에서 적용하는 예도 증가하고 있다. 이는 LCC 측면에서 매우 바람직하다.

콘크리트 구조물의 염해대책으로서 전기화학적 공법을 적용할 경우, ① 구조물의 예상 수명, ② 구조물이 놓여 있는 환경, ③ 구조물의 종류, ④ 적용하고자 하는 구조물의 부위, ⑤ 구조물에 요구되는 내구 성능, ⑥ 구조물의 사용조건(예를 들어 사용하중, 교통량 등), ⑦ 비용 등을 종합적으로 고려하여 선정하는 것이 기본이다.

전기 방식 공법의 경우 전체 구조물에 적용하는 것이 가능하지만, 일반적으로 해양환경에서 간만대 및 해수중부, 제설제의 영향을 받는 바다판 등의 부위에 대해서 양극장치의 시공성 및 내구성 등을 고려하여 적용하고, 일반 대기부위와 콘크리트의 함수상태가 다르므로 회로를 다르게 구성하여야 한다. 또한 열

표 4. 염해 대책으로 전기화학적 공법 적용 예⁹⁾

적용 대상	보수 공법	전기화학적 공법 종류		
		전기 방식	탈염	전착
환경	육상부, 내륙부 (제설제 살포환경포함)	○	○	△
	해양환경	○	○	△
	해상대기중	○	○	△
	비말대	○	○	△
	간만대	△	△	△
구조 부재	RC 구조물	○	○	○
	PSC 구조물	○	△	△
	잠재기	○	○	○
신설 시설 구분	열화도	○	○	○
	진전기	○	○	○
	촉진기	○	○	○
	한계기	△	△	△
	신 설	○	-	○

○ : 적용 대상 △ : 적용할 경우 검토 필요 - : 적용 대상 제외

화단계가 이미 촉진기 또는 한계기에 접어든 경우에는 콘크리트에 균열 및 단면 결손 등이 생긴 경우에는 전기 방식 공법 이외에도 다른 보수 및 보강 공법을 병용하는 것이 좋다.

탈염 공법을 염해대책으로 적용할 경우, 탈염 공법은 철근 주위의 염화물 농도가 부식발생 임계농도 이하가 되도록 일정기간을 통전한다. 탈염처리를 행하여도 콘크리트 중의 염화물 이온을 100% 제거하는 것은 불가능하여, 어느 정도의 염화물이 잔존하는 것이 일반적이므로, 탈염처리 후에도 철근 주위의 염화물 농도를 측정하여 공법 적용 이후의 염해 열화 과정을 예측할 필요가 있다. 한편 신설시에는 콘크리트의 염화물농도를 0.3kg/m³ 이하로 규정하여 관리하므로, 탈염 공법을 적용할 필요가 없다. 구조물이 비래염분 및 해수가 직접 접촉하는 부위에 위치할 경우, 탈염처리 후에도 염화물 이온 및 산소 등이 계속 공급되는 환경이므로, 표면피복 등의 염분 차단공법을 병용하는 것이 기본이다.

전착 공법은 해양환경에 놓인 구조물에 대한 균열 보수 및 콘크리트 표층부의 치밀화를 위한 공법으로서 주로 해수중에 적용되고 있으나, 간만대로부터 대기부 및 육상부로 적용하기 위해 많은 검토가 진행중이다.

<표 4>에 염해 대책으로 전기화학적 방식공법을 적용한 예에 대해서 나타내었다²⁾.

2.2.2 탄산화 대책으로서 전기화학적 방식공법의 적용

탄산화 대책으로서 적용할 수 있는 전기 화학적 공법으로는 전기 방식과 재알칼리화 공법이 있다. 탄산화에 의해 강재의 부식반응을 억제시키기 위해서는 전기 방식 공법을 적용할 수 있고, 탄산화된 콘크리트에 다시 알칼리성을 회복시켜 콘크리트 자체의 방식 성능을 부여하기 위한 목적으로는 재알칼리화 공법을 적용할 수 있다.

표 5. 탄산화 대책으로 전기화학적 공법 적용 예²⁾

적용 대상	보수 공법	전기화학적 공법 종류	
		전기 방식	재알칼리화
환경	육상부, 내륙부	○	○
	해양환경	○	○
구조 부재	RC 구조물	○	○
	PSC 구조물	○	△
신설 기설 구분	잠재기	○	○
	기설 열화도	진전기	○
		촉전기	○
		한계기	△
	신설	○	-

○ : 적용 대상 △ : 적용할 경우 검토 필요 - : 적용 대상 제외

표 6. 전기화학적 방식공법 각국 적용 기준 예

구분	적용 기준	비고
전기 방식	NACE Standard RP0290-90 Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Structures(1990)	-
	EN 12696 Cathodic Protection of Steel in Concrete (2000)	-
	일본토목학회 전기화학적 방식공법 설계시공지침(안) (2001)	-
탈염/재알칼리화	AASHTO Standard Specification for Electrochemical Chloride Extraction	-
	일본토목학회 전기화학적 방식공법 설계시공지침(안) (2001)	-
전착	일본토목학회 전기화학적 방식공법 설계시공지침(안) (2001)	-

앞서 염해 대책에서 설명한 바와 같이, 탄산화에 대한 대책으로 전기 방식을 적용할 경우, 신설시 예방적 유지관리 측면에서 적용할 수 있으나, 신설시에는 탄산화에 의한 열화가 발생하지 않은 상태이므로, 재알칼리화 공법을 적용하지 않는다.

탄산화 손상에 대한 보수공법으로 재알칼리화 공법을 적용할 경우, 적용에 앞서 콘크리트 구조물에 대한 탄산화 깊이를 조사하여 시공한다. <표 5>에 탄산화에 대한 대책으로서 전기화학적 공법 적용예를 나타내었다²⁾.

3. 전기화학적 방식 공법의 적용 현황 및 해결과제

3.1 전기화학적 방식 공법의 적용 현황

전기화학적 방식 공법의 적용 현황에 대하여 전 세계적으로 정확한 통계를 조사하기는 어렵지만, 전기방식공법의 경우, 2000년까지 수천 케이스에 2백만 m² 이상 적용되었고¹⁾, 탈염 공법과 재알칼리화 공법은 미국과 유럽에서 1998년까지 약 100여건 이상에 15만 m² 적용 실적¹⁰⁾, 일본에서는 2001년까지 54건에 28,800 m² 보고되었다²⁾.

적용 실적은 1980년 이후로 세계적으로 점점 증가하는 추세로서, 이는 구조물에 대한 목표공용기간내에 발생하는 총비용인 LCC 비용을 최소화할 수 있는 가장 효과적인 공법이라는 인식이 퍼져가고 있기 때문이다. 한편, 구조물별 적용사례를 보면 해상교량, 항만 구조물, 교량 상판 등이 주를 이루고 있으나, 최근 주차장, 발코니, 수영장 등과 같은 건축물에 적용되는 사례도 증가하고 있다.

<표 6>에 전기화학적 방식공법별 각국 적용 기준 및 지침을 나타내었다^{2,11,13)}. 적용실적이 가장 많은 전기방식의 경우, NACE, EN 등의 기준은 물론, 일본을 비롯한 각국에서 적용 지침을 보유하고 있다. 그러나, 탈염 및 재알칼리화 공법에 대

해서는 AASHTO의 기준도 아직 draft 형태의 기준이어서 NACE에서 위원회를 통해 AASHTO와 제정중인 EN기준을 검토하고 있다. 한편 일본에서는 2001년 토목학회에서 전기화학적 방식 공법 설계시공지침(안)을 제정한 바 있다.

3.2 전기화학적 방식 공법의 해결 과제

콘크리트 구조물에 대한 전기화학적 방식 공법은 적용된 실적이 많아 충분히 확립된 기술이라고 생각되지만, 실제로 염해를 받는 콘크리트 구조물의 상황이 천차만별이어서 적용된 모든 구조물이 성공적이었다고는 볼 수 없다. 이것은 방식공법에서 가장 중요한 방식기준과 이를 안정하게 유지하기 위한 관리 기법이 상황에 따라 달라지고, 시공시 수반되는 여러 문제의 발생 등 때문으로, 이러한 의미에서 지금부터 검토해서 해결해야 할 과제가 많다.

전기화학적 방식 공법에서는 회로상 음극으로 작용하는 콘크리트 중의 철근 표면에서 수소가스가 발생하는데, 이 수소가스가 철근 내부로 흡수되면 수소취화(hydrogen embrittlement)를 일으킬 가능성이 있다. 통상적으로 전기방식에 비해 탈염 및 재알칼리화 공법이 통전량이 크므로 수소취화 가능성이 큰 것으로 알려져 있고, 일반철근보다는 PSC 교량의 텐던과 같이 고응력 상태의 고강도 강재에서 더 민감하다. 대부분의 지침에서 방식 상태에서의 전위가 -1100 mV를 초과해서는 안되는 것으로 권고하고 있다. 최근 보고에 의하면 탈염공법 종료 직후 수소발생의 영향이 없어지는 것으로 판명되어, 전기 통전방법을 단속적으로 행하게 되면 수소가스의 영향을 최소한으로 억제가능하다고 알려져 있다²⁾.

철근의 부착강도 저하에 대한 우려도 지적되고 있는데, 최근 까지 통상적인 전기화학적 방식 공법에서는 통과 전하량이 작

아 큰 문제가 되지 않는다고 알려져 왔으나¹⁴⁾, Buenfield 등에 의하면, 부식이 발생한 철근이 부식이 발생하지 않은 철근보다 부착 강도가 높은 것으로 알려져 있어, 부식이 발생한 철근 콘크리트 구조물에 대하여 탈염 공법을 적용하면 부식 생성물이 제거되어, 동일 수준의 부식이 발생하지 않은 철근에 비해 부착 강도가 저하된다고 보고하고 있다⁷⁾. 물론 부식이 발생하지 않은 철근의 경우에는 탈염 공법을 적용하여도 부착강도의 차이는 발생하지 않는다. 한편, 전기화학적 방식 공법을 적용함으로써 인하여 발생하는 부작용으로 알칼리 골재반응을 들 수 있다. 이는 전기화학적 반응에 의해 철근 표면에서 수산화이온이 발생하고, 알칼리이온이 재분포하는 것과 관련이 있어, 영국에서는 이와 관련된 검토가 지속적으로 수행되고 있다³⁾.

이외에도 전기 방식 공법이 적용된 구조물의 경우, 주변의 다른 구조물이 같은 전해질에 존재하게 되면, 주변 구조물의 부식이 촉진될 가능성이 있다. 특히 전기 방식이 적용된 수중이나 지중 구조물이 수중 혹은 지중을 통해 방식 전류가 흘러 동일한 수중 혹은 지중내 위치한 주변 구조물에 영향을 주는 것이 관찰되기도 한다. 그리고 구조물에 대한 최적 보수 공법을 선정하기 위해서는 보수비용과 더불어 구조물에 요구되는 내구수명을 종합적으로 평가해서 결정해야 하는데, 전기화학적 보수 공법에 대한 각 구조물별 종합적 평가에 대한 데이터가 아직 충분하지 않은 실정이므로 이에 대한 검토가 필요하다.

4. 마무리

전기화학적 방식 공법은 염해 및 탄산화 등에 의해 손상을 입은 콘크리트 구조물의 보수대책 중의 하나로서 구조물을 물리적으로 파괴하지 않고 철근의 부식을 근본적으로 정지 혹은 발생하지 않게 하므로 매우 유효한 공법이라고 할 수 있다.

구조물에 대한 최적 보수 공법을 선정하기 위해서는 보수비용과 더불어 구조물에 요구되는 내구수명을 종합적으로 평가해서 결정해야 하는데, 전기화학적 방식 공법의 경우, 이에 대한 데이터가 충분한 것은 아니지만, 영국에서 수행된 3개 교량에 대한 비용분석결과를 보면, 전기화학적 방식 공법을 적용하여 보수할 경우, 교체비용 대비 25% 절감, 페칭(patching)과 같은 전형적인 보수방법과 비교하여 50% 정도의 비용절감효과를 가져온다고 보고한 바 있다¹⁵⁾. 비용에 대한 분석은 구조물의 형식 및 놓여져 있는 환경 등에 따라 달라지므로 이에 대한 더욱 깊

은 검토가 있어야 하겠지만, 전형적인 보수방법과 비교해 LCC 측면에서 비용이 절감되므로 국내에서도 전기화학적 방식 공법을 적극적으로 적용할 필요가 있다.

본문에서 기술한 바와 같이 기술적으로 아직 확립되지 않은 부분이 많이 남아 있고, 특히 국내의 경우, 구조물이 위치한 환경이나 시공여건이 외국과 많이 다르므로, 공법 적용을 위한 폭 넓고 깊은 연구가 진행되어야 할 것으로 생각된다. □

참고문헌

1. R.P.Polder, *Electrochemical Techniques for Corrosion Protection and Maintenance*, in *Corrosion in Reinforced Concrete Structure* edited by H. Bohni, CRC Press 2005.
2. 電氣化學的防食工法設計施工指針(案), 日本土木學會 2001.
3. Concrete Society, *Cathodic Protection of Reinforced Concrete*, Concrete Society and Corrosion Engineering Association 1 Report No.36, 1989, 9pp.
4. 콘크리트 구조물의 전기화학적 방식 공법 연구위원회 보고서, 일본 콘크리트 공학協會, 1994, 2 pp.
5. NACE, *Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Concrete Structure*, NACE RP 0290-90, 1990.
6. 片脇 清士, 最近のコンクリート防食と補修技術, p.206, 山海堂.
7. J.P.Broomfield and N.R.Buenfeld, *Effect of electrochemical chloride extraction on concrete properties: Investigation of field concrete*, Trans. Res. Rec. 1597, 1997, pp.78~81.
8. B.Bazzoni, L.Lazzari, M.Grandl, et al, *NACE Corrosion '94*, Baltimore, Paper 283, 1994.
9. 건설교통부, 콘크리트표준시방서 유지관리편, 한국콘크리트학회 2005.
10. D. Hudson, *Current Developments and Related Techniques, in Cathodic Protection of Steel in Concrete* by P. Chess, E & FN SPON 1998, 153pp.
11. *NACE Standard RP0290-90 Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Structures*, 1990.
12. *CEN, EN 12696 Cathodic Protection of Steel in Concrete*, 2000.
13. AASHTO Standard Specification for Electrochemical Chloride Extraction.
14. J.Bennet et al, *Electrochemical Chloride Removal and Protection of Concrete Bridge Components*, Laboratory Studies, SHRP-S-657, 1995.
15. D. Eyre, *Avoidance of Potential Side Effects, in Cathodic Protection of Steel in Concrete* by P. Chess, E & FN SPON, 1998, 182pp.